

EnOB Verbundforschungsprojekt

MFGeb - Methoden zur Fehlererkennung im Gebäudebetrieb

Abschlussbericht



Förderkennzeichen: 03ET1371A, 03ET1371D, 03ET1371E

Datum: 15.12.2022

Laufzeit: 01.09.2018 – 30.06.2022

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

Förderinitiative:



Projektträger:



Gefördert durch:



Verbundpartner:

Teilvorhaben A (FKZ: 03ET1371A)

System-FMEA (Fehlermöglichkeiten- und Einflussanalyse)
und FMEA-Modulbibliothek für gebäudetechnische
Anlagenkomponenten
Laufzeit: 01.07.2018 – 30.06.2022

Fachhochschule Erfurt – University of Applied Sciences
IBIT – Institut für bauwerksintegrierte Technologien
Altonaer Str. 25
99085 Erfurt
Projektleiter: Prof. Dr.-Ing. Michael Kappert

Teilvorhaben D (FKZ: 03ET1371D)

Plattformintegration der FMEA in die
Gebäudeautomatisierung
Laufzeit: 01.07.2018 – 30.06.2022

ifm software gmbh
Äußere Zwickauer Straße 8
08064 Zwickau
Projektleiter: Dipl.-Ing. Edgar Liebold

Teilvorhaben E (FKZ: 03ET1371E)

Kältetechnik
Laufzeit: 01.11.2019 – 30.06.2022

Institut für Luft- und Kältetechnik gGmbH
Bertholt-Brecht-Allee 20
01309 Dresden
Projektleiter: Dr.-Ing. Ralph Krause

Projektkoordination

Fachhochschule Erfurt – University of Applied Sciences

IBIT – Institut für bauwerksintegrierte Technologien

Altonaer Str. 25

99085 Erfurt

Prof. Dr.-Ing. Michael Kappert

Bearbeitung / Autoren

FH Erfurt, IBIT

Prof. Dr.-Ing. Michael Kappert

Christoph Hutter, M.Eng.

Patrick Müller, M.Eng.

Andre König, M.Sc.

Adrian G. Gebhardt, M.Eng.

ILK Dresden

Dr.-Ing. Ralph Krause

Falko Ziller

Peter Giesler

IFM Software GmbH

Dipl.-Ing. Edgar Liebold

Frank Zeidler

Kontakt

ibit@fh-erfurt.de

kappert@fh-erfurt.de

Zusammenfassung

Mit steigender technischer Komplexität von Gebäuden steigt auch die Anfälligkeit für verschiedenste Fehlermöglichkeiten in den einzelnen Phasen des Gebäudezyklus. Es ergeben sich zumeist komplexe Fehlerszenarien, die sich auf die Sicherheit, den Komfort, die Wirtschaftlichkeit, die Anlagenverfügbarkeit sowie die Energieeffizienz im Gebäude auswirken.

In der präventiven Fehlervermeidung und Fehlerreduktion im laufenden Anlagenbetrieb liegt weiteres Energieeinsparpotential. Automatisierte Methoden zur Fehlererkennung und -diagnose (FED), als Teil der Betriebsüberwachung, ermöglichen es eine Vielzahl von Fehlerzuständen frühzeitig zu erkennen, Verantwortliche zu informieren und Gegenmaßnahmen zur Fehlerbeseitigung zu initiieren.

Die Betriebsüberwachung sollte dabei mit einer möglichst kleinen Anzahl von Datenpunkten auskommen und somit ein niedrighwelliges Umsetzungshindernis für Investoren, Errichter und Betreiber darstellen. Die Herausforderung bei einer geringen messtechnischen Ausstattung besteht zumeist in der Eingrenzung der möglichen Fehlerursache im Kontext des komplexen Gesamtsystems.

Die hierfür notwendige Wissensbasis, über mögliche Fehlerereignisse und deren spezifische Symptomatik, erfordert eine differenzierte und einheitliche Vorgehensweise bei der Erfassung, Beschreibung und Bewertung möglicher Fehlerszenarien. Mit der Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse (FMEA) existiert eine standardisierte und bewährte Methodik, welche vorwiegend bei der Produktentwicklung eingesetzt und maßgeblich in der Raum- und Luftfahrt-, Medizin- und Automobilbranche weiterentwickelt wurde.

Im Verbundprojekt „MFGeb – Methoden zur Fehlerdiagnose im Gebäudebetrieb“ wurde die FMEA auf unterschiedliche Bereiche der technischen Gebäudeausrüstung angewendet. Mit dem zeitlichen Fokus auf der Betriebsphase wurden verschiedene Fehlerszenarien auf ihre Fehlersymptome hin untersucht und in einer Fehlerdatenbank standardisiert erfasst.

Auf dieser Grundlage entwickelte das Institut für Luft- und Kältetechnik gGmbH (ILK), die ifm Software GmbH und das Institut für bauwerksintegrierte Technologien (IBIT) der Fachhochschule Erfurt gemeinsam verschiedene Fehlerdiagnosealgorithmen für gebäudetechnische Komponenten und Anlagen, welche anschließend in vorhandene Automationsplattformen implementiert wurden. Einzelne Fehlerszenarien wurden dabei exemplarisch in Versuchsanlagen nachgebildet und zur Entwicklung und Validierung der FED-Algorithmen messtechnisch untersucht.

Abstract

With the increasing technical complexity of buildings, the susceptibility to a wide variety of possible faults in the individual phases of the building life cycle also increases. This usually results in complex fault scenarios that affect safety, comfort, cost-effectiveness, system availability and energy efficiency in the building.

Preventive fault avoidance and fault reduction during the system operation hold further energy saving potential. Automated methods for fault detection and diagnosis (FDD), as part of the operational monitoring, allow identifying a large number of fault states at an early stage, informing the persons in charge and initiating countermeasures to correct faults.

The operational monitoring is to make do with the smallest possible number of data points and thus represent a low-threshold implementation obstacle for investors, installers and operators. The challenge with little metrological equipment is mostly to narrow down the possible cause of the fault in the context of the complex overall system.

The knowledge base required for this, about possible fault events and their specific symptoms, requires a differentiated and uniform approach to registering, describing and evaluating of possible fault scenarios. With the failure modes and effects analysis (FMEA), there is a standardized and proven method that is mainly used in product development and was significantly advanced in the aerospace, medical and automotive industries.

In the joint project „MFGeb – Methoden zur Fehlerdiagnose im Gebäudebetrieb“ (Methods for Fault Diagnosis in Building Operation), the FMEA was applied to different areas of the technical building equipment. With the temporal focus on the operating phase, various fault scenarios were examined for their fault symptoms and recorded in a standardized fault database.

On this basis, the Institut für Luft- und Kältetechnik gGmbH (ILK), the ifm Software GmbH and the Institut für bauwerksintegrierte Technologien (IBIT) at the Erfurt University of Applied Sciences jointly developed various fault diagnosis algorithms for building technology components and systems, which were then implemented in existing automation platforms. Individual fault scenarios were exemplarily simulated in test systems and metrologically examined for the development and validation of the FDD algorithms.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Problemstellung und Motivation	1
1.2	Stand der Forschung und Technik	6
1.3	Zielstellung und Vorgehensweise	9
2	Fehlermöglichkeiten- und Einflussanalyse (FMEA)	12
2.1	Nutzen und Ziele im Projekt	12
2.2	FMEA-Arten	15
2.3	Allgemeine Vorgehensweise	18
2.3.1	Die Arbeitsschritte der FMEA	19
2.3.2	Planung und Vorbereitung (Scoping)	20
2.3.3	Strukturanalyse	23
2.3.4	Funktionsanalyse	24
2.3.5	Fehleranalyse	27
2.3.6	Risikobewertung	30
2.3.7	Methoden zur Kritikalitätsbeurteilung	31
2.3.8	Risikoanalyse und Aufgabenpriorität	36
2.4	Fehlerdatenbank und FMEA-Modulbibliothek	41
2.5	Erarbeitung von Heizanlagenstrukturen in der FMEA	42
2.5.1	Grundstruktur der Heizung	42
2.5.2	Anforderungsebene	43
2.5.3	Heizungsanlage	44
2.5.4	Bestandteile der Heizungsanlage	45
2.5.5	Fehlernetze der Grundstruktur	47
2.6	Anwendung der Grundstruktur auf die Versuchsanlage	50
2.6.1	Elemente und Struktur der Versuchsanlage	50
2.6.2	Fehlernetze der Versuchsanlage	52
2.7	Risikoanalyse und FED-Möglichkeiten	54
2.7.1	Einleitung	54
2.7.2	Übergabe	54
2.7.3	Verteilung	55
2.7.4	Speicherung	56
2.7.5	Wärmeerzeugung	57
2.7.6	Druckhaltung	58
2.8	Erarbeitung von RLT-Anlagenstrukturen in der FMEA	58
2.8.1	FMEA-Grundstruktur der RLT-Anlage	58
2.8.2	Anforderungsebene	59
2.8.3	RLT-Anlage	60

2.8.4	Bestandteile der raumluftechnischen Anlage	62
2.8.5	Fehlernetze der Grundstruktur	67
2.9	Anwendung der Grundstruktur auf die Versuchsanlage	74
2.9.1	Elemente und Struktur der Versuchsanlage	74
2.9.2	Fehlernetze der Versuchsanlage.....	76
2.10	Risikobewertung und FED-Möglichkeiten	79
2.10.1	Einleitung.....	79
2.10.2	Zentrale Komponenten	79
2.10.3	Teilsystem betreffenden Komponenten	83
2.10.4	Teilbereich betreffenden Komponenten.....	83
2.11	Risikoanalyse Kälteanlage.....	84
3	Fehlererkennung und Diagnose (FED)	87
3.1	Vorgehen und Begrifflichkeiten	87
3.2	Eigenschaften von FED	89
3.3	FED-Methoden	90
3.3.1	Allgemein.....	90
3.3.2	Wissensbasierte Verfahren	91
3.3.3	Messdatenbasierte Verfahren	93
3.4	FED-Methoden in MFGeb.....	94
3.4.1	Allgemein.....	94
3.4.2	Standard und erweiterte Ausstattung	95
3.5	Messdatenerfassung und -Aufbereitung	96
3.6	Fehlererkennungsalgorithmen für Heizungstechnik.....	97
3.6.1	Einleitung.....	97
3.6.2	Fehlererkennung an den Heizflächen eines Raumes	98
3.6.3	Fehlererkennung durch die Heizkreis-Vorlauftemperatur	105
3.6.4	Fehlererkennung am 3-Wege-Misch-Ventil	108
3.6.5	Fehlererkennung am Speicher	119
3.6.6	Fehlererkennung anhand der Wärmepumpenspreizung	125
3.7	Fehlererkennungsalgorithmen Raumluftechnik.....	129
3.7.1	Einleitung.....	129
3.7.2	Klassifizierung des Betriebszustands	131
3.7.3	Fehlererkennung durch Wechsel der Regelungssequenzen	132
3.7.4	Fehlererkennung durch Abgleich Betriebszustand Ventilator mit Luftförderungszustand.....	133
3.7.5	Fehlererkennung durch Prüfung des statischen Drucks in der Luftleitung.....	138
3.7.6	Fehlererkennung an Zu- und Abluftklappen	144
3.7.7	Fehlererkennung durch Abgleich Betriebszustand der Lufterwärmungskomponente mit Lufterwärmungssequenz	153

3.7.8	Fehlererkennung durch Prüfung der Zulufttemperatur.....	158
4	Implementierung und Evaluierung der FED-Algorithmen _____	162
4.1	Versuchsreihen und FED für Kältetechnik	162
4.2	Implementierung in LabView	165
4.3	Automationsplattform ViciOne (IFM).....	167
4.3.1	Vorgehen im Projekt.....	167
4.3.2	Über die Automationsplattform ViciOne.....	169
4.3.3	FunctionBlock Creator.....	171
4.3.4	Structure Editor.....	176
4.3.5	Technische Umsetzung.....	187
4.3.6	Hemmnisse	192
4.3.7	Auswertung der Messreihen mit FED in Demonstrator/Feldtest.....	192
5	Fazit und Anknüpfungspunkte _____	194
6	Literaturverzeichnis _____	IX
Anhang	_____	XXI
A1	Anmerkungen zur Datenbasis aus der Literaturrecherche.....	XXI
A2	Fehlerbewertung.....	XXII
A4	Versuchsreihen.....	XLI
A5	Heizungs-Anlage	XLIV
A6	RLT-Anlage	CXIV

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1: Fehler nach Gewerken	3
Abbildung 1-2: Fehler nach Kategorie	3
Abbildung 1-3: Fehler nach Lebensphase	3
Abbildung 1-4: Fehler nach Erstellung und Nutzung.....	3
Abbildung 1-5: RLT-Fehler nach Anlagenteil	4
Abbildung 1-6: RLT-Fehler nach Komponenten.....	4
Abbildung 1-7: Heizungsfehler nach Anlagenteil	5
Abbildung 1-8: Kühlungsfehler nach Anlagenteil	5
Abbildung 1-9: Sanitärfehler nach Anlagenteil.....	6
Abbildung 1-10: Sanitärfehler nach Kategorie	6
Abbildung 2-1: allgemeine Zuliefererpyramide.....	13
Abbildung 2-2: Gegenüberstellung Produktentstehungs- und Lebenszyklus eines Gebäudes	14
Abbildung 2-3: Bearbeitungsprozess der FMEA	20
Abbildung 2-4: Beispiel Blockdiagramm.....	22
Abbildung 2-5: Beispiel Strukturbaum einer Beimisch-Schaltung für differenzdruckarme Verteiler oder WE ohne eigene Pumpe	24
Abbildung 2-6: Beispiel Funktionsnetz einer Beimisch-Schaltung für differenzdruckarme Verteiler oder WE ohne eigener Pumpe.....	26
Abbildung 2-7: Beispiel Parameterdiagramm eines Luftfilters.....	27
Abbildung 2-8: Mögliche Ausprägungen von Fehlfunktionen [AIAG & VDA (2019)] ...	28
Abbildung 2-9: Beispiel Fehlernetz einer Beimisch-Schaltung für differenzdruckarme Verteiler oder WE ohne eigener Pumpe	28
Abbildung 2-10: Fehlernetze und Fehlerketten in unterschiedlichen Betrachtungsebenen [AIAG & VDA (2019)]	29
Abbildung 2-11: Strukturbaum einer allgemeinen Heizungsanlage	42
Abbildung 2-12: Fehlernetz Heizungsanlage Grundstruktur: Anforderungsebene zu warm.....	47
Abbildung 2-13: Fehlernetz Heizungsanlage Grundstruktur: Anforderungsebene Kleiner Nutzerkreis zu kalt	48
Abbildung 2-14: Fehlernetz Heizungsanlage Grundstruktur: Anforderungsebene Nutzerkreis eines Teilsystems zu kalt.....	48
Abbildung 2-15: Fehlernetz Heizungsanlage Grundstruktur: Anforderungsebene Gesamter Nutzerkreis zu kalt.....	49
Abbildung 2-16: Fehlernetz Heizungsanlage Grundstruktur: Heizungsanlage Ineffizienz eines Teilbereichs.....	49
Abbildung 2-17: Fehlernetz Heizungsanlage Grundstruktur: Heizungsanlage Ineffizienz eines Teilsystems	50

Abbildung 2-18: Fehlernetz Heizungsanlage Grundstruktur: Heizungsanlage Ineffizienz Gesamtanlage	50
Abbildung 2-19: Schema Heizungsversuchsanlage.....	51
Abbildung 2-20: FMEA-Strukturbaum der Heizungsversuchsanlage	52
Abbildung 2-21: Strukturbaum einer allgemeinen RLT-Anlage	58
Abbildung 2-22: Fehlernetz RLT-Anlage Grundstruktur: Anforderungsebene Gesamter Nutzerkreis zu warm	67
Abbildung 2-23: Fehlernetz RLT-Anlage Grundstruktur: Anforderungsebene Nutzerkreis eines Teilsystems zu warm.....	68
Abbildung 2-24: Fehlernetz RLT-Anlage Grundstruktur: Anforderungsebene kleiner Nutzerkreis zu warm	68
Abbildung 2-25: Fehlernetz RLT-Anlage Grundstruktur: Anforderungsebene Gesamter Nutzerkreis zu kalt	69
Abbildung 2-26: Fehlernetz RLT-Anlage Grundstruktur: Anforderungsebene Nutzerkreis eines Teilsystems zu kalt.....	69
Abbildung 2-27: Fehlernetz RLT-Anlage Grundstruktur: Anforderungsebene Nutzerkreis eines Teilbereichs zu kalt.....	70
Abbildung 2-28: Fehlernetz RLT-Anlage Grundstruktur: Anforderungsebene Gesamter Nutzerkreis zu trocken	70
Abbildung 2-29: Fehlernetz RLT-Anlage Grundstruktur: Anforderungsebene Gesamter Nutzerkreis zu feucht	71
Abbildung 2-30: Fehlernetz RLT-Anlage Grundstruktur: Anforderungsebene Gesamter Nutzerkreis Abgestandene Raumluft	71
Abbildung 2-31: Fehlernetz RLT-Anlage Grundstruktur: Anforderungsebene Nutzerkreis eines Teilsystems Abgestandene Raumluft.....	72
Abbildung 2-32: Fehlernetz RLT-Anlage Grundstruktur: Anforderungsebene Nutzerkreis eines Teilbereichs Abgestandene Raumluft.....	72
Abbildung 2-33: Fehlernetz RLT-Anlage Grundstruktur: Anforderungsebene Gesamter Nutzerkreis verunreinigte Raumluft.....	72
Abbildung 2-34: Fehlernetz RLT-Anlage Grundstruktur: Anforderungsebene Nutzerkreis eines Teilsystems verunreinigte Raumluft	73
Abbildung 2-35: Schema RLT-Versuchsanlage	75
Abbildung 2-36: FMEA-Strukturbaum der RLT-Versuchsanlage	76
Abbildung 3-1: Allgemeiner Vorgang der Fehlererkennung und Diagnose	87
Abbildung 3-2: Allgemeiner Vorgang der Fehlererkennung und Diagnose	88
Abbildung 3-3: Anwendung der Regel zur Prüfung der Raumheizung: Raum zu kalt Raumheizung.....	102
Abbildung 3-4: Anwendung der Regel zur Prüfung der Raumheizung: Raum erwärmt über Raumsolltemperatur und Raumheizung ist aktiviert	103
Abbildung 3-5: Anwendung der Regel zur Prüfung der Raumheizung: Raum erwärmt sich trotz deaktivierter Raumheizung	104

Abbildung 3-6: Anwendung der Regel zur Prüfung der Vorlauftemperatur: Vorlauftemperatur zuerst zu warm und dann zu kalt.....	107
Abbildung 3-7: Vereinfachtes Schema der Heizungsanlage.....	109
Abbildung 3-8: Histogramm Stellsignalklasse 10	112
Abbildung 3-9: Histogramm Stellsignalklasse 9	112
Abbildung 3-10: Histogramm Stellsignalklasse 6	112
Abbildung 3-11: Histogramm Stellsignalklasse 5	112
Abbildung 3-12: Histogramm Stellsignalklasse 3	112
Abbildung 3-13: Histogramm Stellsignalklasse 0	112
Abbildung 3-14: Anwendung der Regel zur Prüfung eines 3-Wege-Misch-Ventils: Tor A komplett geschlossen	116
Abbildung 3-15: Anwendung der Regel zur Prüfung eines 3-Wege-Misch-Ventils: Tor A zu 50% geschlossen	117
Abbildung 3-16: Anwendung der Regel zur Prüfung eines 3-Wege-Misch-Ventils: Tor komplett geöffnet	118
Abbildung 3-17: Anwendung der Regel zur Prüfung der Speichertemperatur: Temperatur in Entnahmeebene zu kalt	123
Abbildung 3-18: Anwendung der Regel zur Prüfung der Speicherladung und Entladung: Fehler der Speicherladung.....	124
Abbildung 3-19: Anwendung der Regel zur Prüfung der Speicherladung und Entladung: Fehler der Speicherladung.....	125
Abbildung 3-20: Anwendung der Regel zur Prüfung der Temperaturspreizung auf Wärmequellenseite: Förderleistung der Solepumpe zu klein.....	127
Abbildung 3-21: Anwendung der Regel zur Prüfung der Temperaturspreizung auf Wärmesenkenseite: Förderleistung der Wärmesenken-Pumpe zu groß 128	
Abbildung 3-22: Anwendung der Regel zur Prüfung der Temperaturspreizung auf Wärmesenkenseite: Förderleistung der Wärmesenken-Pumpe zu klein 129	
Abbildung 3-23: Regelungssequenzen der Luftheizung	131
Abbildung 3-24: Regelungssequenzen der Luftheizung	133
Abbildung 3-25: Anwendung Regel 2: Ausfall des ZUL-Ventilators im Lüftungsbetrieb 135	
Abbildung 3-26: Anwendung Regel 2: Eingeschalteter ZUL-Ventilator im nicht Lüftungsbetrieb	136
Abbildung 3-27: Anwendung Regel 2: Ausfall des ABL-Ventilators im Lüftungsbetrieb 137	
Abbildung 3-28: Anwendung Regel 2: Eingeschalteter ABL-Ventilator im nicht Lüftungsbetrieb	138
Abbildung 3-29: Anwendung Regel 3: Stellsignal ZUL-Ventilator im Lüftungsbetrieb zu klein	140

Abbildung 3-30: Anwendung Regel 3: Stellsignal ZUL-Ventilator im Lüftungsbetrieb Außenluftklappe ist geschlossen	141
Abbildung 3-31: Anwendung Regel 3: Stellsignal ABL-Ventilator im Lüftungsbetrieb zu groß	142
Abbildung 3-32: Anwendung Regel 3: Stellsignal ABL-Ventilator im Lüftungsbetrieb zu klein	143
Abbildung 3-33: Übersicht Druckverhältnisse Zuluftseite.....	145
Abbildung 3-34: Übersicht Druckverhältnisse Abluftseite	147
Abbildung 3-35: Anwendung Regel 4: ZUL-Klappe teilweise geschlossen	150
Abbildung 3-36: Anwendung Regel 4: ZUL-Klappe zu weit geöffnet	151
Abbildung 3-37: Anwendung Regel 4: ABL-Klappe im Lüftungsbetrieb zu weit geöffnet 152	
Abbildung 3-38: Anwendung Regel 5: Mischluftkammer ist nicht deaktiviert	156
Abbildung 3-39: Anwendung Regel 5: Luftherhitzer ist nicht aktiviert	157
Abbildung 3-40: Anwendungen Bedingungen zur Prüfung der Zulufttemperatur auf Beispielhafte Temperaturverläufe	159
Abbildung 3-41: Anwendung Regel 6: Zulufttemperatur zu kalt	160
Abbildung 3-42: Anwendung Regel 6: Zulufttemperatur zu warm.....	161
Abbildung 4-1: Schematische Darstellung des Aufbaus des Kältesystems	162
Abbildung 4-2: Foto der Inneneinheit des Kältesystems mit Messtechnikausstattung 163	
Abbildung 4-3: Foto der Außeneinheit des Kältesystems mit Sensorik.....	164
Abbildung 4-4: Grundlegender Aufbau eines Funktionsblocks	172
Abbildung 4-5: Auflistung aller Funktionsblöcke einer Konfiguration	177
Abbildung 4-6: Der File-Dialog des Structure Editors	178
Abbildung 4-7: Reiter Cluster Nodes des Structure Editors	178
Abbildung 4-8: Dialog zum Erstellen eines neuen Cluster Nodes.....	179
Abbildung 4-9: Logging Wizard für SQL-Datenbank.....	180
Abbildung 4-10: Katalogimport aus einer bestehenden Konfiguration	181
Abbildung 4-11: Die Eigenschaften (Properties) eines Funktionsblocks.....	183
Abbildung 4-12: Eine 1 zu n Beziehung zwischen Funktionsblöcken	184
Abbildung 4-13: Verwendung mehrerer Eingangssignale (PoolingMode).....	184
Abbildung 4-14: Übersicht der Published Connectors)	185
Abbildung 4-15: Beispielstruktur zur Verwendung von Containern	186
Abbildung 4-16: Darstellung eines Containers im Structure Editor	186
Abbildung 4-17: Überblick über den Reiter Configuration des FunctionBlock Creators 187	
Abbildung 4-18: Einordnung der Kataloge bezüglich ihres Namespaces im Structure Editor	188
Abbildung 4-19: Überblick über den Reiter Input / Output Connectors des FunctionBlock Creators.....	190
Abbildung 4-20: Grundgerüst eines Funktionsblocks im FunctionBlock Creator.....	191

Tabellenverzeichnis

Tabellenverzeichnis	XIV
Tabelle 1-1: Für die Datenauswertung verwendeten Kategorisierung	2
Tabelle 2-1: Legende Quadrupel	22
Tabelle 2-2: Bewertung Energie- und Kraftübertragung	23
Tabelle 2-3: Beispiel Schnittstellenmatrix	23
Tabelle 2-4: Beispiel Schnittstellenmatrix	38
Tabelle 2-5: Funktion, Anforderungen und Fehlfunktionen der Anforderungsebene	43
Tabelle 2-6: Funktion, Anforderungen und Fehlfunktionen der Heizungsanlage	44
Tabelle 2-7: Funktion, Anforderungen und Fehlfunktionen der Übergabe	45
Tabelle 2-8: Funktion, Anforderungen und Fehlfunktionen der Verteilung.....	46
Tabelle 2-9: Funktion, Anforderungen und Fehlfunktionen der Speicherung.....	46
Tabelle 2-10: Funktion, Anforderungen und Fehlfunktionen der Wärmebereitstellung	47
Tabelle 2-11: Funktion, Anforderungen und Fehlfunktionen der Anforderungsebene	59
Tabelle 2-12: Funktion, Anforderungen und Fehlfunktionen der Anforderungsebene	60
Tabelle 2-13: Funktion, Anforderungen und Fehlfunktionen der Übergabe	63
Tabelle 2-14: Funktion, Anforderungen und Fehlfunktionen der Verteilung.....	63
Tabelle 2-15: Funktion, Anforderungen und Fehlfunktionen der Luftförderung.....	64
Tabelle 2-16: Funktion, Anforderungen und Fehlfunktionen der Konditionierungselemente	64
Tabelle 2-17: Funktion, Anforderungen und Fehlfunktionen der Wärmerückgewinnung	66
Tabelle 2-18: Einordnung der Bedeutung oder Schwere der Fehlerfolge für Kälteanlagen.....	84
Tabelle 2-19: Einordnung der Auftretenswahrscheinlichkeit der Ursache für Kälteanlagen.....	85
Tabelle 2-20: Einordnung der Entdeckenswahrscheinlichkeit für Kälteanlagen.....	86
Tabelle 3-1: Einteilung der FED-Verfahren.....	90
Tabelle 3-2: Erprobte Regeln und erkennbare Fehler in der Heizungstechnik	97
Tabelle 3-3: Berechnung der Verteilervorlauftemperatur mit gemittelten Mischungsverhältnissen	110
Tabelle 3-4: Berechnung der Verteilervorlauftemperatur mit gemittelten Mischungsverhältnissen und Tiefenpassfilter	110
Tabelle 3-5: Stellsignalklassen und ihre Häufigkeit im Messzeitraum.....	111
Tabelle 3-6: Arithmetische Mittelwerte und Varianzen der Stellsignalklassen	113
Tabelle 3-7: Sollwerte und Grenzwerte der Spreizung über die Wärmepumpe	126

Tabelle 3-8:	Erprobte Regeln und erkennbare Fehler in der Raumluftechnik	130
Tabelle 3-9:	Zuordnung Stellsignale zur Regelungssequenz der Luftheizung	132
Tabelle 3-10:	Grenzwerte zur Fehlererkennung mit Regel 2	134
Tabelle 3-11:	Referenzgrößen der Ventilatoren zur Fehlererkennung mit Regel 4.	148
Tabelle 3-12:	Anwendung Bedingungen der Regel 5 in Abhängigkeit von Regelsequenz und Komponente.....	155
Tabelle 3-13:	Komponentenspezifische Grenzwerte zu Fehlererkennung mit Regel 5	155
Tabelle 4-1:	Technische Daten des verwendeten Systems	163
Tabelle 4-2:	Sensorausstattung der Modellanlage Kältetechnik	164
Tabelle 4-3:	Kälteprozess der Anlage im Log p-h Diagramm für einen Betriebszustand	165
Tabelle 4-4:	Visualisierungsoberfläche der Erprobungssoftware in LabView	166
Tabelle 4-5:	Meldungen aus der Software zur Erprobung der Algorithmen zur Fehlererkennung und Bewertung.....	167
Tabelle 4-6:	Modulübersicht Automation Suite	170
Tabelle 4-7:	Legende Aufbau Funktionsblock.....	172
Tabelle 4-8:	Legende Aufbau Funktionsblock.....	173
Tabelle 4-9:	Pooling-Modi.....	174

1 Einleitung

1.1 Problemstellung und Motivation

Gebäude sind aufgrund ihrer enormen technischen Komplexität besonders anfällig für eine Vielzahl von Fehlermöglichkeiten. Unbemerkt können diese zu erhöhten Energieverbräuchen und somit zu erhöhten Betriebskosten und CO₂-Emissionen sowie einer Einschränkung des Nutzerkomforts führen. Auch nach der Inbetriebnahme- und Optimierungsphase muss daher der optimierte und fehlerfreie Betrieb über den gesamten Lebenszyklus sichergestellt werden. Durch den Einsatz einer automatisierten Betriebsüberwachung kann die Entdeckungswahrscheinlichkeit fehlerhafter Betriebszustände deutlich erhöht und der energieeffiziente Betrieb der Anlage auch auf längere Sicht sichergestellt werden. Voraussetzung hierfür sind Algorithmen, mit deren Hilfe aus gebündelten Informationen wie bspw. Messwerten, historische Messdaten, Betriebszustände und Regelparameter fehlerhafte Zustände detektiert werden können.

In der Praxis zeigt sich allerdings oftmals, dass Systeme zur Fehlererkennung und -protokollierung meist nur proprietär im Bereich einzelner technischer Komponenten oder zur Überwachung sicherheitsrelevanter Funktionen eingesetzt werden. Hierbei bleiben vor allem Fehler, die bei dem Zusammenwirken der einzelnen technischen Teilsysteme im Gebäude auftreten und keine für den Nutzer "fühlbare" Einschränkung der thermischen Komfortkriterien zur Folge haben unentdeckt. Weiterhin werden auch die Potentiale der Gebäudeautomation bzw. der Gebäudeleittechnik mit der Möglichkeit alle Informationen im Gebäude zu bündeln und über geeignete FED-Methoden auszuwerten vielmals ungenutzt.

Werden fehlerhafte Betriebszustände erkannt, so folgt als nächste Herausforderung die Suche nach der Fehlerursache. Dies ist gerade bei komplexen Gebäuden mit einem sehr hohen zeitlichen und personellen Aufwand verbunden, was meist zu einem schlechten Kosten-Nutzen-Verhältnis der Fehlerdiagnosemaßnahmen führt. Der mögliche negative Effekt liegt darin, dass eher die Fehlerauswirkungen kompensiert werden als die Fehlerursache zu beseitigen. Voraussetzung für die manuelle Fehlerdiagnose ist weiterhin eine detaillierte Systemkenntnis was zumeist durch mangelhafte Anlagendokumentationen ohne einheitlichen Standard, unvollständigen Revisionsunterlagen oder nicht qualifiziertes technisches Personal erschwert wird. Dies sind einige Gründe, welche zu einer stetigen Verschlechterung der Energieeffizienz von Bestandsanlagen aufgrund nicht vorhandener Betriebsüberwachung und ungenügender Fehlervermeidung führen können. Durch den Einsatz von Systemen und Methoden, die nicht nur zur automatisierten Detektion von Fehlerzuständen, sondern vielmehr zur Eingrenzung der eigentlichen Fehlerursachen bis hin auf die Ebene der einzelnen technischen Komponenten im Gebäude dienen sollten, kann unter Berücksichtigung der

zuvor genannten Faktoren die Fehlerhäufigkeit minimiert werden. Voraussetzung für die Entwicklung der hierfür notwendigen Fehlerdiagnosealgorithmen ist es, bereits im Vorfeld eine breite Wissensbasis über mögliche Fehlerzustände im Gebäude, deren Auswirkungen und der damit verbundenen spezifischen Fehlersymptomatik zu erarbeiten.

Im nachfolgenden Abschnitt soll hierfür ein Überblick der Ergebnisse einer Querauswertung von verschiedenen Forschungsberichten und Monitoringprojekten gegeben werden. Die in den Literaturquellen genannten Fehler wurden in einer Datenbank erfasst und nach verschiedenen Kategorien eingeteilt. Ziel war es eine erste Einordnung zum Vorkommen und Auftreten häufiger Fehlerereignisse aufzuzeigen. Die nachfolgende Tabelle gibt für die Datenauswertung einen Überblick der verwendeten Kategorisierung.

Tabelle 1-1: Für die Datenauswertung verwendeten Kategorisierung

Gewerk	Anlagenteil	Lebensphase	Fehlerkategorie
RLT	Übergabe	Gebäudebetrieb	Defekt von Subsystemen
Heizung	Verteilung	Wartung und Instandhaltung	Fehlerhafte Einstellungen
Kältetechnik	Erzeugung	Inbetriebnahme	Hydraulischer Abgleich mangelhaft
MSR	Konditionierung (RLT)	Ausführung	Installationsfehler
Sonstiges	WRG (RLT)	Planung	Planungsfehler

Als Quelle der aufgeführten Fehler dienten 65 Dokumente. 16 Dokumente sind Forschungsberichte, Dissertationen oder Bücher, die sich allgemein mit Fehlern in gebäudetechnischen Anlagen auseinandersetzen. Die übrigen 49 Dokumente sind Berichte zu Monitoring-Projekten. Weitere Anmerkungen zur Datenbasis und Zuordnung der Fehlerzustände befinden sich am Ende des Kapitels und im Anhang A1.

Insgesamt wurden 959 Fehler auf Grundlage der Recherche erfasst. Abbildung 1-1 stellt eine Zuordnung der aufgelisteten Fehler nach Gewerken dar. Die meisten Fehler konnten den Gewerken RLT, Heizung und MSR zugeordnet werden. Dieser Umstand kann damit erklärt werden, dass die meisten Untersuchungsobjekte hinsichtlich dieser Gewerke untersucht wurden. Auch sind die Anlagen der genannten Gewerke meist relativ komplex, was zu einem größeren Fehlerpotential führt. In Abbildung 1-2 ist die Zuordnung der Fehler zu den einzelnen Kategorien zu sehen. Die meisten Fehler lassen sich auf defekte Komponenten und falsche Einstellungen der MSR-Technik zurückführen. Die Kategorie Planung bezieht sich auf die Komponentendimensionierung. Diese Kategorie tritt am seltensten auf. Fehler der Kategorie Installation und Hydraulischer Abgleich sind ebenfalls selten – wobei Fehler durch einen mangelhaften Abgleich durch die Komplexität einer Anlage schwerer eingegrenzt werden können (Volumenstrommessung in Anlagen selten) und weniger oft auffallen, wenn die Nutzerübergabe irgendwie „funktioniert“.



Abbildung 1-1: Fehler nach Gewerken

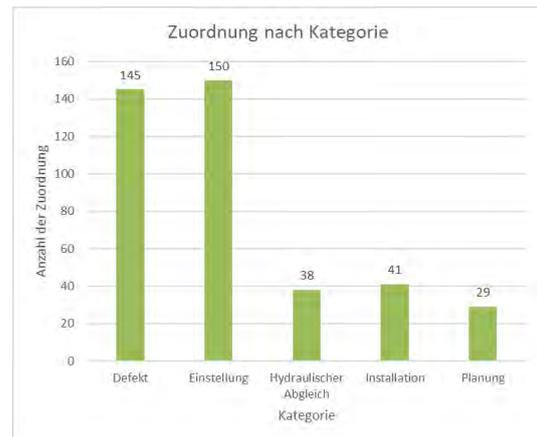


Abbildung 1-2: Fehler nach Kategorie

Abbildung 1-3 stellt die Zuordnung zu den Lebensphasen einer Anlage dar. Das mögliche Entstehen von Fehlern in den einzelnen Lebensphasen einer Anlage ist relativ ausgewogen. Jedoch war bei einem großen Teil der recherchierten Fehler nicht möglich diesen nur einer Lebensphase zuzuordnen.



Abbildung 1-3: Fehler nach Lebensphase

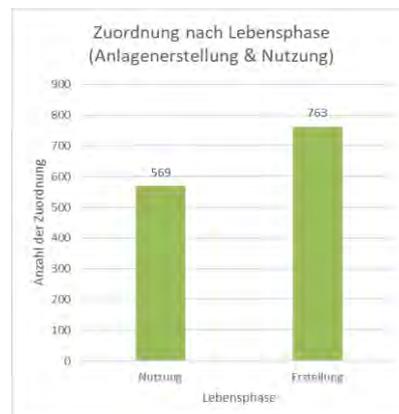


Abbildung 1-4: Fehler nach Erstellung und Nutzung

In Abbildung 1-4 werden die Lebensphasen Inbetriebnahme, Ausführung und Planung zur Phase Anlagenerstellung und die Lebensphasen Gebäudebetrieb und Wartung zur Phase Anlagennutzung zusammengefasst. Es treten mehr Fehler durch eine mangelhafte Anlagenerstellung als durch die Anlagennutzung auf.

Im Gewerk RLT wurden 443 Fehlerzustände erfasst. Bei 243 wurde die Fehlerursache in der MSR-Technik ermittelt. In Abbildung 1-5 ist die Zuordnung der Fehler zu den Anlagenteilen zu sehen. Der überwiegende Teil der Fehler ist im Bereich der Verteilung

zu finden, gefolgt von der Konditionierung. Es lässt sich festhalten, dass mit steigender Komplexität eines Systems auch die Fehlerhäufigkeit zunimmt.

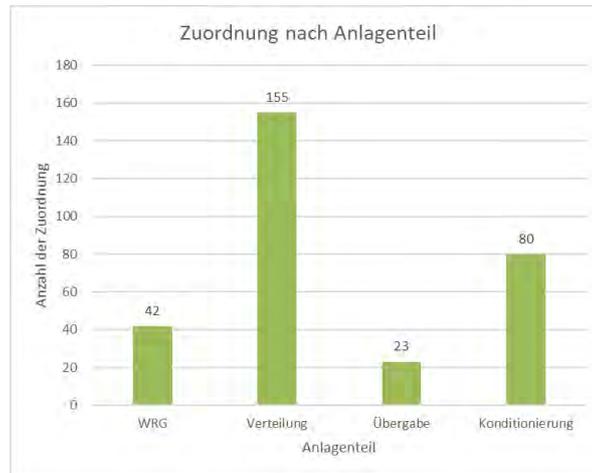


Abbildung 1-5: RLT-Fehler nach Anlagenteil

In Abbildung 1-6 folgt eine Zuordnung der Fehler zu wichtigen Komponenten. Die meisten Fehler konnten Ventilatoren zugeordnet werden. Weiterhin konnte der Komponente Luftherhitzer viele Fehler zugeschrieben werden. Klappen kommen in den Anlagenteilen WRG und Verteilung vor. Sie weisen die drittmeisten eindeutigen Zuordnungen auf. Komponenten die häufig in RLT-Anlagen vorkommen, werden daher vermutlich auch öfter untersucht, als beispielweise Luftkühler.

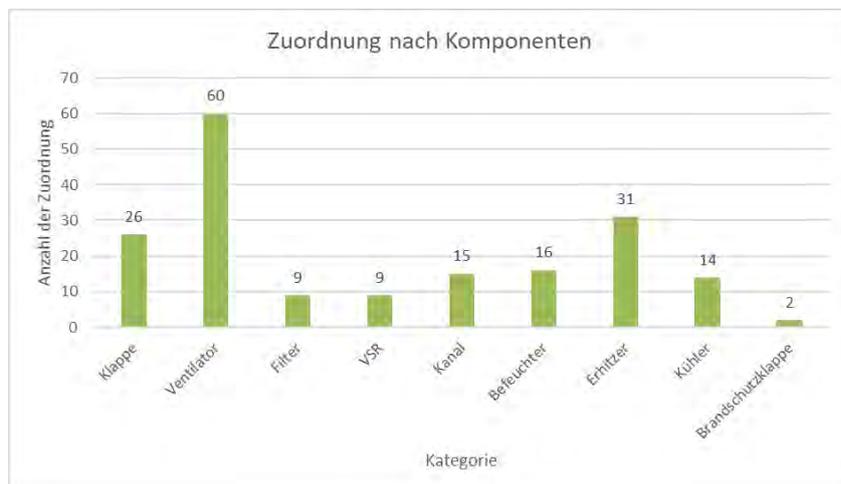


Abbildung 1-6: RLT-Fehler nach Komponenten

Die Verteilung der Fehlerzustände nach Fehlerkategorie und Lebensphase im Gewerk RLT ist vergleichbar mit der Gesamtbetrachtung (siehe Abbildung 1-2 bis Abbildung 1-4). Im Gewerk Heizung wurden insgesamt 520 Fehler erfasst. Bei 251 Fehlern wurde eine Ursache in der MSR-Technik genannt. Viele Fehler können dem Anlagenteil Erzeugung

zugeordnet werden (siehe Abbildung 1-7). Dies liegt unter anderem daran, dass sich die Quellen [Bonin (2018)] und [Hyvfirinen et. al. (1996)] recht intensiv mit Wärmeerzeugungsanlagen beschäftigt haben. Von den 230 Fehlern im Gewerk Kühlung sind 230 Fehler aufgenommen worden. 119 davon konnte eine Ursache in der MSR-Technik nachgewiesen werden. Eine Zuordnung der Kühlungsfehler zum entsprechenden Anlagenteil erfolgt in Abbildung 1-8. Der Anlagenteil Verteilung weist die größte Fehlerhäufigkeit.

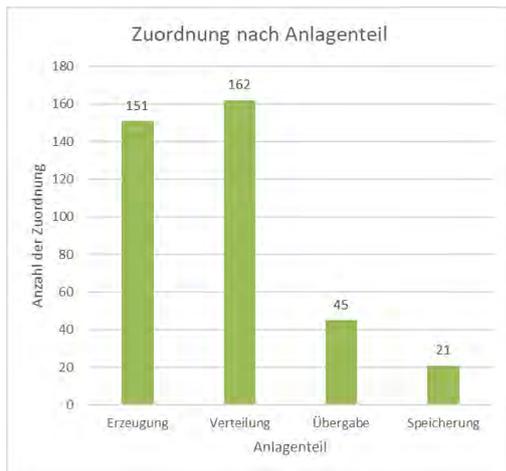


Abbildung 1-7: Heizungsfehler nach Anlagenteil

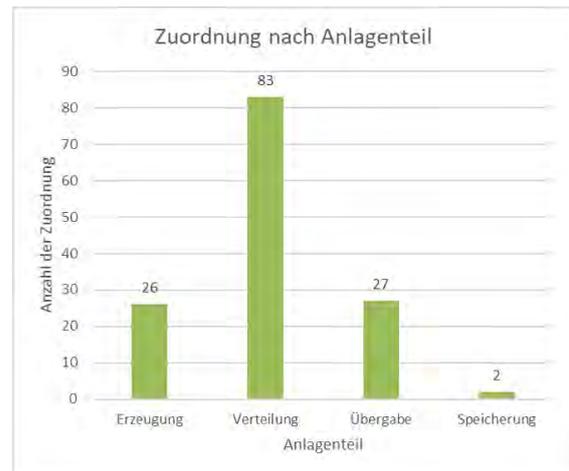


Abbildung 1-8: Kühlungsfehler nach Anlagenteil

Der vorwiegende Teil der Fehler im Bereich Kältetechnik kann der Pumpe zugeordnet werden (41). Die Gesamtheit der Ventile hat 18 und die Komponentengruppe Rückschlagventile 4 Fehler. Kondensatoren wurden 6 Fehler zugeteilt. Eine weitere Auflistung der Unterteilung scheint auf Grund der kleinen Datenbasis und Verschiedenheit der betrachteten Anlagen nicht sinnvoll. Die Zuordnungen zu den Fehlerkategorien, Lebensphasen sowie nach Anlagenerstellung und Nutzung sind ähnlich wie in den anderen Gewerken.

Für das Gewerk Sanitär wurden insgesamt 89 Fehler erfasst, wovon bei 44 Fehlern die Ursache in der Mess- Steuer- und Regelungstechnik zu finden war. Die Meisten Fehler konnten ebenfalls der Verteilung zugeordnet werden. Der Anlagenteil Erzeugung umfasst in diesem Gewerk die Warmwasserbereitung und hat eine Zuweisung von 7 Fehlern. Weitere Anlagenteile mit 1 bis 3 Fehlern sind Abwasser, Speicherung und Aufbereitung. Die Zuordnung ist in Abbildung 1-9 dargestellt.

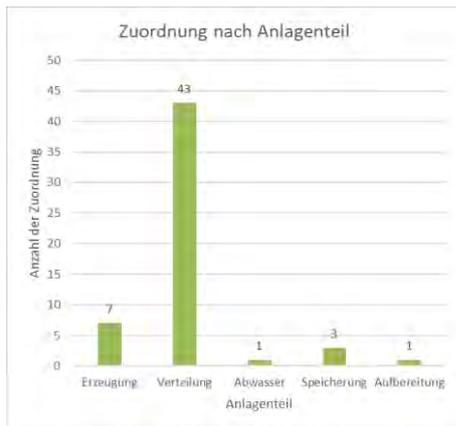


Abbildung 1-9: Sanitärfehler nach Anlagenteil



Abbildung 1-10: Sanitärfehler nach Kategorie

Bezogen auf die Anlagenkomponenten weist die Komponente Pumpe die meisten Zuordnungen auf (18). An zweiter Stelle kommt die Gruppe der Ventile (13). In der Zuordnung nach Fehlerkategorien zeigt sich ein kleinerer Anteil an Fehlern die eindeutig auf eine falsche Einstellung der MSR-Technik zurückzuführen sind, als in den zuvor betrachteten Gewerken (Abbildung 1-10). Dies liegt wahrscheinlich an den geringeren Automationsgrad. Die Fehlerzuordnung nach Lebensphase sowie nach Anlagen-erstellung und Nutzung ist den bereits betrachteten Gewerken ähnlich.

Anmerkungen zur Datenbasis und Zuordnung sind dem Anhang A1 zu entnehmen.

1.2 Stand der Forschung und Technik

Methoden der präventiven Qualitätssicherung werden in der Industrie häufig angewendet. Diese zielen vorrangig auf die Phase der Produktentwicklung sowie die Betrachtung der Herstellungsprozesse von Produkten ab. Beispiele dafür sind die Quality Function Deployment (QFD), die Fault Tree Analysis (FTA) und die Failure Mode and Effects Analysis (FMEA, Fehler-Möglichkeiten- und Einflussanalyse). Das Ergebnis dieser meist sehr komplexen und zeitaufwendigen Analysen ist eine umfangreiche Dokumentation über mögliche Fehlerereignisse und eine gesamtheitliche Risikobewertung unter Berücksichtigung von Ursachen und Auswirkungsbeziehungen. Diese Informationen können zur Schärfung des Anforderungsprofils einer automatisierten Betriebsüberwachung mit einem einhergehenden technischen Monitoring genutzt werden.

Die FMEA wurde 1959/60 für das amerikanische Raumfahrtprogramm entwickelt. In Deutschland findet sie seit den 1980er Jahren Anwendung. Die Methodik wurde insbesondere durch die Automobilindustrie und die Deutsche Gesellschaft für Qualität

e.V. weiterentwickelt. Das Ziel der FMEA besteht darin, potentielle Fehler bei der Entwicklung eines Produktes bzw. bei der Prozessplanung bereits während der Produktplanung aufzudecken und durch geeignete Maßnahmen zu vermeiden. Im Bereich der Automobilindustrie und dem 2019 erschienene FMEA-Handbuch der Automotive Industry Action Group (AIAG) und dem Verband der Automobilindustrie (VDA) [AIAG & VDA (2019)] wird zwischen Design-FMEA, Prozess-FMEA und der neu eingeführten FMEA für Monitoring & Systemreaktion unterschieden.

Im Gegensatz zu anderen Industriezweigen besteht beim System Gebäude erschwerend die Situation, dass es keinen Gesamtproduktverantwortlichen gibt. Die Verantwortung in den Phasen Planung, Errichtung und Betrieb ist wesentlich differenzierter verteilt. Mehrere Akteure sind verantwortlich tätig, und oft besteht ein Bruch der Informationen beim Übergang zum Gebäudebetrieb.

Im Forschungsprogramm Energieoptimiertes Bauen (EnOB) des Bundesministeriums für Wirtschaft werden Energiekonzepte für Nichtwohngebäude entwickelt und realisiert mit dem Ziel, einen besonders energiesparenden Betrieb zu erreichen. Diese Demonstrationsvorhaben werden in einer mindestens zweijährigen Messphase validiert. Im Verlauf der mehrjährigen Begleitforschung des Forschungsprogramms wurde festgestellt, dass alle Gebäude mit ihren Anlagen eine etwa zweijährige Einfahrphase benötigen. In diesen Forschungsprojekten wurde immer wieder deutlich, dass es durch Ausfall von kleinen Baugruppen (Ventile, Rückschlagklappen, Sensoren, Aktoren, ...) oder durch fehlerhafte Installation (falsch platzierte Sensoren, falsche Verkabelung, falsche oder fehlerhafte Baugruppen, ...), fehlerhafte Funktionen der Steuerung und Regelung (z. B. gleichzeitiges Heizen und Kühlen), fehlende Funktionen, Planungsfehler usw. zu einem wesentlich erhöhten Energieverbrauch und zu erhöhtem Instandhaltungsaufwand kommt. Die Tatsache an sich und die Ursachen konnten in den Projekten nur durch erhöhten Personalaufwand und ein umfangreiches technisches Monitoring im Rahmen der wissenschaftlichen Begleitforschung ermittelt werden. Eine automatisierte Erkennung von Fehlern existierte meist nicht. Gleichzeitig wurde auch deutlich, dass bereits bekannte Methoden der Überwachung bzw. Steuerung und Regelung für einen energetisch günstigen Betrieb nicht realisiert wurden. Als Konsequenz wurden mehrere Forschungsvorhaben initiiert, und der Forschungsschwerpunkt EnBOP (energetische Betriebsoptimierung) entwickelt.

Der Qualitätssicherung für kälte- und raumluftechnische Anlagen wurde verstärkt Aufmerksamkeit gewidmet. Dazu wurde in den USA das Commissioning von RLT-Anlagen etabliert, welches eine umfassende Qualitätskontrolle aller Einzelprozesse der Planung, der Errichtung und der Inbetriebnahme umfasst [ASHRAE(2005)], [ASHRAE(2006)], [ASHRAE(2007)]. Die Entwicklung des Commissioning wurde von der Internationalen Energieagentur (IEA) aufgegriffen und im Annex 40 verallgemeinernd bearbeitet /ANNEX40/. Die Arbeiten werden im Annex 47 (Commissioning of Existing and Low Energy Buildings) weitergeführt. In Deutschland wurden dazu mehrere

Forschungsvorhaben zur Qualitätssicherung und Betriebsoptimierung durchgeführt bspw. [OASE(2005)], [OASE(2008-1)], [OASE(2008-2)], [OASE(2007)]. In diesen Forschungsprojekten wurde das sich international entwickelnde Commissioning in die Planungslandschaft Deutschlands übertragen und zur Funktionalen Qualitätssicherung (FQS) weiterentwickelt. Dazu wurde die Methodik der Betriebsdiagnose entwickelt und exemplarisch erprobt. Ziel der FQS ist die Sicherung der Qualität bei der Gewährleistung der Nutzeranforderungen (Behaglichkeit) wie auch der energetischen Effizienz. Gegenstand ist sowohl die Planungs-, die Errichtungs- und die Betriebsphase als auch die kontinuierliche Verbesserung der Funktionen im Betrieb. Der Schwerpunkt liegt hier auf der modellgestützten Analyse im Vergleich zum realen Objekt.

In den Forschungsprojekten [OASE(2005)], [OASE(2008-1)], [OASE(2008-2)] und [OASE(2007)] wurden Betriebsmustermatrizen, ausgehend von theoretischen Untersuchungen und Simulationen, entwickelt die als Maßstab für gemessene Betriebsmuster dienen und so Schlussfolgerungen auf Abweichungen vom geforderten Sollzustand ermöglichen und Ursachen für diese Abweichungen aufzeigen. Entsprechend können Maßnahmen eingeleitet werden, um die Fehler/Abweichungen zu beseitigen. Diese funktionale Qualitätssicherung durch das Erstellen von Betriebsmustern zwingt auch die beteiligten Planer zur Berücksichtigung von Teillastzuständen und die damit in Zusammenhang stehenden Abhängigkeiten der Anlagen und energetischen Größen und somit zur Abkehr von der alleinigen Betrachtung von Auslegungszuständen. Damit wird eine stärkere Berücksichtigung der Gesamtfunktion der technischen Gebäudeausrüstung erzwungen. Zur Realisierung einer übergreifenden Verantwortung wird die Einsetzung eines Unabhängigen, einer von den Bauherren verschiedene Person vorgeschlagen, die die notwendigen Betriebsstrategien entwickelt und deren Implementierung durchsetzt sowie die beteiligten Planer und Bauunternehmen zur notwendigen Qualitätssicherung zwingt.

Aufbauend auf den EnBOP Projekten setzte sich das Forschungsprojekt ModQS die Qualitätssicherung des energetischen Gebäudebetriebs zum Ziel [ModQS(2014)]. Das Unternehmen ennovatis-Energiemanagement Systeme als ModQS Projektpartner hat durch ein Förderprojekt des BMWi mit der Bezeichnung Smartmodule ein Gerät zur Verbrauchsdatenerfassung und -auswertung entwickelt. Es wird beschrieben, dass unter Verwendung dieser Daten in Verbindung mit Simulationsmodellen, auf Fehlerzustände geschlossen werden kann (vgl. [KENWO(2007)] und [Smartmodule(2008)]). Diese modellbasierte Fehlererkennung stützt sich auf die Ergebnisse der Forschungsprojekte [COURAGE(2002)] und [BEWAHREN(2004)] sowie die Zwischenergebnisse des bereits genannten Projektes [ModQS(2014)]. In allen genannten Projekten werden die Bereiche Fehlererkennung und Fehlerdiagnose differenziert aufgeführt. In dem Bereich der Fehlererkennung sollen mithilfe eines Comperators, welcher verschiedene Performance Indices des realen und simulierten Prozesses miteinander vergleicht, fehlerhafte Betriebszustände der Anlage erkannt werden. Im zweiten Schritt, dem Bereich der Fehlerdiagnose, soll mithilfe fehlerspezifischer Symptome die Fehlerursache eingegrenzt

werden [COURAGE(2002)], [KENWO(2007)], [BEWAHREN(2004)]. In [COURAGE(2002)] wurde hierzu exemplarisch für eine raumluftechnische Anlage eine Fehler-Symptom-Matrix aufgeführt. Für die Ableitung dieser Symptome ist eine genaue Kenntnis über den Aufbau und die Funktion der Anlagentechnik sowie die physikalischen und technischen Prozessabläufe notwendig. Dies setzt außerdem ein umfangreiches Expertenwissen voraus. Entscheidend für die Isolierung eines Fehlers ist dabei die Kenntnis über die Auswirkungen im technischen System. Welche regelungsbedingten Systemreaktionen werden hervorgerufen und welche Systemgrößen eignen sich für die Identifizierung von spezifischen Symptomen. Beim Forschungsvorhaben Energie-Navigator [Fisch(2013)] wurde untersucht, über Funktionen und statistische Auswertung auf fehlerhafte Betriebszustände zu schließen.

1.3 Zielstellung und Vorgehensweise

Die Zielstellung im Forschungsprojekt MFGeb lag bei der Entwicklung und Evaluierung von Fehlerdiagnosealgorithmen für den Einsatz in der technischen Gebäudeausrüstung. Die Teilaufgaben gliederten sich in die folgenden drei Themenkomplexe:

1. theoretische Fehlerbetrachtung im Gebäude mit dem Fokus auf der technischen Gebäudeausrüstung und Betriebsphase
2. Entwicklung von Algorithmen zur Fehlererkennung und -diagnose
3. Implementierung und Evaluierung der Fehlererkennungsalgorithmen in Versuchsanlagen

Für die theoretische Fehlerbetrachtung sollte eine modulare Strukturierung entwickelt werden, die es einerseits erlaubt, eine Vielzahl von Varianten der technischen Ausprägung abzudecken, und andererseits offen ist für zukünftige Erweiterungen. Ziel war es das System Gebäude in einer einheitlichen Struktur darzustellen und unter dem Aspekt der Fehlererkennung zu untersuchen. Durch die Analyse und Strukturierung soll es möglich sein Potentiale der Gebäudeautomation aufzudecken und in Bestands- und Neuanlagen effizienter zu nutzen. Für die dazu erforderliche intelligente Auswertung ggf. vorhandener bzw. zu erweiternder Datenpunkte im Gebäude (bspw. Messgrößen, Regelparameter usw.) sollten spezielle Abfragealgorithmen entwickelt werden, welche zur Detektion fehlerhafter Betriebszustände sowie zur Diagnose und Eingrenzung der möglichen Fehlerursache dienen. Als Grundlage für die Erstellung dieser Algorithmen wurden die strukturellen und funktionalen Beschreibung der Anlagentechnik, die Aufnahme möglicher Fehlerzustände sowie deren Symptomatik, die Erarbeitung von Fehlerdiagnosealgorithmen sowie deren anschließenden Implementierung in die Gebäudeleittechnik behandelt. Dabei wurden bereits vorhandene Methoden wie die Fehlermöglichkeiten- und Einflussanalyse sowie die Fehlerbaumanalyse (engl. Fault-Tree-Analysis - FTA) als wesentliche Teilschritte integriert.

Mithilfe der gewerkübergreifenden Fehlerbetrachtung im Gebäude können entsprechende Anforderungsprofile an den Umfang, der für die Fehlerdiagnose erforderlichen, Informationen (Messgrößen, Regelparameter, Betriebszustände, ...) definiert werden. In Verbindung mit der Bestandsaufnahme zu der tatsächlich im Gebäude verbauten Sensortechnik sowie die in der GLT aufgeschalteten Datenpunkte können Empfehlungen über ggf. zusätzlich erforderlicher Datenpunkte bzw. einzusetzender Messtechnik gegeben werden. Hierdurch kann eine Optimierung der Nutzung bereits vorhandener Ressourcen in Bestandsanlagen und eine erhebliche Kostenreduzierung bei der Nachrüstung von Automationssystemen mit integrierter Betriebsüberwachung erzielt werden.

Im Hinblick auf die Anwendung einheitlicher Methoden zur präventiven Qualitätssicherung und Fehleranalyse für den Bereich der Gebäudeplanung müssen standardisierte Verfahrensweisen, Arbeitsgrundlagen und Planungshilfen mit einer breiten Wissensbasis über mögliche fehlerhafte Betriebszustände im Gebäude geschaffen werden. Hierfür soll im Projekt exemplarisch eine objektorientierte Bibliothek erarbeitet werden. Diese sollte modular aufgebaut sein und Informationen über mögliche Fehlerereignisse, deren Auswirkungen sowie die spezifischen Fehlersymptome für einzelne technische Teilsysteme in den zu Eingang genannten Bereichen der technischen Gebäudeausrüstung beinhalten.

Parallel zu diesen Entwicklungen sollten durch die beteiligten Unternehmen IFM Software GmbH und das ILK Dresden, mit Hilfe der entwickelten Fehlererkennungsalgorithmen Prototypen von Fehlererkennungssystemen entwickelt und in Versuchsständen unter Laborbedingungen getestet werden. Mithilfe der entwickelten Systeme sollten falsche Einstellungen, Fehlbedienungen, suboptimale Betriebszustände und Ausfälle von Bauteilen, welche zu erhöhten Energieverbräuchen und damit zu erhöhten Betriebskosten führen, erkannt und dem Betreiber bzw. einem Verantwortlichen signalisiert werden. Somit kann dieser mit angepassten Maßnahmen darauf reagieren und das Gebäude als Gesamtsystem optimal betreiben. Ziel dabei war es, dies mit möglichst geringem investivem Aufwand zu realisieren. Durch die Teilprojekte sollte neben der methodischen Vorgehensweise im Entwicklungsprozess der Fehlerdiagnosealgorithmen auch der Bereich der zukünftigen Implementierung in marktübliche Gebäudeautomationssysteme unter realen Bedingungen erprobt und dokumentiert werden. Hierbei sollten auch mögliche technische und wirtschaftliche Hemmnisse in den Fokus gerückt und kritisch betrachtet werden.

Auf Grundlage der Fehlerbetrachtung wurden Regeln definiert, welche im laufenden Gebäudebetrieb auf ihren Wahrheitswert hin überprüft werden. Die Regeln für die Erkennung einzelner Fehlermöglichkeiten wurden anschließend exemplarisch für Einzelkomponenten und verschiedene Anlagenkonfigurationen in Programmablaufplänen (PAP) zu Fehlererkennungsalgorithmen zusammengeführt.

Diese dienen dann als Schnittstelle für die Implementierung in vorhandene Gebäudeautomationssysteme oder Hardware-redundante Überwachungssysteme.

Für die Entwicklung der regelbasierten Betriebsüberwachung war eine breite Wissensbasis über mögliche Fehlersymptome erforderlich. Über diese ist es möglich das Eintreten eines Fehlerzustandes zu analysieren. Hierfür muss einerseits eine ausreichende Informationsgrundlage über verfügbare Daten vorliegen und andererseits geeignete Analysemethoden für die Erkennung der Symptome vorliegen. Hierfür sollten weitgehend automatisierte Ansätze verfolgt werden, da für die manuelle Auswertung immer ein hoher Grad an Expertenwissen sowie ein erheblicher personeller Zeitaufwand verbunden ist. Dies sollte hinsichtlich sinkender Personalressourcen und aus wirtschaftlichen Gesichtspunkten kritisch bewertet werden.

2 Fehlermöglichkeiten- und Einflussanalyse (FMEA)

2.1 Nutzen und Ziele im Projekt

Für die Erarbeitung spezifischer Fehlersymptome muss zunächst eine Wissensbasis über mögliche Fehlerzustände im System geschaffen werden. Dies setzt neben der Kenntnis über technische Strukturen und funktionelle Anforderungen ein erhebliches Maß an Expertenwissen voraus. Eine gesamtheitliche Betrachtung und Ermittlung der schwerwiegendsten Fehlerereignisse erfordern die Einbeziehung verschiedener am Gebäude beteiligter Akteure. Bei Gebäuden mit komplexen technischen Systemen kann dies jedoch einen erheblichen zeitlichen und personellen Aufwand bedeuten. Es erfordert also eine Methodik die zum einen Informationen gewerkübergreifend bündelt und zur Komplexitätsreduzierung des Systemmodells nur die für die Fehlererkennung relevanten Systemstrukturen betrachtet. Durch eine geeignete Bewertungssystematik, muss weiterhin die Möglichkeit gegeben sein eine Priorisierung der Fehlerrisiken bspw. nach ökonomischen, sicherheitsrelevanten oder Komfortbezogenen Gesichtspunkten vorzunehmen. Auf Grundlage dieser Daten kann dann die Ermittlung der Anforderungen an das technische Monitoring und das Gebäudeautomationssystem unter Berücksichtigung der Fehlerarten mit hoher Priorität erfolgen.

Eine hierfür geeignete Methodik, welche zudem einen integralen Ansatz für die Fehleranalyse bietet, ist die Fehlermöglichkeiten und Einflussanalyse (kurz FMEA). Diese Methode des präventiven Qualitäts- und Risikomanagements hat sich, seit deren Entwicklung im Rahmen der Apollo-Missionen der NASA in den 60er Jahren, in anderen Bereichen der Industrie langjährig bewährt und stetig weiterentwickelt. Die Methode findet vor allem in der Luftfahrt, Medizintechnik und Automobilindustrie eine breite Anwendung. Aber auch in anderen Branchen wird die Methodik zunehmend eingesetzt. Der gesamte Bearbeitungsprozess wird durch einen oder mehrere FMEA-Moderatoren koordiniert, Ergebnisse dokumentiert und Verantwortlichkeiten zugeteilt. Die Methodik ist stark teamorientiert und bietet einen zentralisierten Ansatz für die gesamtheitliche Bewertung von Fehlerszenarien in komplexen technischen Systemen.

Im Forschungsprojekt MFGeb wurde, für den Bereich der technischen Gebäudeausrüstung (TGA) in den Gewerken Lüftungstechnik, Heizungs- und Kältetechnik sowie Be- und Entwässerungstechnik, die FMEA exemplarisch auf Einzelkomponenten und ausgewählte Anlagenkonfigurationen angewendet. Die Ergebnisse wurden dann als Planungsgrundlage für die Betriebsüberwachung und zur Schärfung des Anforderungsprofils an das technische Monitoring genutzt. Grundlegende Fragestellungen bei der Anwendung der FMEA waren unter anderem:

- Können technische Strukturen und Prozesse mit den Mitteln der FMEA hinreichend beschrieben werden?

- Welche Fehlerzustände können in Einzelkomponenten und Anlagenkonfigurationen auftreten und wie können diese bewertet werden?
- Welche Fehlerszenarien mit Ursachen und Auswirkungsbeziehungen ergeben sich im konkreten Anwendungsfall?
- Können Mindestausstattung an Datenpunkten für die Fehlererkennung anhand der FMEA-Ergebnisse und FED Anforderungen definiert werden?
- Wie können fehlerspezifische Symptome anhand der FMEA abgeleitet und einheitlich beschrieben werden?

Für die unterschiedlichen Bereiche der Produktverantwortlichkeiten sieht die FMEA verschiedene Analyseebenen vor. Die Hierarchie orientiert sich an der allgemeinen industriellen Zulieferkette, an deren Spitze der Erstausrüster (OEM – Original Equipment Manufacture) steht. Der OEM-Ebene sind die einzelnen Zuliefererebenen (englisch tier) untergeordnet. Die grafische Darstellung erfolgt zumeist in einer Zuliefererpyramide. Die nachfolgende Abbildung 2-1 zeigt diese am Beispiel einer typisch in der KFZ-Industrie vorzufindenden Struktur.

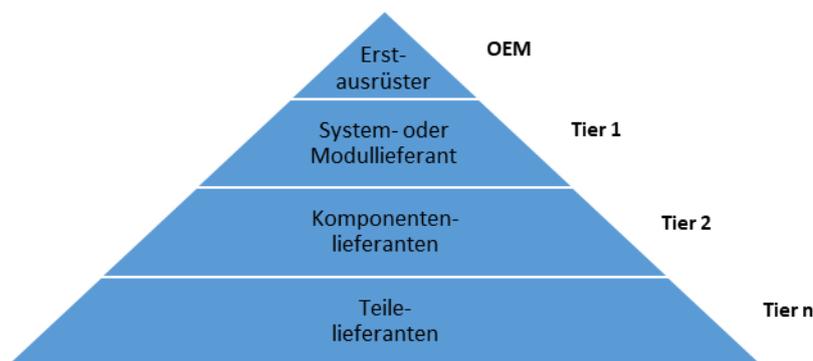


Abbildung 2-1: allgemeine Zuliefererpyramide

Am stärksten wurde die FMEA-Methodik in der KFZ-Industrie weiterentwickelt. Seit 2019 gibt es hier einen einheitlichen Standard für den deutschen (VDA) und amerikanischen (AIAG) Markt [AIAG & VDA (2019)], welcher in einem gemeinsamen FMEA-Handbuch dokumentiert sind. Die beschriebene Zuliefererstruktur ist stark von den Entwicklungsprozessen der KFZ-Industrie geprägt und gestaltet sich im Gebäudekontext zumeist diffiziler. Die FMEA wird vorwiegend in einem frühen Stadium der Produktentwicklung zur Qualitätssicherung, Fehlervermeidung und Risikoreduzierung eingesetzt. Eine zeitliche Einordnung im Bereich der Gebäudetechnik kann anhand der einzelnen Planungsphasen der Honorarordnung für Architekten und Ingenieure (HOAI) sowie den verschiedenen Lebenszyklusphasen eines Gebäudes vorgenommen werden.

1. Entwicklung- und Planung,
2. Realisierung,
3. Nutzung,
4. Verwertung

Die Abbildung 2-2 zeigt den allgemeinen Produktentstehungsprozess in der Industrie (obere Grafik) in Gegenüberstellung zur Lebenszyklusbetrachtung eines Gebäudes (untere Grafik).

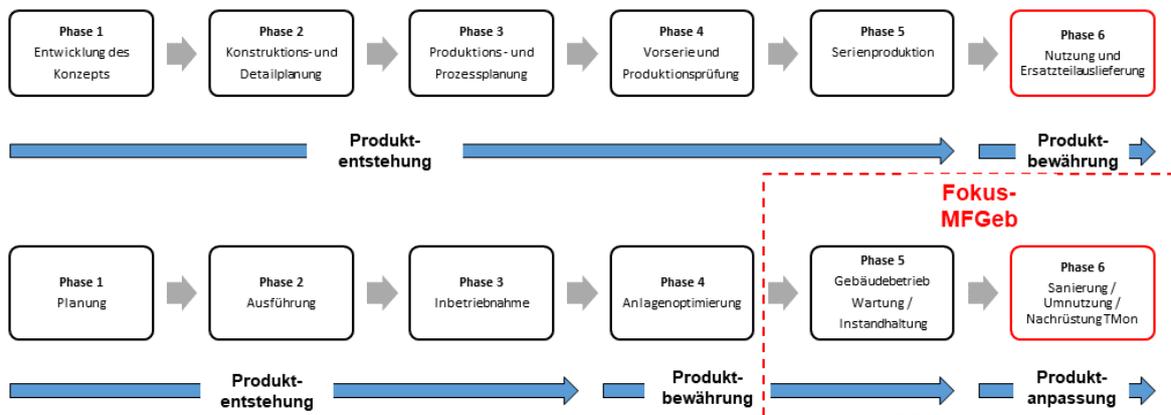


Abbildung 2-2: Gegenüberstellung Produktentstehungs- und Lebenszyklus eines Gebäudes

Für die frühen Phasen liegt der Schwerpunkt qualitätssichernder Maßnahmen zunächst bei der Betrachtung von Fehlern die während der Planung, Ausführung und Inbetriebnahme auftreten können. Hierbei geht es zu Beginn vor allem darum, Maßnahmen abzuleiten, welche Fehler bereits während des Planungs- und Ausführungsprozesses frühzeitig erkannt oder generell vermieden werden können. Im späteren Verlauf liegt der Schwerpunkt bei der Überprüfung der Zielerreichung hinsichtlich der Nutzeranforderungen und Planungsvorgaben (Lastenhefte, gesetzliche Vorgaben, Energiebedarfsberechnungen, etc.). Hierfür sind verschiedene Inbetriebnahme-, Abnahme- sowie Optimierungs- und Einregulierungsprozesse erforderlich. Diese erstrecken sich im Optimalfall über einen längeren Zeitraum von ein bis drei Jahren. Eine Verfahrensweise hierzu ist bspw. das Inbetriebnahmemanagement nach VDI 6039.

Die sich daran anschließende Phase der Gebäudenutzung bzw. des Gebäudebetriebes, erstreckt sich über den längsten Zeitraum im Lebenszyklus des Gebäudes. Die FMEA soll zunächst auf diesen Bereich eingegrenzt und angewendet werden. Für die Betrachtung werden die folgenden Annahmen getroffen:

1. die Lebenszyklusphasen vor der Gebäudenutzung werden als fehlerfrei angesehen
2. alle Einregulierungs- und Optimierungsmaßnahmen im Rahmen des Inbetriebnahmemanagement sind abgeschlossen
3. Steuerungs- und Regelungsfunktionen der Gebäudeautomation werden als fehlerfrei angesehen
4. Die Messwertaufnahme, Datenverarbeitung sowie sämtliche Signalwege sind fehlerfrei

Die Qualität der FMEA-Ergebnisse ist von der Beteiligung möglichst vieler Akteure im Gebäudekontext abhängig. Die Informationsdichte der Fehleranalyse richtet sich unter anderem danach, wann und über welchen Zeitraum die FMEA eingesetzt wird. Die höchste Informationsdichte liefert die FMEA, wenn diese als begleitender Prozess über den gesamten Gebäudelebenszyklus durchgeführt wird. Das liegt zum einen daran, dass alle am Gesamtprodukt „Gebäude“ beteiligten Akteure in den Prozess eingebunden werden können. Zum anderen kann in der Planungs- und Ausführungsphase, durch Veränderung des Produktdesign, noch präventiv auf Fehlermöglichkeiten reagiert werden. Die FMEA bietet dabei das Potential als Strukturgeber für die Fehlererkennung und Fehlervermeidung über den gesamten Lebenszyklus zu dienen.

Eine hohe Relevanz für die Konzeptionierung der Betriebsüberwachung und die damit verbundene Bedarfsermittlung für das technische Monitoring haben Fehlermöglichkeiten, die während der Nutzungsphase bzw. im laufenden Gebäudebetrieb auftreten können. Hierbei handelt es sich zunächst um die Fehlerzustände für die, während der Konzept- und Planungsphase, keine geeigneten präventiven Maßnahmen für konstruktive Verbesserungen umgesetzt werden konnten. Da die FMEA über den gesamten Bearbeitungszeitraum als eine fortwährende Optimierungsschleife mit stetiger Neubewertung der vorhandenen Fehlerrisiken durchlaufen wird, bietet sie zu jedem Zeitpunkt eine gesamtheitliche Übersicht zu Fehlern, die bereits durch Vermeidungs- oder Entdeckungsmaßnahmen erkannt werden. Die Methodik und die Anforderungen an das technische Monitoring werden bspw. in der VDI 6041 [VDI6041 (2017)] oder der AMEV Empfehlung Nr. 158 [AMEV (2020)] näher beschrieben. Unterschieden wird zwischen Anlagen-, Behaglichkeits- und Energiemonitoring. In Hinsicht auf die Abgrenzung der Fehlererkennenden Maßnahmen bietet sich diese Einteilung auch für eine Einteilung der Fehlerauswirkungen an.

2.2 FMEA-Arten

Durch die stetige Weiterentwicklung der FMEA-Methodik sind, bis zum heutigen Tage, eine Vielzahl unterschiedliche FMEA-Arten im Umlauf. In [Werdich (2012)] sind eine ausführliche Zusammenstellung und kurze Erläuterungen zu einigen dieser Varianten aufgeführt. Unter anderem werden bspw. die Konstruktions-FMEA, System-FMEA, Produkt-FMEA, Human-FMEA, Maschinen-FMEA, Hybrid-FMEA oder die Matrix-FMEA genannt. Die maßgebliche Weiterentwicklung der Methodik fand dabei im Bereich der KFZ-Industrie statt. Seit Ende Juni 2019 gilt hier für den deutschen und amerikanischen Markt, der harmonisierte FMEA-Standard nach VDA (Verein deutscher Automobilbauer) und der AIAG (Automotive Industry Action Group). Die gemeinsamen Festlegungen und Standards beruhen auf einem mehrjährigen Harmonisierungsprozess mit Beteiligung deutscher und amerikanischer Automobilhersteller. Im dazu veröffentlichten FMEA-Handbuch [AIAG & VDA (2019)] wird nun ausschließlich zwischen den Arten Design-FMEA, Prozess-FMEA sowie der, zu diesem Zeitpunkt, neu eingeführte FMEA-Ergänzung für Monitoring und Systemreaktion unterschieden. Grundlegend wird

zwischen der Betrachtung eines Produktes oder Prozessen unterschieden. Weiterhin wurden die Basis- und Familien-FMEAs eingeführt.

Zur Abgrenzung soll im nachfolgenden kurz auf die einzelnen FMEA-Arten eingegangen werden. Da die FMEA, mit der Bestrebung zum einheitlichen internationalen Standard, maßgeblich in der Automobilindustrie weiterentwickelt wurde, erfolgt zunächst eine Fokussierung dieses Standards. Im nachfolgenden werden aufgrund dessen nur die Grundlagen für die aktuell nach VDA geltenden FMEA-Arten Prozess-, Design- und MSR-FMEA näher beschrieben.

Prozess-FMEA

Bei der Prozess-FMEA werden verschiedenste Prozesse bei der Produktion, Montage sowie Logistik analysiert. Auf die Gebäudetechnik bezogen, wären dies einerseits die Produktionsprozesse für die einzelnen technischen Komponenten. Diese Prozesse können qualitativ zumeist nur durch die entsprechenden Systemhersteller selbst analysiert und bewertet werden. Es ist Detailwissen zu sensiblen Daten notwendig, welche zumeist der firmeninternen Geheimhaltung unterliegen. Bezogen auf das „Gesamtprodukt Gebäude“ liegen die Prozessabläufe im Bereich der Planung, Ausführung und Inbetriebnahme. Die Produktverantwortung liegt hierbei bei vielen unterschiedlichen Akteuren. Unter anderem zählen hierzu bspw. Generalunternehmer, Architekten, Fachplaner, Auftraggeber, ausführende Firmen und weitere. Im Rahmen dieses Forschungsprojektes sollten diese Bereiche zunächst nicht analysiert und als fehlerfrei angesehen werden. Bezogen auf die Nutzungs- oder Betriebsphase des Gebäudes sollen auch die Bereiche der Sanierung, Umnutzung oder Nachrüstung zunächst nicht berücksichtigt werden. In dieser Phase zählen auch die Wartung und Instandhaltung, der Nutzereinfluss sowie die Bedienung durch technisches Personal zu den prozessorientierten Abläufen. Hierbei können bspw. Fehlerzustände durch ungünstig gewählte Parameter und Einstellungen, Fehlbedienungen durch technisches Personal oder Nutzermanipulationen betrachtet werden. Diese Fehlerpotentiale sollten bei der Analyse, mit einem geringen Detaillierungsgrad berücksichtigt werden.

Design-FMEA

Die produktorientierte Betrachtung erfolgt mit der Design-FMEA. Hier werden konstruktive Schwachstellen im Produktdesign während der Produktentwicklung analysiert und verbessert. Dabei durchläuft die FMEA eine fortwährende Bearbeitungsschleife. Es werden das Produktdesign sowie die Entdeckungs- und Vermeidungsmaßnahmen so weit optimiert, bis zuvor festgelegte Kriterien für die Risikobewertung erfüllt sind. Die Zusammenführung der Ergebnisse einer Design- und Prozess-FMEA in einem gemeinsamen Strukturbaum wird als Hybrid-FMEA bezeichnet. Für die Betrachtung der Betriebs- und Nutzungsphase muss zunächst eine Design-FMEA vorhanden sein bzw. erarbeitet werden.

FMEA für Monitoring und Systemreaktion

Bei der dritten und erst im Rahmen der Harmonisierung 2019 eingeführten FMEA für Monitoring und Systemreaktion wird der Zeitraum während des Kunden- oder Testbetriebs analysiert. Hierbei werden auch bereits vorhandene Überwachungsmaßnahmen und die auf ein Fehlverhalten folgenden Systemreaktionen berücksichtigt. Eingesetzt werden kann diese Methode für die Betrachtung von Überwachungsfunktionen die auf Grundlage gesetzlicher Vorgaben oder sicherheitstechnischer Aspekte vorhanden sein müssen. Die Analyse baut immer auf einer bereits vorhandenen Design-FMEA auf. Grundlegend gibt es für den Einsatz der genannten FMEA-Arten drei verschiedene Anwendungsfälle:

1. Neuanlagen
2. Bestandsanlagen
3. Sanierungen, Modernisierungen und Umbaumaßnahmen

Unterschiede liegen in der Vorgehensweise bei dem fortwährenden Arbeitsschritt der Optimierung. Wo hingegen bei Neuanlagen vor allem die Minimierung der Auftretenswahrscheinlichkeiten durch präventive Maßnahmen zur Fehlervermeidung, bspw. durch konstruktive Änderungen des Produktdesigns, erarbeitet werden stehen bei Bestandsanlagen eher die Maßnahmen zur Erhöhung der Fehlerentdeckung im Vordergrund. Sanierungen, Modernisierungen und Umbaumaßnahmen sind in dieser Hinsicht eine Mischform bei denen beide Aspekte im Vordergrund stehen können.

Basis- und Familien-FMEA

Der Großteil der Planungsaufgaben im Bereich der gebäudetechnischen Anlagen kann als typische Plattformprojekte angesehen werden. Zumeist wird auf eine bereits bestehende Produktarchitektur zurückgegriffen und vorhandene Komponenten und Funktionen wiederverwendet bzw. an die neuen Produkthanforderungen angepasst. Zur Wiederverwendung durchgeführter FMEAs für gleiche oder ähnliche Systeme bzw. Prozesse wird im Bereich der Automobilindustrie meist der Begriff generische, Basis- oder Familien-FMEA verwendet. Diese Herangehensweise eignet sich somit ebenfalls für den Einsatz in der Gebäudetechnik.

Der Grundgedanke liegt zum einen bei der Methodik des „Lessons Learned“, also des Lernens aus Fehlern und Problemstellungen früherer Projekte bzw. Produktentwicklungen und zum anderen bei der Kostenreduzierung für die Erstellung der FMEAs durch einen verringerten Zeit- und Personalaufwand. Letzteres kann aufgrund des reduzierten Arbeitsaufwandes durch die Wiederverwendung von Basis- und Familien-FMEAs und anschließender Anpassung und Spezifizierung erreicht werden. Die Basis FMEA ist dabei nicht anwendungsspezifisch, sondern beinhaltet vielmehr verallgemeinernde Anforderungen, Funktionen und Maßnahmen.

Eine Familien-FMEA bildet eine bestimmte Produktfamilie ab und beschreibt vereinheitlichte Systemgrenzen, Funktionen und Prozessabläufe. Sie ist somit eine spezialisierte Basis-FMEA. Bezogen auf die Gebäudetechnik könnte eine Basis-FMEA bspw. allgemeine Komponenten wie die Wärmeerzeugung, Wärmerückgewinnung, Speicherung thermischer Energie, usw. abbilden. Die Familien-FMEA spezifiziert weitere Parameter einer Produktfamilie wie bspw. die Art der Wärmeerzeugung, der Anwendungsbereich oder unterschiedliche Ausstattungsvarianten. Bei der Betrachtung komplexer Anlagentechnik kann auf die Familien-FMEAs zugegriffen und diese weiter angepasst und modifiziert werden. Dies gilt vor allem für technische Komponenten, bei denen es in frühzeitigen Planungsphasen zunächst noch keinen Produktverantwortlichen gibt.

Für die Bearbeitung der FMEA wurde im Forschungsprojekt die Software Apis IQ-RM Pro verwendet. Diese bietet mehrere Möglichkeiten Basis- oder Familien FMEAs zu verwalten. Hinsichtlich Aufwandsminimierung bei der Betrachtung unterschiedlicher Anlagenvarianten sowie Durchführbarkeit eines Änderungsmanagements bei der modularen Betrachtungsweise ist dies ein wichtiger Funktionsbaustein bei der softwaregestützten FMEA-Bearbeitung. In der Software Apis IQ-RM Pro wird für die Verwaltung von Basis oder Familien-FMEAs der Begriff „Container FMEA“ eingeführt. Ein Container beinhaltet dabei Komponenten aus einem bestimmten Teilbereich eines Gesamtsystems. Innerhalb eines „Containers“ werden einzelne Systemkomponenten angelegt, welche wiederum in unterschiedliche Strukturvarianten untergliedert sind. Der Aufbau der Topologien erfolgte in Anlehnung an die VDI 2067 und DIN EN 18599. Eine weitere Unterteilung der Komponenten bspw. nach ihrer Bauart erfolgt in sogenannten Strukturvarianten.

2.3 Allgemeine Vorgehensweise

In diesem Kapitel soll ein kurzer Einblick in die Vorgehensweise bei der Durchführung einer FMEA gegeben werden. Dabei wird der Schwerpunkt auf die Anwendungsempfehlungen und Festlegungen mit Bezug auf die Gebäudetechnik bzw. Versuchsanlagen im Projekt gelegt. Es wird auf weiterführende FMEA-Fachliteratur zur Vertiefung des methodischen Grundlagenwissens verwiesen. Einen aktuellen Überblick bietet z.B. die DIN EN 60812:2015-08 Fehlerzustandsart- und auswirkungsanalyse (FMEA) [DIN EN 60812 (2015)] und das FMEA-Handbuch [AIAG & VDA (2019)] des VDA und AIAG mit brancheneigenen Standards der Automobilindustrie sowie verschiedene Fachliteratur wie [DGQBand (2012)]; [Werdich (2012)] oder [Tietjen et. al. (2011)].

Seit 2006 haben sich die FMEA-Verbände auf den Funktionsansatz verständigt. Hintergrund ist das Betrachten von Funktionalitäten bereits in einer sehr frühen Phase der Produktentstehung. Hierbei kann der präventive Ansatz der FMEA-Methodik optimaler verfolgt werden. Beim Hardwareansatz wird aus einer Explosionszeichnung heraus gedanklich jedes Bauteil betrachtet und auf Fehler sowie dessen Auswirkungen

hin untersucht. Hierfür müssen bereits detaillierte Informationen über alle Komponenten des Systems vorliegen. Hinsichtlich der Eingrenzung in diesem Forschungsvorhaben auf die Anwendung der FMEA in der Betriebsphase des Gebäudes, entfällt der methodische Ansatz einer präventiven oder, auf den Systemaufbau bezogenen, korrektiven Fehlervermeidung. Es wird von einer bereits abgeschlossenen Produktentwicklung (mit Ausnahme von Umnutzungs- oder Optimierungsmaßnahmen) ausgegangen. Da in dieser Phase alle detaillierten Informationen vorhanden sind wird der Hardwareansatz gewählt. Hierbei handelt es sich um ein Bottom-Up Verfahren, also die Betrachtung vom kleinsten Bauteil zum Gesamtsystem. Hierbei ist es wichtig die Detailtiefe der Analyse zu definieren. Entscheidend dabei ist einen sinnvollen technischen Detailgrad bis zur untersten Systemebene zu finden. Ziel ist es ausreichend analytische Grundlagendaten für die Fehlererkennungs- und -diagnosemethoden zu erhalten.

2.3.1 Die Arbeitsschritte der FMEA

Seit des Harmonisierungsprozesses des AIAG und VDA Mitte 2019 werden im FMEA-Handbuch [AIAG & VDA (2019)] für den gesamten Bearbeitungsprozess der FMEA sieben Schritte definiert. Nach einem anfänglichen Scoping-Prozess folgt im zweiten Schritt die Strukturanalyse zur Erfassung der vorhandenen Anlagentechnik, einschließlich der Teilsysteme und Einzelkomponenten, als Baumstruktur. Hierauf aufbauend werden wichtige funktionale Zusammenhänge, Anforderungen und Merkmale anhand von Funktionsnetzen erfasst. Über die Funktionen können nun mögliche Fehlfunktionen abgeleitet und die Fehlerursachen und Auswirkungen in komplexen Fehlernetzen beschrieben werden. Zuletzt werden die Fehlerszenarien hinsichtlich Bedeutung der Fehlerauswirkungen sowie der Auftretens- und Entdeckungswahrscheinlichkeit unter Berücksichtigung vorhandener Vermeidungs- und Entdeckungsmaßnahmen bewertet. Die Fehlererkennungsmaßnahmen werden optimiert und die Ergebnisse dokumentiert. Ziel bei dem Einsatz der FMEA im Projekt ist die Erarbeitung einer Wissensbasis über Fehler mit hoher Relevanz für die Fehlererkennung.

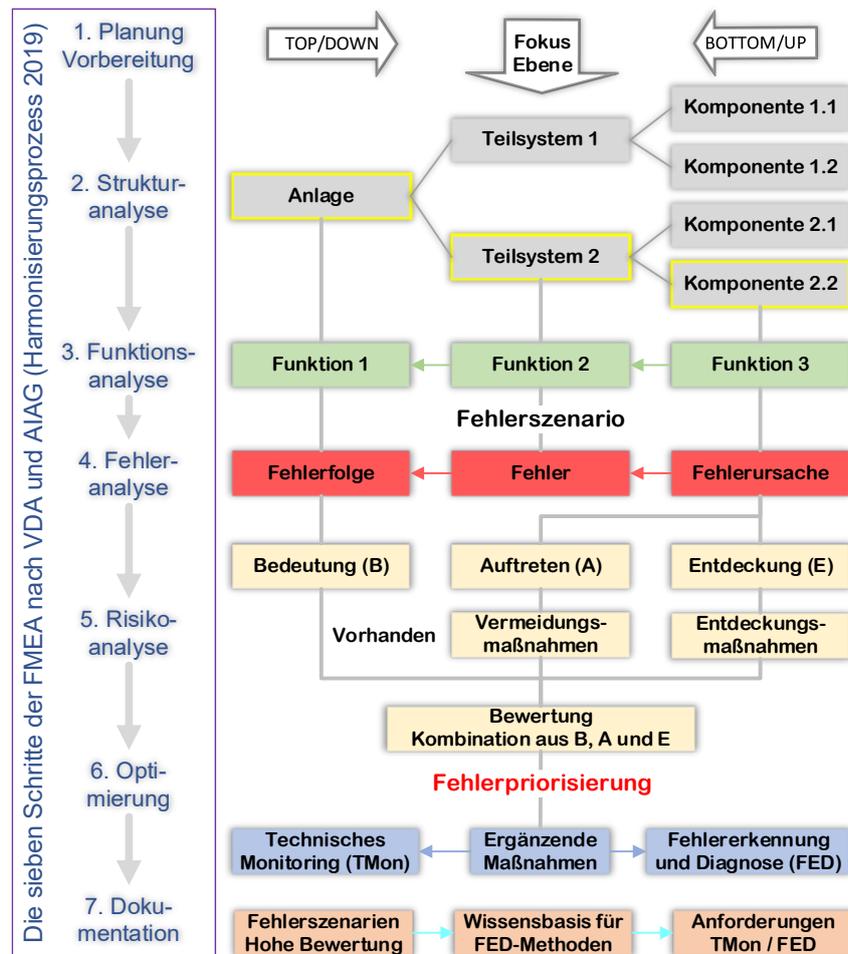


Abbildung 2-3: Bearbeitungsprozess der FMEA

2.3.2 Planung und Vorbereitung (Scoping)

In einschlägiger Fachliteratur und aus Erfahrungsberichten wird immer wieder die Wichtigkeit eines umfangreichen Scopings betont. Scoping leitet sich aus dem englischen Wort scope – Umfang, Abgrenzung, Aufgabenbereich, Raum ab. Bei diesem Prozess werden der Untersuchungsraum (räumlich) und die Untersuchungstiefe (inhaltlich) festgelegt. Die Hauptziele für die Planung und Vorbereitung der FMEA sind:

- die Festlegung des Analyseumfangs und der Analysegrenzen
- das Treffen von Annahmen und Randbedingungen für die Analyse
- die Schaffung einer Ausgangsbasis für die Strukturanalyse

Für die Betrachtung komplexer Systeme kann die vorherige Einteilung in unterschiedlicher Betrachtungsebenen sinnvoll sein. Die jeweils höhere Betrachtungsebene kann dabei aus Elementen der jeweils niedrigeren Betrachtungsebene bestehen. Für die FMEA-Anwendung im Projekt wurden die folgenden Betrachtungsebenen definiert:

- Bauteile
- Komponenten
- Teilsysteme
- Anlagenteile
- Anlagen
- Gebäude

Eine allgemeine Zuordnung von typischen TGA-Komponenten und Anlagenkonfigurationen zu den einzelnen Betrachtungsebenen ist hinsichtlich der technischen Vielfalt und der verschiedensten Anlagenstrukturen nicht praktikabel. Zur Komplexitätsreduzierung der Modelle für die technischen Systemstrukturen und Einzelkomponenten ist es erforderlich den Detailgrad für die Analyse an das Ziel der FMEA anzupassen. Es sollte dabei festgelegt werden, wofür die Ergebnisse der FMEA genutzt werden sollen. Im Projekt sollte die FMEA unter anderem als Grundlage für die Festlegung von Fehlerdiagnosemaßnahmen im Gebäudebetrieb dienen. Bei der Fehlererkennung und –diagnose (FED) ist es zumeist ausreichend die Fehlerursachen auf die Hauptkomponenten eingrenzen zu können. Die Betrachtung der technischen Strukturen muss daher zumeist nicht „bis zur letzten Schraube“ erfolgen. Dies erfordert hohe Bearbeitungszeiten, zumeist fehlt auch das technische Detailwissen und es gibt eine zu hohe Vielfalt an technischen Variationen. Die detaillierte und allumfassende Betrachtung von Einzelkomponenten kann dabei nur durch die Systemhersteller selbst erfolgen. Die FMEA sieht an dieser Stelle entsprechende Schnittstellen für die Datenübergabe vor. Die einzelnen Analysen müssen jeweils unter Beteiligung bzw. Verantwortung anderer Akteure wie bspw. Komponentenhersteller, Anlagenbetreiber, Bauherren, Generalunternehmer erfolgen. Eine weiterführende formelle Festlegung dieser Verantwortlichkeiten ist für eine gesamtheitliche Fehlerbetrachtung sinnvoll.

Die Verwertungszwecke der FMEA-Ergebnisse im Projekt sind wie folgt abgegrenzt:

- die Festlegung betriebsüberwachender Maßnahmen (aus wirtschaftlicher Sicht und hinsichtlich der Fehlerbewertung nach Priorität)
- die Auswahl geeigneter Analysemethoden zur Fehlererkennung und –diagnose der relevanten Fehlermöglichkeiten
- die Anpassung der FED-Maßnahmen an die entsprechende Anlagentechnik unter Berücksichtigung bereits vorhandener Ressourcen an MSR-Technik

Für eine allgemeine Beschreibung von Fehlerzuständen typischer TGA-Komponenten und Anlagenkonfigurationen müssen verschiedene technische Varianten unterschieden werden. Hierfür wurden vorhandene Topologien wie bspw. aus der DIN EN 18599, VDI 2067 oder DIN EN 15232 genutzt. Weitere Unterschiede liegen bspw. innerhalb der technischen Detailstruktur, den Steuerungs- und Regelungsarten, den

Produktmerkmalen, Planungs- und Auslegungsverfahren sowie Anforderungen, die sich aus gesetzlichen und normativen Vorgaben und dem Anwendungsbereich ergeben. Nach der Variantenauswahl werden Systemgrenzen und Schnittstellen zu anderen Systemen festgelegt.

Zur ersten Darstellung der technischen Strukturen unter Festlegung der Systemgrenze sowie benachbarten Systemen bieten sich Blockdiagramme an (Beispiel in Abbildung 2-4). In Blockdiagrammen werden auch Überlegungen zu Schnittstellen zwischen den Komponenten innerhalb der Systemgrenze und angrenzenden Systemen, welche in Wechselwirkung stehen, veranschaulicht. Hierbei wird unterschieden in:

- den Austausch von Medien oder physikalischen Stoffströmen
- die Übertragung von Energieströmen oder die Energieversorgung
- der Austausch von Daten oder Informationen
- die Mensch-Maschine-Schnittstelle

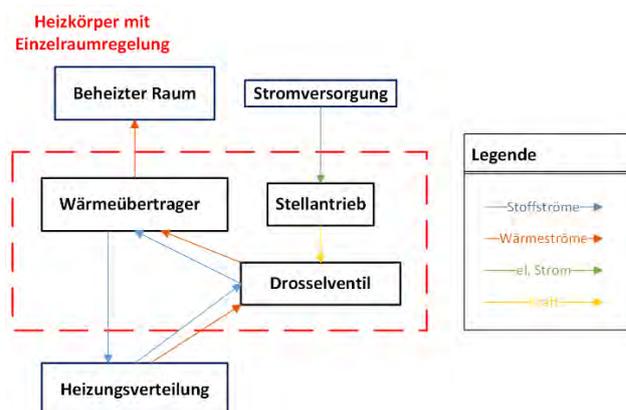


Abbildung 2-4: Beispiel Blockdiagramm

Die Interaktion der Komponenten und angrenzender Systeme kann mit Hilfe einer tiefgreifenden Schnittstellenanalyse analysiert werden. Ein geeignetes Werkzeug hierfür sind bspw. Schnittstellenmatrizen (Beispiel in Tabelle 2-3). Die horizontal angeordneten Elemente wirken auf die senkrecht angeordneten Elemente. Mögliche Interaktionen der sich außerhalb der Systemgrenze befindenden Systemelemente sollen nicht bewertet werden, da der Fokus auf den Elementen innerhalb der Systemgrenzen liegen soll. Der Elementschnittpunkt (als Quadrupel) ist folgendermaßen aufgebaut:

Tabelle 2-1: Legende Quadrupel

M	Q	M: Stoffströme	Q: thermische Energieströme (Wärmeströme)
P	F	P: elektrische Energieströme (Hilfsenergie)	F: Kraftübertragung

Hierdurch können Fließrichtungen von Stoff- und Wärmeströmen sowie Übertragungen von Kraft und elektrischen Strom dargestellt und bewertet werden. Die Bewertungsskala ist in Tabelle 2-2 zu sehen.

Tabelle 2-2: Bewertung Energie- und Kraftübertragung

Bewertung	Auswirkung
+2	Interaktion ist zur Erzielung der Funktion notwendig
+1	Interaktion ist nicht absolut notwendig
0	Interaktion beeinflusst nicht die Funktion
-1	Interaktion wirkt negativ, muss aber nicht verhindert werden
-2	Interaktion muss verhindert werden, um die Funktion zu gewährleisten

Tabelle 2-3: Beispiel Schnittstellenmatrix

System / Element			Systemgrenze					
			innerhalb			außerhalb		
			Wärmeübertrager	Drosselventil	Stellantrieb	Beheizter Raum	Heizungs-verteilung	Stromversorgung
Systemgrenze	innerhalb	Wärmeübertrager		-2 -1 0 0	-2 -1 0 0	-2 +2 0 0	+2 -2 0 0	0 0 0 0
		Drosselventil	+2 +2 0 0		-2 -2 0 +2	-2 -2 0 0	-2 -2 0 0	0 0 0 0
		Stellantrieb	0 0 0 0	0 0 0 +2		0 0 0 0	0 0 0 0	0 0 0 0
	außerhalb	Beheizter Raum	-2 -2 0 0	-2 -2 0 0	0 0 0 0		0 0 0 0	0 0 0 0
		Heizungsverteilung	-2 -1 0 0	+2 +2 0 0	-2 -1 0 0	0 0 0 0		0 0 0 0
		Stromversorgung	0 0 -2 0	0 0 -2 0	0 0 +2 0	0 0 0 0	0 0 0 0	

2.3.3 Strukturanalyse

Auf Grundlage der Festlegungen aus der Vorbetrachtung zum technischen Detailgrad wird die Systemstruktur angelegt. Diese kann anhand von Strukturbäumen visualisiert werden. Der Strukturbaum besteht aus miteinander verknüpften Systemelementen,

welchen in späteren Arbeitsschritten Funktionen, Anforderungen, Merkmale und Fehlfunktionen zugewiesen werden können. Ein Beispiel für einen Strukturbaum zeigt die Abbildung 2-5.

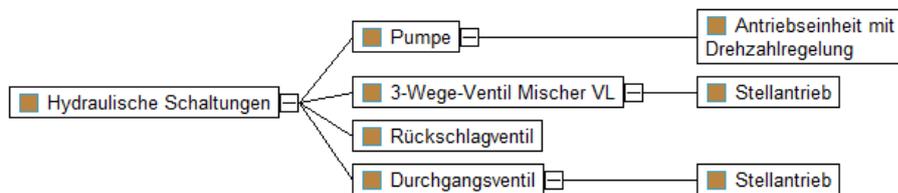


Abbildung 2-5: Beispiel Strukturbaum einer Beimisch-Schaltung für differenzdruckarme Verteiler oder WE ohne eigene Pumpe

Strukturierungsprinzipien von industriellen Systemen, Anlagen, Ausrüstungen und Produkten werden bspw. in der DIN EN 81346-1:2010-05 beschrieben. Die Norm unterscheidet drei verschiedene Aspekte von Strukturen. Produktbezogene, funktionsbezogene und ortsbezogene Strukturen. In Bezug auf die FMEA kann der produktbezogene Aspekt gleichgesetzt werden mit der Strukturanalyse (Strukturbaum), der funktionsbezogene Aspekt mit der Funktionsanalyse (Funktionsnetz) und ortsbezogene Aspekte werden in der klassischen FMEA nicht berücksichtigt. Im Bereich der Gebäudetechnik ist es aber durchaus sinnvoll technische Komponenten ortsbezogen zu betrachten. Beispielsweise für die Zuordnung zu einer bestimmten Nutzungszone, zu einem Anlagenteil oder zur Festlegung von Umgebungsbedingungen bezüglich des Aufstellungsortes. Die Ortsstrukturen können dabei z.B. auf der Anlage als Ganzes (einzelnes Objekt) oder der gesamten Anlagentopographie aufgebaut werden. Letzteres eignet sich jedoch nur für späteren Phasen der Anlagenplanung oder zur Abbildung bereits bestehender technischer Strukturen. Die Strukturanalyse im Projekt wurde zunächst nur für den produktbezogenen Aspekt durchgeführt.

2.3.4 Funktionsanalyse

Den im Strukturbaum angelegten Systemelementen werden Funktionen zugeordnet. Dabei kann ein Element auch mehrere Funktionen erfüllen. Durch eine Funktion wird beschrieben, welche Teilaufgaben einzelne Elemente für die Erfüllung der Hauptfunktionen des gesamten Systems erfüllen. Die Darstellung des Zusammenwirkens einzelner Funktionen erfolgt in einem Funktionsbaum bzw. Funktionsnetz. An den Knotenpunkten des Funktionsnetzes bestehen logische ODER-Verknüpfungen zwischen den einzelnen Funktionen. Der Detaillierungsgrad der Funktionsstruktur steigt in entgegengesetzter Richtung zur Hauptfunktion bis messbare Größen oder Zahlenwerte gesetzt werden können. Um zu einer höheren Detaillierungsstufe zu gelangen wird die Frage gestellt: „Wie wird die Funktion A erreicht?“. Zur Überprüfung der Plausibilität dieser Verknüpfung wird in entgegengesetzter Richtung die Frage nach dem „Warum wird die Funktion B benötigt?“ Für die Definition von Funktionen wird ein einfacher Aufbau in Form von einem Substantiv und Verb verwendet. Beispiel hierfür wäre „Wärme

übertragen“. Weiterhin kann zwischen Primär- und Sekundärfunktionen unterschieden werden. Die so zusammengetragenen Funktionen und Anforderungen werden im Anschluss, als Funktionsnetz in Relation zueinander gesetzt und visualisiert. Hierbei können auch die Funktionen und Anforderungen einzelner Strukturelemente, welche keine direkte Verbindung im Strukturbaum zueinander haben, verknüpft werden. Weiterhin ist eine Unterteilung und funktionelle Betrachtung verschiedener Betriebszuständen erforderlich, da einzelne technische Komponenten unter Umständen in verschiedenen Betriebszuständen verschiedene Funktionen erfüllen müssen.

Anforderungen

Durch die Definition von Anforderungen können die Erfüllungskriterien einer Funktion festgelegt werden. Dies ist für eine Überprüfung der Funktionen sinnvoll. In der *DIN ISO 9000* wird eine Anforderung als „*ein Erfordernis oder eine Erwartung, das oder die festgelegt, üblicherweise vorausgesetzt oder verpflichtend ist*“ beschrieben. Erfolgt die Beschreibung einer Anforderung durch quantifizierbare Größen, so ergibt sich auch eine quantifizierbare Überprüfung für die Funktionserfüllung.

Es wird prinzipiell zwischen funktionalen und nichtfunktionalen Anforderungen unterschieden. Häufig können physikalische Größen, die zur Beschreibung eines Prozesses dienen für die funktionalen Anforderungen genutzt werden. Die Anforderungen sind bspw. im Rahmen von Normen, gesetzlichen oder behördlichen Vorgaben, Planungskriterien, Kundenanforderungen an die thermische Behaglichkeit oder eine Energieeffiziente Betriebsweise festgeschrieben.

Bei nichtfunktionalen Anforderungen handelt es sich um Kriterien die vorwiegend bei der Produktentwicklung relevant sind. Beispielsweise könnte eine Anforderung die Vorgabe eines gewissen Druckbereichs sein. Dies schränkt die Materialauswahl oder bspw. den Nenndruck eines Sicherheits- oder Regelventils ein. Konstruktive Fehler können in der Betriebsphase bei Umnutzungs- und Sanierungsmaßnahmen durchaus einen Einfluss auf Fehlerzustände haben, wurden jedoch nicht weiter untersucht.

In Abbildung 2-6 ist der Ausschnitt eines Funktionsnetzes abgebildet. Die Funktion der hydraulischen Schaltung ist die Verteilung von Wärme mit Anforderungen an den Massestrom und die Vorlauftemperatur. Um die beiden Anforderungen zu erfüllen sind wiederum Sekundärfunktionen anderer Systemelemente notwendig.

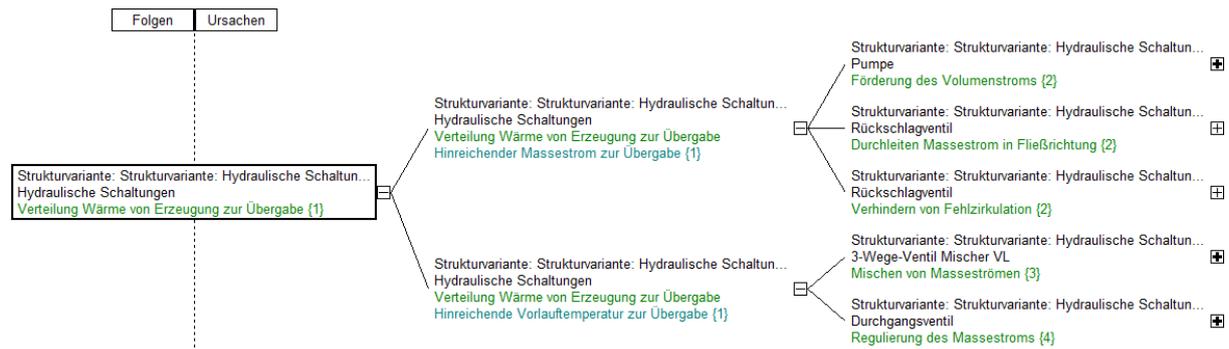


Abbildung 2-6: Beispiel Funktionsnetz einer Beimisch-Schaltung für differenzdruckarme Verteiler oder WE ohne eigene Pumpe

Merkmale

Zusätzlich zu den Anforderungen können Produktmerkmale definiert werden. Diese befinden sich in der untersten Ebene des Strukturbaums und sind zunächst keiner Funktion zugeordnet. Ein Merkmal könnte am Beispiel einer Pumpe die „Dichtheit“ sein. Merkmale sind quantifizierbare Attribute eines Produktes oder Prozesses. Sie sind in Datenblättern festgeschrieben und messbar. Die Merkmale können in vier verschiedene Kategorien unterteilt werden:

- Sicherheitsmerkmale (nicht betrachtet)
- Funktionsmerkmale
- Leistungsmerkmale (KPIs)
- Sonstige Merkmale

Merkmale, die sich auf sicherheitsrelevante Anforderungen auswirken, werden als besondere Merkmale deklariert. Es wird vereinfacht vorausgesetzt, dass diese bereits durch andere Verfahren (bspw. nach VDI 6010) berücksichtigt sind und wurden nicht weiter betrachtet.

Parameterdiagramm

Um Anforderungen, Merkmale und Funktionen für ein Systemelement gesamtheitlich darzustellen wurde ein Parameterdiagramm (P-Diagramm) verwendet. Hierin werden mögliche, auf das Systemelement einwirkende oder dem Element inhärente, Einflussfaktoren aufgelistet. Betrachtet werden Parameter die auf die Eingangsgrößen oder auf die, zur Ausgangsgröße führenden, Transferfunktionen wirken. Ein Beispiel ist in Abbildung 2-7 aufgeführt.

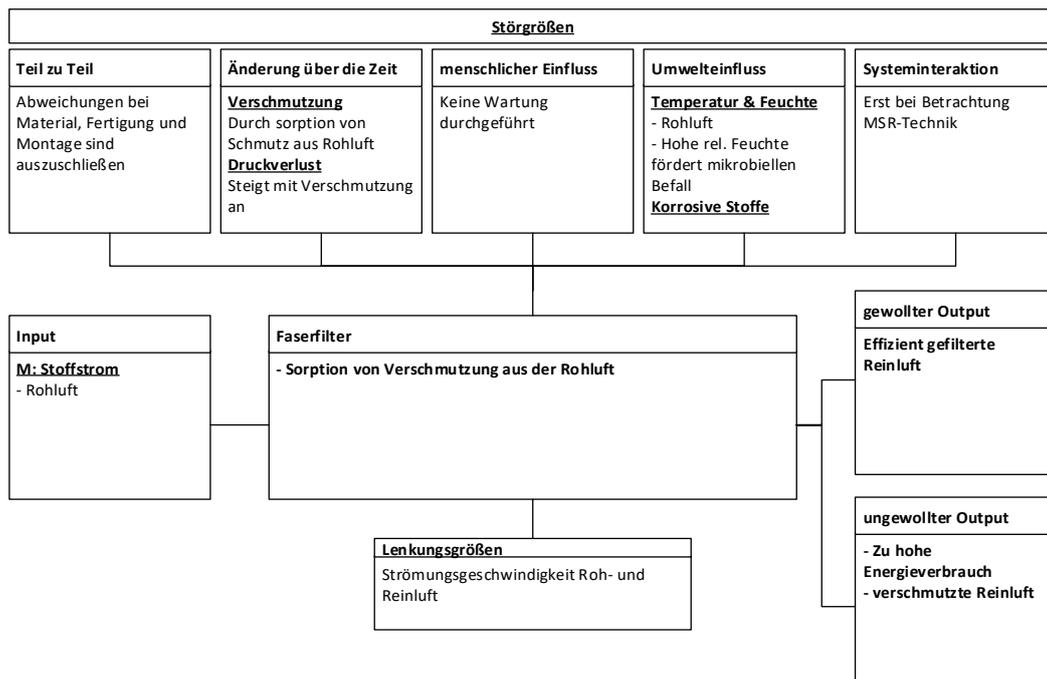


Abbildung 2-7: Beispiel Parameterdiagramm eines Luftfilters

2.3.5 Fehleranalyse

Auf Basis der durchgeführten Funktionsanalyse werden nun aus den festgelegten Funktionen, Anforderungen und Merkmalen die Fehlfunktionen abgeleitet. Dabei beschreibt ein Fehler den Verlust oder die Einschränkung einer Funktion. Bei der Bezeichnung von Fehlerarten wurde darauf geachtet, dass diese verständlich und eindeutig sind. Es sollte weitgehend auf Formulierungen wie beispielsweise unzureichend, fehlerhaft oder nicht ok verzichtet werden. Ein Fehler ist eine unzulässige Abweichung von mindestens einer Anforderung und kann durch ein Merkmal überprüft werden. Das bedeutet aus der Negation einer Anforderung in Verbindung mit einem quantifizierbaren Merkmal können auch quantifizierbare Fehlerarten abgeleitet werden.

Allgemein betrachtet haben Fehlfunktionen verschiedene charakteristische Eigenschaften und können in einzelne Kategorien eingeteilt werden. Die nachfolgende Abbildung 2-8 zeigt dies beispielhaft nach [AIAG & VDA (2019)].

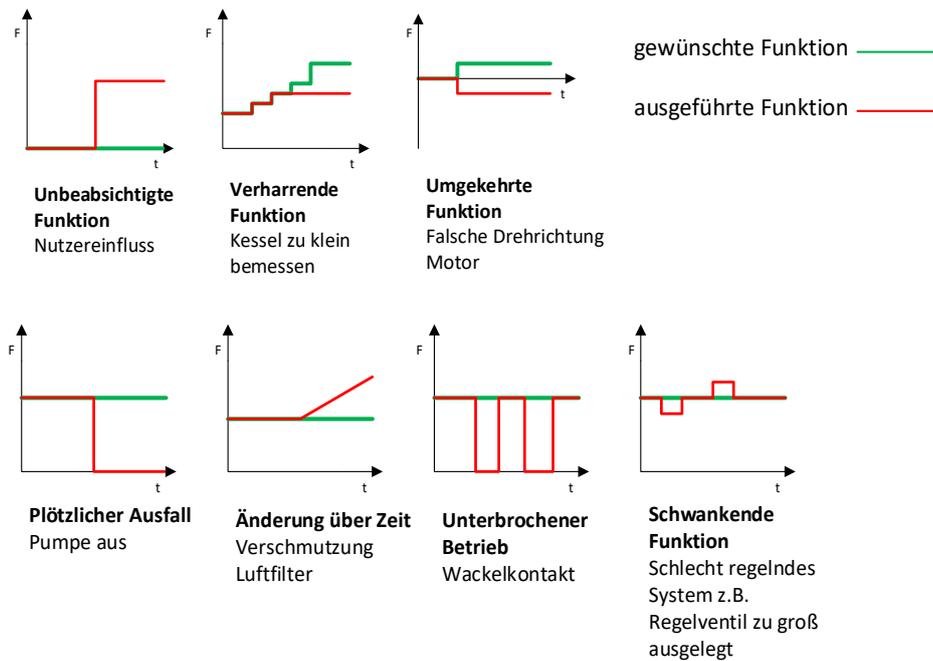


Abbildung 2-8: Mögliche Ausprägungen von Fehlfunktionen [AIAG & VDA (2019)]

Die Fehlfunktionen werden anschließend in einem Fehlernetz zueinander in Relation gesetzt und visualisiert. Als Beispiel ist ein Ausschnitt eines Fehlernetzes in Abbildung 2-9 zu sehen. Die Fehlerart „Vorlauftemperatur zu warm“ hat als mögliche Fehlerursache eine Fehlfunktion des 3-Wegeventils. Dies könnte wiederum einen undichten Ventilkegel, Verschmutzungen oder einen defekten Stellantrieb zur Ursache haben.



Abbildung 2-9: Beispiel Fehlernetz einer Beimisch-Schaltung für differenzdruckarme Verteiler oder WE ohne eigener Pumpe

Die Fehler werden, wie bei der Funktionsanalyse, im Fehlernetz mit logischen Operatoren verknüpft. Im Gegensatz zur Fehlerbaumanalyse (FTA) oder Ereignisablaufanalyse (ETA) sind jedoch nur logische Oder-Verknüpfungen zulässig. Aus den verknüpften Fehlerarten ergeben sich zumeist komplexe Fehlerszenarien. Diese bestehen aus den Fehlerarten, den Fehlerfolgen und den Fehlerursachen. Die Vorgehensweise bei der

Analyse ist die Fokussierung einer bestimmten Ebene. Für die Beschreibung eines Fehlerszenarios sind dann die Elemente der darunterliegenden Ebenen Fehlerursachen-Elemente und die aus den höher gelegenen Ebenen Fehlerfolgen-Elemente.

Die nachfolgende Abbildung 2-10 zeigt beispielhaft die Fehlerszenarien innerhalb der einzelnen Systemebenen (System bis zur Merkmalsebene) und den FMEA-Betrachtungsebenen für die am Gebäude und der technischen Gebäudeausrüstung beteiligten Akteure (z.B. Komponentenhersteller, Fachplaner, ausführende Firmen, Systemhersteller, Nutzer) in Anlehnung an [AIAG & VDA (2019)].

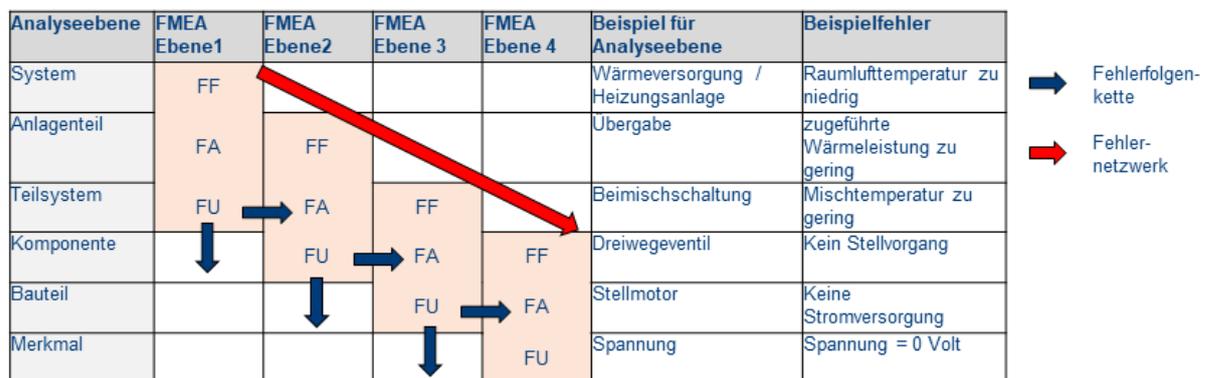


Abbildung 2-10: Fehlernetze und Fehlerketten in unterschiedlichen Betrachtungsebenen [AIAG & VDA (2019)]

Überwachungsmaßnahmen

Die 2019 eingeführte FMEA-Ergänzung für Monitoring und Systemreaktion sieht eine Erfassung und Bewertung vorhandener Überwachungsmaßnahmen vor. Dies sind Maßnahmen durch die aufgetretenen Fehlerursachen, Fehlerarten und Fehlerfolgen erkannt werden können. Weiterhin werden die anschließende Informationskette und die darauffolgende Reaktion auf den Fehler analysiert. Dabei wird die Überwachungsmaßnahme mit dem Parameter „Monitoring“ bewertet. Auf Grundlage dieser Bewertung kann eine anschließende Optimierung der Überwachungsmaßnahmen erfolgen. Ziel ist die Verringerung der Fehlerauswirkungen durch eine Systemreaktion in einer definierten Zeitspanne [AIAG & VDA (2019)]. Der gesamte Prozess zur Überwachung von technischen Systemen wird als Fehlererkennung und Diagnose (FED) bezeichnet.

In diesen einzelnen Prozessschritten werden für einen fehlerhaften Systemzustand der Eintrittszeitpunkt, der Fehlerort oder die Fehlerursache und die Fehlerart näher bestimmt. Der erste Schritt, die Fehlererkennung, dient zunächst der Feststellung eines fehlerhaften Systemzustands. Anhand der Fehlerisolation wird eingegrenzt, in welchem Systemelement der Fehler aufgetreten ist. Er beschäftigt sich also mit der Lokalisierung der Fehlerursache auf einer niedrigeren Systemebene. Im letzten Schritt, der Fehleridentifikation, findet die Zuordnung zu einer möglichen Fehlerart mit optionaler

Bewertung (bspw. Ermittlung eines Schweregrades) statt. Voraussetzung hierfür ist, dass viele Fehlermöglichkeiten erfasst sind. Die Fehleridentifikation kann jedoch immer nur eine Vermutung sein, da nicht alle Fehlermöglichkeiten bei der Analyse erfasst werden können.

Für die einzelnen Teilbereiche gibt es unterschiedliche Verfahren, welche sich zumeist nur für bestimmte Fehlerarten eignen. Ziel ist es einer bestimmten Fehlerart eine geeignete FED-Methode für jeden der oben beschriebenen Teilbereiche zuzuordnen. Es müssen zunächst Fehlermerkmale gefunden werden, mit denen eine Überprüfung vorhandener FED-Methoden auf deren Eignung erfolgen kann. Eignen sich mehrere Methoden so muss entschieden werden, welche Methode für den jeweiligen Anwendungsfall am besten geeignet ist. Hierfür müssen im Vorfeld verschiedene Entscheidungskriterien festgelegt werden.

2.3.6 Risikobewertung

Im Rahmen der Fehleranalyse werden mögliche Fehlfunktionen ermittelt und ausführlich untersucht. Ein wesentlicher Bestandteil einer solchen Fehleranalyse ist die Risikobewertung möglicher Fehlerursachen bzw. deren Folgen.

Für eine solche Risikobewertung stehen verschiedene Möglichkeiten und Werkzeuge zur Verfügung, die im Folgenden übersichtlich vorgestellt werden sollen. Anschließend erfolgt die Festlegung einer bestimmten Vorgehensweise. Risiko wird im Rahmen einer FMEA grundsätzlich nach drei Kriterien beurteilt:

- Bedeutung B der Fehlerfolge,
- Auftretenswahrscheinlichkeit A der Fehlerursache,
- Entdeckungswahrscheinlichkeit E der Fehlerursache, der Fehlerart bzw. der Fehlerfolge

Beurteilungen werden in den Zahlen von 10 bis 1 ausgedrückt, wobei 10 für hohes Risiko oder schlecht und 1 für geringes Risiko oder gut steht. Durch Einzelbetrachtungen und verschiedene Kombinationen dieser drei Faktoren können dann Priorisierungen vorgenommen werden.

Bedeutung (B)

Die Bedeutung B bewertet die Auswirkung der Fehlerfolge auf der obersten Ebene. Die Bewertung erfolgt nach einem Katalog, der für jede Produktgruppe/Prozess zu erstellen ist.

Auftretenswahrscheinlichkeit (A)

Die Bewertung der Auftretenswahrscheinlichkeit A einer Fehlerursache wird unter Berücksichtigung aller Vermeidungsmaßnahmen durchgeführt. Sie gibt die Einschätzung

der Fachexperten wieder und muss nicht durch Auswertungen nachgewiesen werden. Nicht abgeschlossene Maßnahmen sind zu kennzeichnen. Die Bewertungszahl ist keine absolute Maßzahl und die daraus folgende Risikobewertung kann somit immer nur relativ angenommen werden.

Entdeckungswahrscheinlichkeit (E)

Die Entdeckungswahrscheinlichkeit E bewertet die getroffene Entdeckungsmaßnahme. Dies sollte sich möglichst auf die Fehlerursache beziehen. Aus technischen- und Kostengründen kann auch eine Entdeckung des Fehlers oder der Fehlerfolge sinnvoll sein. Trotzdem müssen die Bewertungen auf die jeweilige einzelne Ursache bezogen werden, da diese bei gleicher Maßnahme unterschiedlich deutlich gefunden werden kann. Nicht abgeschlossene Maßnahmen sind darüber hinaus zu kennzeichnen.

Diese Entdeckungswahrscheinlichkeit ist ein Maß für die Wahrscheinlichkeit, mit der die angenommene Fehlerursache bzw. der mögliche Fehler noch rechtzeitig vor dem Erreichen des Schadensfalls erkannt werden kann. Je früher der Fehler entdeckt wird, desto günstiger wirkt sich dies für Kapazitäten und Gesamtkosten aus.

2.3.7 Methoden zur Kritikalitätsbeurteilung

Risikoprioritätszahl

Die Risikoprioritätszahl RPZ „wird üblicherweise für jede identifizierte Ausfallart berechnet und ist ein Produkt der drei Kategorien von Schwere, Auftretensfrequenz und Aufdeckungsmöglichkeit“ [DIN EN 60812 (2015), S.42].

$$RPZ = B \times A \times E$$

Die Skala für die RPZ hängt von den Skalen der drei Parameter ab, wobei diese Werte fast immer ordinale Bewertungsskalen von 1 bis 10 benutzen, was eine kombinierte RPZ-Skala von 1 – 1 000 entstehen lässt.

Die Schweregrade für B, A und E werden über Tabellen bestimmt, in denen jede Einstufung mit einem beschreibenden Satz verknüpft wird, der den Analysten in der Wahl des Ranges unterstützt. Es ist wesentlich, dass die Skalen gleichmäßig angewendet werden, damit die Parameter exakt und konsistent eingeschätzt werden.

Es sollte angemerkt werden, dass eine RPZ-Bewertung subjektiv ist, da sie ein Produkt aus drei Zahlen ist, die normalerweise selbst subjektiv sind. Der Vergleich der RPZ-Werte vor und nach Änderungen in einem Design, der Betriebsumgebung oder der

Möglichkeiten zur Aufdeckung kann genutzt werden, um eine qualitative Indikation der erreichten Verbesserung zu liefern.

Obwohl die RPZ-Methode einfach und intuitiv ist, sollte bedacht werden, dass wegen der ordinalen Skalen die Ergebnisse nicht die relative Wichtigkeit der Ausfallarten anzeigt, nur dass eine größer oder kleiner als die andere ist. Die Anordnung der Ränge wird auch beeinflusst davon, wie die Skalen aufgesetzt wurden. Dieselbe RPZ kann oft mit mehreren Kombinationen von zusammengesetzten Werten erreicht werden und die relative Wichtigkeit dieser Zusammensetzungen beachtlich variieren. Dies kann die Möglichkeit, aus dem Vergleich der RPZ-Werte eine Bedeutung abzuleiten, wesentlich beeinflussen. Wenn Schlüsse aus einem RPZ-Wert oder aus dem Vergleich der Werte gezogen werden sollte, muss Folgendes in Erwägung gezogen werden:

- Die RPZ-Skala ist nicht kontinuierlich. Zum Beispiel bleibt mit Skalen von 1 bis 10 88 Prozent des Wertebereiches leer, und nur 120 von 1.000 Zahlen werden generiert da RPZ-Werte doppelt vorkommen.
- Relative Beziehungen zwischen Werten haben keine Bedeutung. Dies ist das Ergebnis daraus, dass die Skalen ordinal sind. Deshalb könnten die Unterschiede in RPZ-Werten vernachlässigbar erscheinen aber signifikant sein. Zum Beispiel können die Werte $B = 6$, $A = 4$ und $E = 2$ eine RPZ von 48 ergeben, während $B = 6$, $A = 5$ und $E = 2$ einen Wert von 60 ergeben. Der zweite Wert ist nicht nur leicht höher, während $A = 5$ eine 5-mal höhere Auftrittsfrequenz als bei $A = 4$ bedeuten kann.
- Ähnlich kann die RPZ empfindlich auf kleine Änderungen in Parametern sein. Eine kleine Änderung in einem Faktor hat eine offenbar viel größere Auswirkung, wenn die anderen Faktoren groß sind, gegenüber wenn diese Werte klein sind. (Beispiel: $9 \times 9 \times 3 = 243$ und $9 \times 9 \times 4 = 324$ gegenüber $3 \times 4 \times 4 = 36$ und $3 \times 4 \times 4 = 48$).

Im Allgemeinen ist sich die Fachwelt darüber einig, dass eine Verwendung der RPZ nicht als geeignete Risikobewertung empfohlen werden kann [Werdich (2012), S.110].

Priorisierung mit individuellen Grenzwerten

Aufgrund der zuvor beschriebenen Probleme und Restriktionen war und ist eine Weiterentwicklung der RPZ-Methodik erforderlich.

Eine mögliche Verbesserung der Aussagekraft bietet z.B. die Priorisierung mit individuellen Grenzwerten, vorgeschlagen durch den VDA. Deren Ablauf stellt sich wie folgt dar: [Werdich (2012), S.53]:

1. Selektiere alle Fehlerursachen, die zu einem Grenzwert für B führen.
2. Selektiere aus dieser Gruppe alle Fehlerursachen, die zu einem Grenzwert für A führen.
3. Selektiere davon alle Fehlerursachen, die zu einem Grenzwert für E führen.

Dieses Verfahren kann mehrmals für unterschiedliche Grenzwerte durchlaufen werden, so dass mehrere Gruppierungen mit unterschiedlicher Priorität gebildet werden.

Aufgrund der Tatsache, dass dieses Verfahren für die weiteren Ausführungen keine Rolle spielt, sei an dieser Stelle auf eine ausführliche Erläuterung verzichtet.

Risikomatrix

Die Analysemethode der Kritikalitätsmatrix ist eine weitere Risikobewertungsmethode, die qualitative oder semi-quantitative Einstufungen benutzt. Eine Anzahl diskreter Kategorien wird sowohl mit Wahrscheinlichkeit als auch Schweregraden verbunden, die dann in eine Matrix übertragen werden. Den Zellen in der Matrix wird dann ein Kritikalitätsgrad zugeordnet, der benutzt wird, um die durchzuführenden Handlungen zu beurteilen und über die Festlegung der Handlungen zu informieren [DIN EN 60812 (2015), S.40].

Die Arten von Auswirkungen und deren Schwere sollte in Begriffen definiert werden, die relevant für die betrachtete Einheit oder den betrachteten Prozess sind und die in eine ausreichende Anzahl von Kategorien unterteilt sind, um zu ermöglichen, dass in die komplette Bandbreite von Auswirkungen eingestuft und geeignet separiert wird.

Die Auswahl der Beschreibungen der Skalenwerte und ihre Bedeutungen sollten, unter Beachtung der Art und Weise, in welcher sie benutzt werden sollen, sorgfältig bedacht werden, da diese die während der Analyse getroffene Auswahl beeinflussen kann.

Die Schwere der Auswirkung wird üblicherweise in zumindest vier Abstufungen von maximal glaubwürdiger Auswirkung bis zur kleinsten Auswirkung von Interesse eingestuft (z.B. katastrophal, schwerwiegend, geringfügig, unbedeutend).

Für einige Analysen können mehr Abstufungen nötig sein, um zwischen bedeutungsvollen Abstufungen von Auswirkungen unterscheiden zu können, jedoch sind weniger als diese selten erforderlich, da die Beschreibungen zu allgemein für eine praktische Nutzung werden [DIN EN 60812 (2015), S.42].

Die Benutzung von numerischen Kategorien hat keine mathematische Bedeutung, ebenso wie die Reihenfolge, in der sie zugeteilt werden. Die Risikomatrix ermöglicht die

Klassifizierung des Risikos mit spezifisch festzulegenden Grenzwerten, allerdings ist dieser Ansatz nicht universell einsetzbar, da die Entdeckung völlig außer Acht gelassen wird [Werdich (2012), S.54].

Zahlenkombinationen

Die Automotive Industry Action Group (AIAG) schlägt nicht-arithmetische Kombination der Zahlenwerte vor.

BAE

Der Zahlenwert der Bedeutung, des Auftretens sowie der Entdeckung werden hintereinander geschrieben.

BA

Die Zahlenwerte der Bedeutung und des Auftretens werden hintereinander geschrieben.

Bei gleicher RPZ können so unterschiedliche Bewertungen erfolgen. Untersuchungen haben ergeben, dass beide Verfahrensweisen deutlich schlechtere Ergebnisse in Bezug auf die Risikobeurteilung generieren als die RPZ [Werdich (2012), S.56].

3D-Ampelfaktor

Die Risikomatrix drückt das Verhältnis von der Auftretenswahrscheinlichkeit E zum möglichen Ausmaß des Schadens B aus. Somit wird eine mögliche Entdeckung E der Fehlerursache ausgeklammert. Eine Berücksichtigung aller drei Bewertungskriterien als dreidimensionale Risikomatrix ermöglicht hingegen eine differenziertere und analytischere Einschätzung [Werdich (2012), S.56].

Die sich ergebene Darstellung einer Ursache als „ein Punkt im Würfelraum“ [Werdich (2012), S.56] bildet die Grundlage für die nachfolgende Erfassung der senkrechten Schatten auf die Flächen A/B, E/B sowie A/E.

Neben der ausführlichen Erläuterung des Verfahrens selbst, wird diesem in [Werdich (2012)] ein hohes Maß an Praxistauglichkeit, insbesondere in Bezug auf eine algorithmenbasierte und automatisierte Umsetzung (Vektor- und Matrixmethoden) zur Bewertung der Kritikalität einer Ursache, zugesprochen.

Im Rahmen einer Masterarbeit [Hesse (2019)] wurde die Anwendbarkeit des 3D-Ampelfaktors hinsichtlich der Risikobewertung gebäudetechnischer Anlagen untersucht und bewertet. Im Ergebnis dieser Arbeit steht eine modifizierte Variante der Methodik, durch die eine entsprechende Kritikalitätsbeurteilung mit Hilfe eines Excel-Tools ermöglicht wird. Eine entsprechende Validierung der angepassten Methodik bestätigt deren praxistaugliche Anwendbarkeit.

Risikograph

Der von Dr. Alexander Schloske entwickelte Risikograph „klappt den dreidimensionalen Raum hierarchisch auf eine Ebene“ [Werdich (2012), S.58]. Ein realisierter Vergleich zwischen dem 3D-Ampelfaktor und dem Risikograph weist dem zuletzt genannten

- eine schlechtere Auflösung und Genauigkeit,
- eine äquivalente Umsetzung von Algorithmen,
- ein schlechteres Nachvollziehen der Zusammenhänge,
- eine bessere Praktikabilität und schnellere Bestimmung,
- eine früher eintretende Unübersichtlichkeit in Bezug auf die Anzahl der Felder,
- eine vergleichsweise schlechtere Lösbarkeit der Menge der verschiedenen Farben und deren Bestimmung sowie
- einen erhöhten Aufwand bei vierdimensionalen Räumen

nach. Folglich erfolgt das Aussprechen einer Empfehlung zu Gunsten des 3D-Ampelfaktors [Werdich (2012), S.60].

Fuzzy-Logik

Die Verwendung von Fuzzy-Logik zur Risikobewertung ist zu einer wichtigen Forschungsrichtung geworden, die zunehmend Beachtung findet. Ein entscheidender Vorteil ist, dass die Berücksichtigung von Unsicherheit (z.B. Ignoranz und Unschärfe) bei der Festlegung von B, A und E möglich ist.

Grundsätzlich werden dabei linguistische Variablen (z.B. hoch, niedrig, warm, kalt) in Zahlenwerte umgewandelt, um diese zur Bestimmung einer RPZ-Zahl verwenden zu können.

Zur Umsetzung ist eine große Datenmenge erforderlich, um die sogenannten Zugehörigkeitsfunktionen möglichst präzise entwickeln zu können. Da diese Datensammlung im Bereich der Betriebsphase von gebäudetechnischen Anlagen nicht vorliegt, wird diese Methode vorerst zurückgestellt.

Wie in den vorangegangenen Ausführungen zu sehen ist, existiert eine Vielzahl verschiedener Werkzeuge zur Risikobeurteilung innerhalb der Fehleranalyse einer FMEA. Einige dieser Methodiken weisen eine gute Handhabbarkeit sowie Umsetzbarkeit auf, wohingegen einige dieser Verfahren nur bedingt seriöse Aussagen generieren und somit nur begrenzt zu verwenden sind.

Das Ziel dieser übersichtlichen Darstellung war es, neben der Möglichkeit einer Zusammenfassung existierender Möglichkeiten, eine bestimmte Methodik für das weitere

Vorgehen auszuwählen und – eventuell modifiziert – für die weiteren Untersuchungen und Analysen zu nutzen.

Obwohl der 3D-Ampelfaktor ein sehr gutes Werkzeug darstellt, welches darüber hinaus gut handhabbar ist und im Rahmen einer Masterarbeit [Hesse (2019)] bereits auf die Erfordernisse gebäudetechnischer Anwendungen adaptiert wurde, fiel die Entscheidung zuletzt auf eine weitere Methodik, deren Grundlagen sowie Umsetzung im nachfolgenden Abschnitt thematisiert wird.

2.3.8 Risikoanalyse und Aufgabenpriorität

Die Durchführung einer Risikoanalyse zur anschließenden Ermittlung einer Aufgabenpriorität stammt aus der gemeinsamen Erarbeitung eines FMEA-Handbuches der AIAG und des VDA [AIAG & VDA (2019)]. Darin erfolgt, ähnlich den bisherigen Ansätzen, eine Einteilung in die Faktoren

- Bedeutung B der Fehlerfolge,
- (Aufretens-) Häufigkeit H der Fehlerursache sowie
- Monitoring M als Güte der Überwachungsfunktion (Entdeckung E).

Die Bewertung folgt der bereits bekannten Skalierung von 1 bis 10, wobei 10 jeweils für den höchsten Risikobetrag steht.

Eine Bewertung der drei Faktoren erfolgt durch in Tabellen festgelegte Kriterien, welche für den Automobilbereich durch das erwähnte Handbuch bereits existieren. Im Ergebnis dieser Einzelbewertungen steht die Festlegung einer *Aufgabenpriorität* (Priorisierung des Handlungsbedarfs).

Die Aufgabenpriorität selbst wird dabei ebenfalls in drei Kriterien unterteilt:

- Priorität Hoch (H)
- Priorität Mittel (M)
- Priorität Niedrig (N)

Die Bewertung und Einteilung dient der Festlegung der Maßnahmenpriorität. Dabei gilt es stets, die Häufigkeit zu reduzieren und/oder das Monitoring zu verbessern.

In [AIAG & VDA (2019)] sind ausführliche Beschreibungen der Methodik zu finden, weshalb auf eine erneute Darstellung an dieser Stelle verzichtet sei. Die nachfolgenden Ausführungen beinhalten die konkrete Umsetzung bzw. Anpassung auf gebäudetechnische Anlagen.

Bedeutung

Die Bedeutung B einer Fehlerart charakterisiert stets die schwerwiegendste Fehlerfolge und berücksichtigt dabei nicht deren Häufigkeit und/oder deren Monitoring.

In den Ausführungen der Automobilbranche zielt die Bewertung der Bedeutung unter anderem auf sicherheitsrelevante Aspekte sowie die Bewertung von Komfortfunktionen und Qualitätsbeeinträchtigungen ab. Demnach wäre eine Übertragung dieser Aspekte auf gebäudetechnische Anlagen erforderlich.

Die Richtlinienreihe VDI 6010 „gilt für sicherheitstechnische Systeme in Gebäuden und in anderen baulichen Anlagen. Sie soll insbesondere Fachplaner, Bauherren und Betreiber, Behördenvertreter und ausführende Firmen bei der Planung und Ausführung sowie dem Betrieb von systemübergreifenden Funktionen in der Sicherheitstechnik mit Entscheidungshilfen und Empfehlungen unterstützen“ (vgl. [VDI 6010-1], S. 2). Zusammenfassend thematisiert die Richtlinie die Planung, die Errichtung sowie den Gebäudebetrieb von sicherheitstechnischen Anlagen und Einrichtungen für Gebäude. Entsprechend dieser Vorgaben erfolgt eine Risikoanalyse bezüglich der sicherheitstechnischen Anlagen und Einrichtungen für Gebäude, in deren Ergebnis ein Gesamtsicherungskonzept für ein Gebäude oder eine bauliche Anlage steht. Die richtlinieninhärente Konzeptionierung definiert dabei die Gebäudefunktionalität bestehend aus „normalen Nutzungsfunktionen“ sowie „für die Nutzungsfreigabe erforderlichen Funktionen“ (vgl. [VDI 6010-3], S. 2). Während Erstgenannte insbesondere die Behaglichkeitsanforderungen der Nutzer sicherstellen sollen, handelt es sich bei Letztgenannten um erforderliche Sicherheitsfunktionen, deren Einhaltung für die Freigabe der normalen Nutzungsfunktionen und folglich der Gesamt-Gebäudefunktionalität obligatorisch ist. Es ist ersichtlich, dass sich die Richtlinienreihe VDI 6010 mit insgesamt vier Teilen dezidiert mit der Berücksichtigung und Einhaltung gebäude- und anlagenspezifischer Sicherheitsaspekte auseinandersetzt. Die Einhaltung der formulierten Forderungen ist für den Gebäudebetrieb gewerkübergreifend zwingend notwendig.

Im weiteren Verlauf der Ausführungen wird die Beachtung und Umsetzung der VDI 6010 vorausgesetzt, weshalb auf die Beurteilung der Bedeutung von Fehlerarten in Bezug auf die Sicherheit der Nutzer in Zusammenhang mit der Kritikalitätsbeurteilung verzichtet wird. Festlegungen zur Kritikalitätsbewertung können Anhang A2-1 entnommen werden.

Häufigkeit

Für die FMEA gebäudetechnischer Anlagen ist die Auftretenshäufigkeit eines Fehlers während der Lebensdauer relevant. Diese Fehlerhäufigkeit kann oftmals lediglich abgeschätzt werden, da quantitative Datengrundlagen fehlen.

Begründungen für die Annahme der Fehlerhäufigkeiten können sein [AIAG & VDA (2019)]:

- Ergebnisse von FMEAs
- Felddaten über Rückläufer und beanstandete Teile
- Reklamationen
- Daten zu Garantie- und Kulanzkosten
- Kataloge mit Ausfallraten von Bauteilen

Grundsätzlich ist die Häufigkeit H ein Maß für das Auftreten einer Fehlerursache in relevanten Betriebssituationen während der geplanten Betriebsdauer [AIAG & VDA (2019)]. Die Einteilung erfolgt gemäß Anhang A2 Tabelle A2-2.

Darüber hinaus ist zu beachten, dass Fehler teilweise nur bei bestimmten Betriebsbedingungen mit zeitlich geringem Anteil an der Betriebszeit auftreten. Aus diesem Grund ist es möglich, die Bewertung der Häufigkeit H wie folgt zu reduzieren [AIAG & VDA (2019)]:

Tabelle 2-4: Beispiel Schnittstellenmatrix

Prozentualer Zeitanteil der relevanten Betriebsbedingungen im Vergleich zur Gesamtbetriebszeit	Wert, um den H verringert werden kann
< 10 %	1
< 1 %	2

Diese angegebenen Kriterien lassen sich nur schwer auf Komponenten der Gebäudetechnik übertragen.

Die erwartete Lebensdauer einer Komponente ist proportional zur erwarteten Zeit zwischen zwei Fehlern und damit umgekehrt proportional zur Fehlerrate der Komponente (vgl. [Eberlin et. al. (2014)], S.32). Damit ist die Lebensdauer ein Kriterium, welches zur Bewertung der Häufigkeit von Fehlern herangezogen werden kann. Tritt ein Fehler auf wird dieser wieder beseitigt. Fehlern die vom Anlagenbetreiber/Nutzer unbemerkt bleiben, können im Rahmen einer Wartung entdeckt und behoben werden. Fehler die dem Nutzer/Betreiber im Anlagenbetrieb auffallen werden durch Instandhaltungsmaßnahmen beseitigt. Der Aufwand für Wartungs- und Instandsetzungsarbeiten soll als weiteres Kriterium zur Bewertung der Fehlerhäufigkeit von Komponenten genutzt werden. Richtwerte für Nutzungsdauern sowie Aufwände für Wartung und Instandhaltung sind für eine Vielzahl von gebäudetechnischen Komponenten in der Richtlinie VDI 2067 Blatt 1 Tabelle A1 angegeben.

Festlegungen für die Bewertung nach der angegebenen Lebensdauer:

- Beträgt die Lebensdauer einer Komponente 50 a wird die Fehlerhäufigkeit mit 2 bewertet (Fehlerursache tritt vermutlich während der Lebensdauer der Anlage nicht auf)
- Beträgt die Lebensdauer einer Komponente 0 a wird die Fehlerhäufigkeit mit 10 bewertet (Häufigkeit des Auftretens während der erwarteten Lebensdauer der Gesamtanlage inakzeptabel hoch)
- Liegt die Lebensdauer einer Komponente zwischen 0 und 50 a wird die Häufigkeit linear interpoliert
- Die maximale Bewertung der Häufigkeit ist 10
- Die minimale Bewertung der Häufigkeit ist 1

Festlegungen für die Bewertung nach dem angegebenen Aufwand für Wartung und Instandhaltung:

- Beträgt der Aufwand einer Komponente 0 %/a wird die Fehlerhäufigkeit mit 1 bewertet (Fehlerursache kann während der erwarteten Lebensdauer der Gesamtanlage nicht auftreten)
- Beträgt der Aufwand einer Komponente 15 %/a wird die Fehlerhäufigkeit mit 10 bewertet (Häufigkeit des Auftretens während der erwarteten Lebensdauer der Gesamtanlage inakzeptabel hoch)
- Liegt die Lebensdauer einer Komponente zwischen 0 und 15 %/a wird die Häufigkeit linear interpoliert
- Die maximale Bewertung der Häufigkeit ist 10
- Die minimale Bewertung der Häufigkeit ist 1

Jede Komponente wird nach ihrer Lebensdauer sowie dem Aufwand für Wartung und Instandsetzung bewertet. Das gerundete arithmetische Mittel der beiden Bewertungen ist dann die genutzte Fehlerhäufigkeit H einer Komponente. Eine Beurteilung der Häufigkeit einzelner Fehler in einer Komponente ist auf Grund der Datenlage nicht möglich.

In Anhang A2 Tabelle A2-3 sind die berechneten Häufigkeiten H für einige gebäudetechnische Komponenten aufgeführt.

Monitoring

Monitoring M ist als Maß für die Fähigkeit, einen Fehler zu erkennen und die Fehlerreaktion so zu gestalten, dass ein den Vorgaben entsprechender Betrieb aufrechterhalten werden kann, zu verstehen. Es wird demnach die Güte bewertet, mit der die Fehlerursache, Fehlerart oder Fehlerfolge rechtzeitig entdeckt werden kann, um die ursprüngliche Fehlerfolge zu verändern. Im Ergebnis steht eine Fehlerfolge mit niedriger Bedeutung B [AIAG & VDA (2019)].

Die Monitoring-Bewertung erfolgt unabhängig von Bedeutung B und Häufigkeit H und bezieht sich auf die Möglichkeiten von Sensoren und der menschlichen Wahrnehmung, Fehler zu entdecken und darauf zu reagieren. Eine Einteilung der jeweiligen Bewertung und Zuordnung von gebäudetechnischen Fehlertypen ist der Anhang A2 Tabelle A2-4 zu entnehmen.

Aufgabenpriorität (AP)

Mit Hilfe der Aufgabenpriorität AP werden die Maßnahmen zur Risikoreduzierung priorisiert¹. Dabei bilden die Bewertungszahlen der Bedeutung B, der Häufigkeit H sowie des Monitoring M die Grundlage der Risikobewertung.

Die Aufgabenpriorität wird, wie nachfolgend erläutert, eingeteilt:

Priorität Hoch (H)

- Hohe Review- und Maßnahmenpriorität
- Angemessene Maßnahme(n) müssen festgelegt werden, um die Häufigkeit und/oder das Monitoring zu verbessern oder
- Begründen und dokumentieren, warum die getroffenen Maßnahmen ausreichend sind

Priorität Mittel (M)

- Mittlere Review- und Maßnahmenpriorität
- Angemessene Maßnahme(n) sollten festgelegt werden, um die Häufigkeit und/oder das Monitoring zu verbessern oder
- Begründen und dokumentieren, warum die getroffenen Maßnahmen ausreichend sind

Priorität Niedrig (N)

- Niedrige Review- und Maßnahmenpriorität
- Angemessene Maßnahme(n) können festgelegt werden, um die Häufigkeit und/oder das Monitoring zu verbessern

In [AIAG & VDA (2019)] wird eine Empfehlung zur Überprüfung der Fehlerfolgen mit einer Bedeutung von 9 und 10 sowie einer hohen oder mittleren Aufgabenpriorität ausgesprochen.

Die Aufgabenpriorität als Kombination aus Bedeutung B, Häufigkeit H sowie Monitoring M kann der im Anhang A2 befindlichen Tabelle A2-2 entnommen werden.

¹ Die Aufgabenpriorität dient nicht zur Priorisierung von hohen, mittleren und niedrigen Risiken (vgl. [AIAG & VDA (2019)]).

Im Anhang A2-6 und A5-3 sind verschiedene Anwendungsbeispiele aus dem Bereich der Heizungs- und Raumluftechnik aufgeführt.

2.4 Fehlerdatenbank und FMEA-Modulbibliothek

Für die Dokumentation der FMEA-Ergebnisse war die Erfassung ausgewählter Informationen in einer Datenbank vorgesehen. Diese sollte die folgenden Grundfunktionalitäten bereitstellen:

- Bibliothek für Fehlerarten typischer TGA-Komponenten
- Erfassung der Ergebnisse nach der Methodik der FMEA
- Beschreibung und Bewertung von Fehlerszenarien
- Dokumentation von FED-Methoden mit Quellenverwaltung

Die Fehlerdatenbank wurde als relationale Datenbank in MS-Access umgesetzt und soll zur Dokumentation von verschiedenen Fehlermöglichkeiten, welche in gebäudetechnischen Anlagen auftreten können, dienen. Als zusätzliche Informationen sollen mögliche Fehlererkennungs- und -diagnosemethoden sowie die hierfür erforderlichen Informationen wie physische und virtuelle Datenpunkte angezeigt werden. Die Ergebnisse können bspw. als Planungsgrundlage für eine, an die vorhandene Anlagentechnik angepasste, Betriebsüberwachung dienen. Anhand der FMEA-Methodik wird in der Datenbank der Systemaufbau gebäudetechnischer Anlagen durch einzelne System-Elemente abgebildet. Den System-Elementen werden mögliche Fehlerarten zugeordnet.

Die einzelnen Anlagen sollen nach den Gewerken Heizungstechnik, Raumluftechnik und Warmwasserbereitung geordnet werden. Die vorgegebene Datenstruktur sollte hinsichtlich einer zukünftigen Aufschlüsselung in zusätzliche Unterkategorien einfach erweiterbar sein. Die einzelnen Anlagentypen sind hierarchisch aufgebaut und bestehen aus verschiedenen Teilsystemen (Heizkessel, Luftherhitzer, Hydraulische Schaltungen), welche wiederum aus unterschiedlichen Komponenten (Pumpen, Ventilen) und Bauteilen (Motor, Pumpenrad, Gehäuse) zusammengesetzt sind. Hieraus ergeben sich verschiedene Systemebenen, denen die Fehler indirekt zugeordnet sind.

Die Fehlerarten sind jeweils einem oder mehreren Elementen der Systemstruktur zugeordnet und können eine oder mehrere Fehlerursachen und Fehlerfolgen haben. Die Definition ist abhängig vom Fokus der Fehlerbetrachtung. Wird der Fokus auf eine andere Systemebene oder ein anderes Systemelement gerichtet, so kann eine Fehlerart auch zur Fehlerursache oder Fehlerfolge einer anderen Fehlerart werden. Zur Verhinderung von inkonsistenter Eingabe durch mehrere Nutzer sollen die Fehlerarten standardisiert werden und in Bibliotheken abgelegt sein. Die Fehlerarten sollen in unterschiedliche

Fehlerkategorien eingeteilt werden. Dies ermöglicht die statistische Auswertung hinsichtlich der Auftretenshäufigkeit eines Fehlers einer bestimmten Kategorie innerhalb der Datenbank.

Für die einzelnen Fehlerarten werden unterschiedliche Quellen genutzt. Diese sind bspw.: Rechercheergebnisse aus Literatur / Internet, Monitoring- und Forschungsprojekten, aufgetretene Fehler in Versuchs- und Demonstrationsanlagen und Fehler aus der Systemanalyse (FMEA-Methode). Die Anforderung der Datenstruktur hinsichtlich der System- und Fehlerbeschreibung erfolgt anhand der Methodik der FMEA. Die Quelldokumente können als PDF-Datei in einer externen Datenbank abgelegt sein.

Die Datenbank bietet weiterhin die Möglichkeit zur Risikobewertung eines Fehlerzustandes anhand der Methodik der FMEA-Aufgabenpriorität. Die 2019 im Rahmen der FMEA-Harmonisierung des AIAG und VDA neu eingeführte FMEA-MSR sieht hierbei die Parameter Bedeutung der Fehlerfolge (B), Häufigkeit der Fehlerursache (H) und Güte der vorhandenen Überwachungsfunktion (M) vor.

2.5 Erarbeitung von Heizanlagenstrukturen in der FMEA

2.5.1 Grundstruktur der Heizung

Es wird zu Beginn eine Grundstruktur erarbeitet, die es ermöglicht eine Vielzahl von Heizungsanlagen abzubilden.

Jede Anlage, die mit Hilfe der FMEA untersucht wird, soll aus mehreren Systemelementen bestehen. Das erste Element ist die Anforderungsebene. In diesem sind Anforderungen der Nutzer und Anlagenbetreiber an die Heizungsanlage definiert. An das Element Anforderungsebene schließt sich das Element Heizungsanlage an. Darin sind Funktionen und Anforderungen festgelegt, um die Erwartungen der Nutzer und Anlagenbetreiber zu erfüllen. An das Element Heizungsanlage schließen sich die Elemente Übergabe, Verteilung, Speicherung und Wärmeerzeugung an.

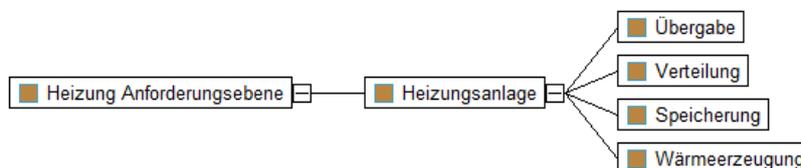


Abbildung 2-11: Strukturbaum einer allgemeinen Heizungsanlage

Jedes dieser Elemente besitzt Funktionen, Anforderungen und Fehlfunktionen, die möglichst allgemeingültig mit dem Element Heizungsanlage verknüpft werden um einen Großteil der denkbaren Heizungsanlagen abbilden zu können. Der allgemeine Strukturbaum ist in Abbildung 2-11 zu sehen.

An die Elemente rechts in der Abbildung können FMEA-Module von Komponenten oder Teilsystemen angeschlossen werden. In den nächsten Abschnitten des Kapitels 1 wird auf die festgelegten Funktionen, Anforderungen und Fehlfunktionen, der in Abbildung 2-11 dargestellten Elemente eingegangen.

2.5.2 Anforderungsebene

Dieses Element hat die Forderung, dass die Nutzeransprüche erfüllt werden sollen. Diese sind Behaglichkeit, Warmwasserbereitung, niedrige Betriebskosten und ein ökologischer Anlagenbetrieb. Den Anforderungen werden in Anlehnung an die Ausarbeitung zur Aufgabenpriorität Fehler zugeordnet. Die Festlegungen für die Anforderungsebene können Tabelle 2-5 entnommen werden.

Tabelle 2-5: Funktion, Anforderungen und Fehlfunktionen der Anforderungsebene

Funktion	Anforderung	Fehler
Nutzungsanforderungen erfüllen	Behaglichkeit	Kleiner Nutzerkreis: zu warm
		Gesamter Nutzerkreis: zu kalt
		Nutzerkreis eines Teilsystems: zu kalt
		Kleiner Nutzerkreis: zu kalt
	Warmwasser	Warmwasser zu heiß (Verbrühungsgefahr)
		Warmwasser zu kalt (Legionellengefahr/Komfortmangel)
	niedrige Betriebskosten	erhöhte Betriebskosten durch Gesamtanlage bzw. mehrere Teilsysteme
		erhöhte Betriebskosten durch ein Teilsystem
		erhöhte Betriebskosten durch einen Teilbereich
	Ökologisch	erhöhte Umweltbelastung durch Gesamtanlage bzw. mehrere Teilsysteme
		erhöhte Umweltbelastung durch ein Teilsystem
		erhöhte Umweltbelastung durch einen Teilbereich

2.5.3 Heizungsanlage

Die Heizungsanlage hat die Funktion der Raumheizung. Dieser Funktion sind die Anforderungen hinreichend Wärme bereitstellen und effizient zugeordnet. Die sich ergebenden Fehler sind mit ihrer Folge in der Anforderungsebene verknüpft. In Tabelle 2-6 sind die Festlegungen dargestellt.

Tabelle 2-6: Funktion, Anforderungen und Fehlfunktionen der Heizungsanlage

Funktion	Anforderung	Fehler	Fehlerfolge in Anforderungsebene	
Raumheizung	hinreichend Wärme bereitstellen	zu viel Wärme bereitgestellt	Kleiner Nutzerkreis: zu warm	
		Gesamtanlage: zu wenig Wärme bereitgestellt	Gesamter Nutzerkreis: zu kalt	
		Teilsystem: zu wenig Wärme bereitgestellt	Nutzerkreis eines Teilsystems: zu kalt	
		Abschnitt eines Teilsystems: zu wenig Wärme bereitgestellt	Kleiner Nutzerkreis: zu kalt	
	Effizienz	Ineffizienz der Gesamtanlage oder mehrere Teilsysteme		erhöhte Betriebskosten durch Gesamtanlage bzw. mehrere Teilsysteme
				erhöhte Umweltbelastung durch Gesamtanlage bzw. mehrere Teilsysteme
		Ineffizienz eines Teilsystems		erhöhte Betriebskosten durch ein Teilsystem
				erhöhte Umweltbelastung durch ein Teilsystem
		Ineffizienz eines Teilbereichs		erhöhte Betriebskosten durch einen Teilbereich
				erhöhte Umweltbelastung durch einen Teilbereich

2.5.4 Bestandteile der Heizungsanlage

2.5.4.1 Übergabe

Die Übergabe hat die Funktion Wärme an den Raum zu übergeben. Die definierten Fehler und Folgen sind in Tabelle 2-7 zu sehen. Fehler der Übergabe sollen sich entweder auf einen kleinen Bereich der Heizungsanlage auswirken (z.B. Heizkörper) oder auf ein Teilsystem (z.B. Lufterhitzer) Einfluss haben. Die Fehlerursachen ergeben sich erst aus den an der Übergabe angeschlossenen FMEA-Komponentenmodule.

Tabelle 2-7: Funktion, Anforderungen und Fehlfunktionen der Übergabe

Funktion	Fehler	Fehlerfolge	Fehlerursachen
	zu viel Wärme an Raum	siehe Ineffizienz und Heizungsanlage: Teilbereich zu viel Wärme bereitgestellt	Fehler der Übergabe aus angeschlossenem FMEA-Modul
	zu wenig Wärme an Raum	Heizungsanlage: Teilbereich zu wenig Wärme bereitgestellt	
	Ineffizienz	Heizungsanlage: Ineffizienz eines Teilbereichs	
Übergabe an Teilsystem	zu viel Wärme an Teilsystem	siehe Ineffizienz und Heizungsanlage: Teilsystem zu viel Wärme bereitgestellt	Fehler der Übergabe aus angeschlossenem FMEA-Modul
	zu wenig Wärme an Teilsystem	Heizungsanlage: Teilsystem zu wenig Wärme bereitgestellt	
	Ineffizienz	Heizungsanlage: Ineffizienz eines Teilsystems	

2.5.4.2 Verteilung

Die Verteilung hat die Funktion Wärme aus einem Speicher oder von einem Wärmeerzeuger zur Übergabe zu verteilen. Tritt ein Fehler in der Verteilung auf hat dieser Auswirkungen auf ein ganzes Teilsystem. Die Fehlerursachen ergeben sich erst aus den an der Verteilung angeschlossenen FMEA-Modulen der hydraulischen Schaltungen. Fehler des Wärmeerzeugers oder des vorgeschalteten Speichers sind keine Fehlerursache der Verteilung, da es sich um einen Fehler handelt der sich auf die

gesamte Heizungsanlage und nicht nur auf ein Teilsystem auswirkt. Die definierten Fehler und Folgen sind in Tabelle 2-8 zu sehen.

Tabelle 2-8: Funktion, Anforderungen und Fehlfunktionen der Verteilung

Funktion	Fehler	Fehlerfolge in	Ursachen
Wärmeverteilung an Raumheizung	zu wenig Wärme an Übergabe	Heizungsanlage: Teilsystem zu wenig Wärme bereitgestellt	Fehler der Verteilung aus FMEA-Modul
	Ineffizienz	Heizungsanlage: Ineffizienz eines Teilsystems	

2.5.4.3 Speicherung

Das Element Speicherung hat die Funktion Wärmedifferenzen zwischen der Wärmebereitstellung und Übergabe/Verteilung auszugleichen. Dazu muss der Speicher mit Wärme be- und entladen werden können. Dies sind mit der Effizienz die Anforderungen an die Funktion. Die Fehlerfolgen des Speichers wirken sich auf die Funktion und Effizienz der Gesamtanlage aus. Fehler einer zu großen Be- und Entladeleistung des Speichers haben ihre Ursache nicht im Speicher sondern in der Wärmebereitstellung bzw. Verteilung. Die Ursachen der übrigen Speicherfehler ergeben sich aus den an das Element angeschlossenen FMEA-Modulen. Die getroffenen Festlegungen sind in Tabelle 2-9 zu sehen.

Tabelle 2-9: Funktion, Anforderungen und Fehlfunktionen der Speicherung

Funktion	Anforderung	Fehler	Fehlerfolge	Ursachen
Wärmedifferenzen zwischen Erzeugung und Übergabe ausgleichen	Wärme laden	Ladeleistung zu groß	Ineffizienz der Gesamtanlage oder mehrere Teilsysteme	-
		Ladeleistung zu klein	Gesamtanlage: zu wenig Wärme an Raumheizung	Fehler der Speicherung aus FMEA-Modul
	Wärme entladen	Entladeleistung zu groß	Ineffizienz der Gesamtanlage oder mehrere Teilsysteme	-
		Entladeleistung zu klein	Gesamtanlage: zu wenig Wärme an Raumheizung	Fehler der Speicherung aus FMEA-Modul
	Effizienz	Ineffizienz	Ineffizienz der Gesamtanlage oder mehrere Teilsysteme	Fehler der Speicherung aus FMEA-Modul

2.5.4.4 Wärmebereitstellung

Die Wärmebereitstellung hat die Aufgabe eine beliebige Energieart in Wärme umzuwandeln und der Heizungsanlage bereitzustellen. Fehler der Wärmebereitstellung können sich auf die Funktion und Effizienz der gesamten Heizungsanlage auswirken. Die Folge einer zu großen Wärmeerzeugerleistung ist in den Ursachen für eine ineffizienten Wärmebereitstellung enthalten. Die Fehlerursachen ergeben sich aus den an das Wärmeerzeugerelement angeschlossenen FMEA-Modulen. Tabelle 2-10 stellt die getroffenen Festlegungen dar.

Tabelle 2-10: Funktion, Anforderungen und Fehlfunktionen der Wärmebereitstellung

Funktion	Fehler	Fehlerfolge in	Ursachen
Energieumwandlung in Wärme	Erzeugerleistung zu groß	Ineffizienz der Gesamtanlage oder mehrere Teilsysteme	in den Fehlerursachen der Ineffizienz enthalten
	Erzeugerleistung zu klein	Gesamtanlage: zu wenig Wärme an Raumheizung	Fehler der Erzeugung aus FMEA-Modul
	Ineffizienz	Ineffizienz der Gesamtanlage oder mehrere Teilsysteme	Fehler der Erzeugung aus FMEA-Modul

2.5.5 Fehlernetze der Grundstruktur

2.5.5.1 Funktionseinschränkende Fehler

Fehler: Kleiner Nutzerkreis zu warm

In Abbildung 2-12 ist das Fehlernetz für den Behaglichkeitsfehler zu warm der Anforderungsebene zu sehen. Wird es einem Nutzerkreis eines Raumes zu warm sollte dies nur an der Übergabe/ den Heizflächen liegen, da diese die Raumtemperatur durch eine Massestromregulierung regeln sollten. Sind die Vorlauftemperatur oder der Massestrom durch die Verteilung zu hoch, sollte das Drosselventil der Übergabe diesen Makel ausgleichen können.

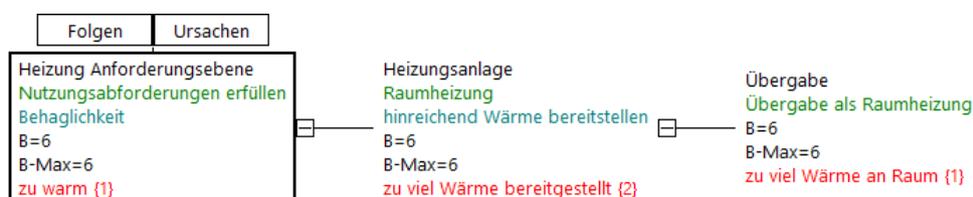


Abbildung 2-12: Fehlernetz Heizungsanlage Grundstruktur: Anforderungsebene zu warm

Fehler der Verteilung sind also nicht als Ursachen aufgeführt. Es liegt eine Funktionsbeeinträchtigung für einen kleinen Teilbereich vor was, nach den Festlegungen zur Aufgabenpriorität, zu einer Fehlerbedeutung B = 6 führt. An den Fehler „zu viel Wärme

an Raum“ werden in weiteren Anlagenbetrachtungen spezifische Fehler der jeweiligen Heizflächen-FMEA-Module gekoppelt.

Fehler: Kleiner Nutzerkreis zu kalt

Abbildung 2-13 stellt das Fehlernetz des Behaglichkeitsfehlers „Kleiner Nutzerkreis zu kalt“ dar. Betrifft der Fehler nur den Nutzerkreis eines Raumes ist von einem Fehler der Übergabe auszugehen. Die Funktionsbeeinträchtigung liegt in einem kleinen Teilbereich vor und führt somit zu einer Fehlerbedeutung $B = 6$.

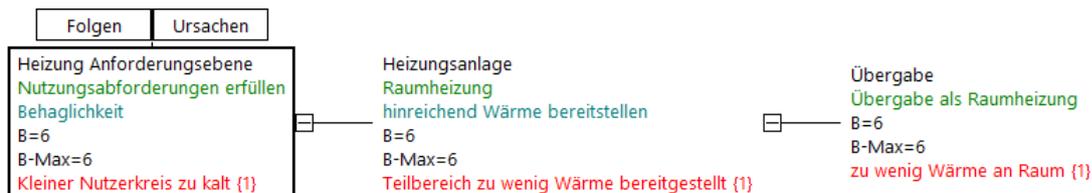


Abbildung 2-13: Fehlernetz Heizungsanlage Grundstruktur: Anforderungsebene Kleiner Nutzerkreis zu kalt

Fehler: Nutzerkreis eines Teilsystems zu kalt

Liegt bei einem größeren Nutzerkreis ein Behaglichkeitsfehler „zu kalt“ vor spricht dies für einen Fehler des Teilsystems durch die Verteilung. Die Funktion eines gesamten Teilsystems wird eingeschränkt und die Fehlerbedeutung ist $B = 8$. An den Fehler „Zu wenig Wärme an Raumheizung“ können spezifische Fehler der hydraulischen Schaltungen gekoppelt werden. Das Fehlernetz ist in Abbildung 2-14 zu sehen.

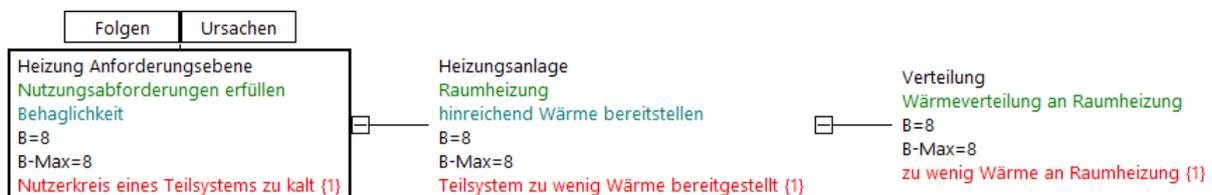


Abbildung 2-14: Fehlernetz Heizungsanlage Grundstruktur: Anforderungsebene Nutzerkreis eines Teilsystems zu kalt

Fehler: Gesamter Nutzerkreis zu kalt

Liegt bei dem gesamten Nutzerkreis der Behaglichkeitsfehler „Zu kalt“ vor ergibt sich das Fehlernetz in Abbildung 2-15. Bei diesem Fehler ist die Funktion der gesamten Anlage eingeschränkt und die Fehlerbedeutung ist mit dem Maximalwert $B=10$ bewertet. Ursachen für diesen Fehler sind in der Speicherung, Wärmebereitstellung und Druckhaltung möglich.

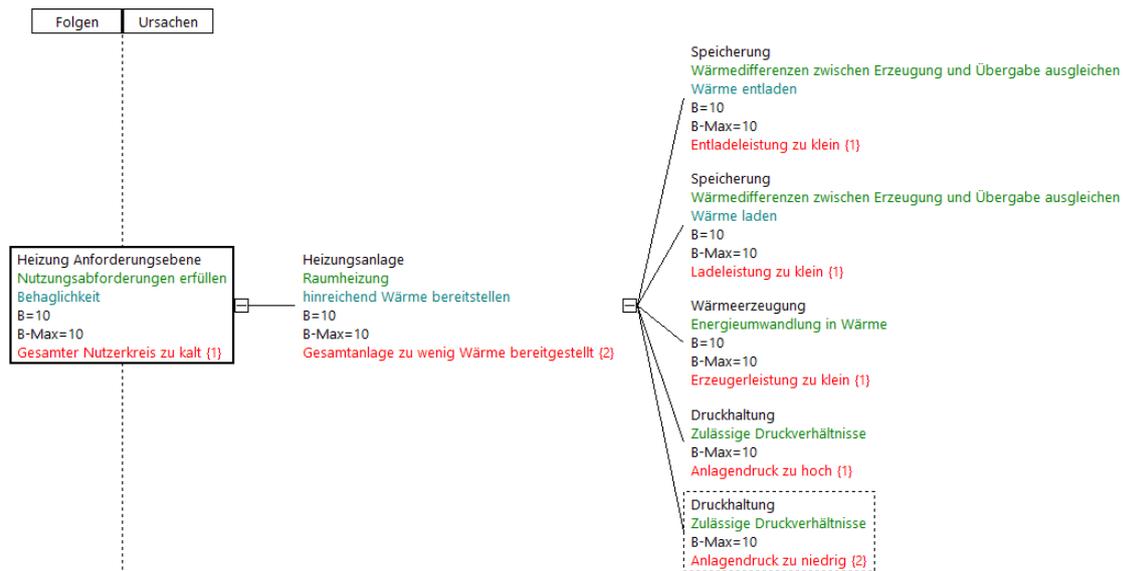


Abbildung 2-15: Fehlernetz Heizungsanlage Grundstruktur: Anforderungsebene Gesamter Nutzerkreis zu kalt

2.5.5.2 Effizienzeinschränkende Fehler

Fehler: Ineffizienz eines Teilbereichs

Abbildung 2-16 stellt das Fehlernetz des Fehlers „Ineffizienz eines Teilbereichs“ dar. Betrifft der Fehler nur einen Raum ist von einem Fehler der Übergabe auszugehen. Die Effizienzverschlechterung liegt in einem kleinen Teilbereich vor und führt somit zu einer Fehlerbedeutung $B = 5$. Mit dem Fehler „Ineffizient“ des Elements Übergabe können in späteren Anlagenbetrachtungen Ursachen für effizienzverschlechternde Fehler aus dem jeweiligen FMEA-Modul verbunden werden.

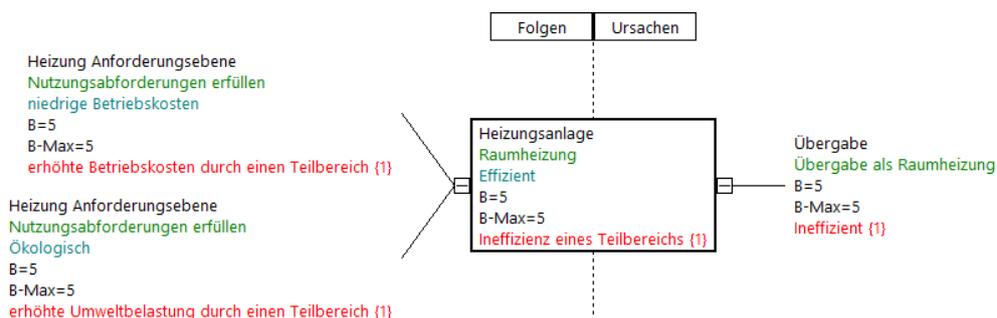


Abbildung 2-16: Fehlernetz Heizungsanlage Grundstruktur: Heizungsanlage Ineffizienz eines Teilbereichs

Fehler: Ineffizienz eines Teilsystems

Für einen effizienzverschlechternden Fehler, der ein Teilsystem betrifft ergibt sich das Fehlernetz in Abbildung 2-17. Der Fehler ist mit einer Bedeutung von B = 7 bewertet. Wie beim Fehler „Nutzerkreis eines Teilsystems zu kalt“ können auch bei diesem Fehler an das Element Verteilung Fehlerursachen aus den FMEA-Modulen angeschlossen werden.

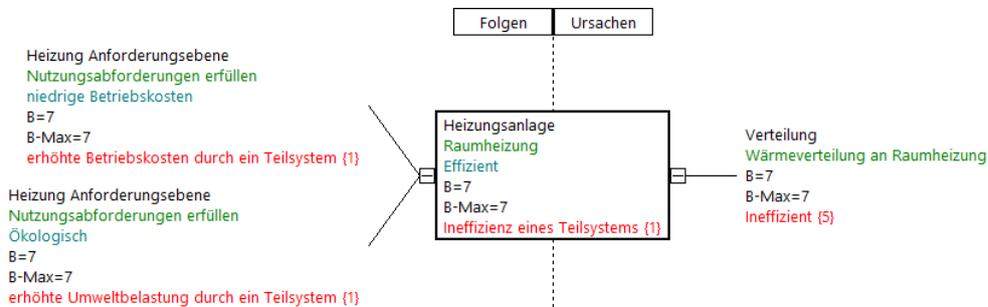


Abbildung 2-17: Fehlernetz Heizungsanlage Grundstruktur: Heizungsanlage Ineffizienz eines Teilsystems

Fehler: Ineffizienz der Gesamtanlage

Fehler von der Verteilung vorgeschalteten Teilsystemen können die Effizienz der gesamten Anlage beeinträchtigen (z.B. Fehler des Speichers oder des Wärmeerzeugers). Diese Fehler sind mit der Fehlerbedeutung B = 8 bewertet. Das zugehörige Fehlernetz ist in Abbildung 2-18 zu sehen. Mit dem Fehler „Ineffizient“ der Speicherung können weitere spezifische Fehler des Speichers, die bspw. zu erhöhten Wärmeverlusten oder zu Störung der Temperaturschichtung führen, verknüpft werden.

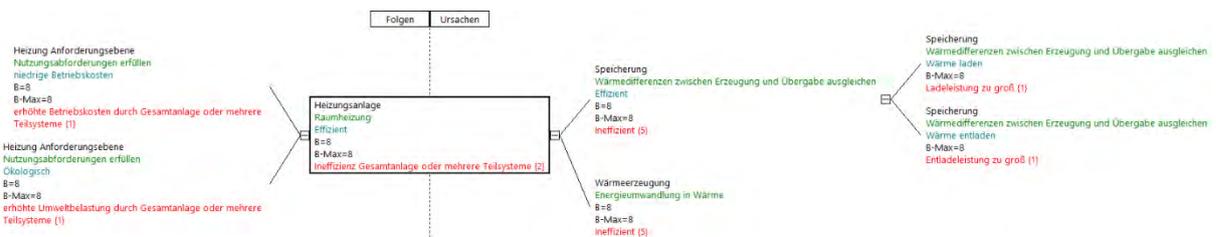


Abbildung 2-18: Fehlernetz Heizungsanlage Grundstruktur: Heizungsanlage Ineffizienz Gesamtanlage

2.6 Anwendung der Grundstruktur auf die Versuchsanlage

2.6.1 Elemente und Struktur der Versuchsanlage

Mit den Festlegungen aus dem Kapitel 2.5 wird nun die Heizungsversuchsanlage abgebildet. Die Wärmebereitstellung übernimmt eine elektrisch angetriebene Wärmepumpe mit Erdkollektor in einem Speicherteich als Wärmequelle. Als Speicher dienen zwei 750l Heizungspufferspeicher mit Rücklaufeinschichtung. An die Speicherung sind mehrere Heizkreise als Beimischschaltung mit zusätzlichen Durchgangsventil

angeschlossen. Diese Heizkreise bilden die Teilsysteme. Als Übergabe kommen Fußbodenheizungen und Luftherhizer mit zusätzlichem Drosselventil zum Einsatz. Ein Ausschnitt des Heizungsschemas ist in Abbildung 2-19 zu sehen. Die Möglichkeit der Einspeisung von Wasser aus dem Erdkollektorkreis in die Fußbodenheizkreise wurde nicht mit den Mitteln der FMEA betrachtet. Auch werden die Freiflächenheizung und die Schwimmbadheizung, welche eher Spezialfälle darstellen, nicht betrachtet. Das Schema kann in Anhang A5-1 in groß eingesehen werden.

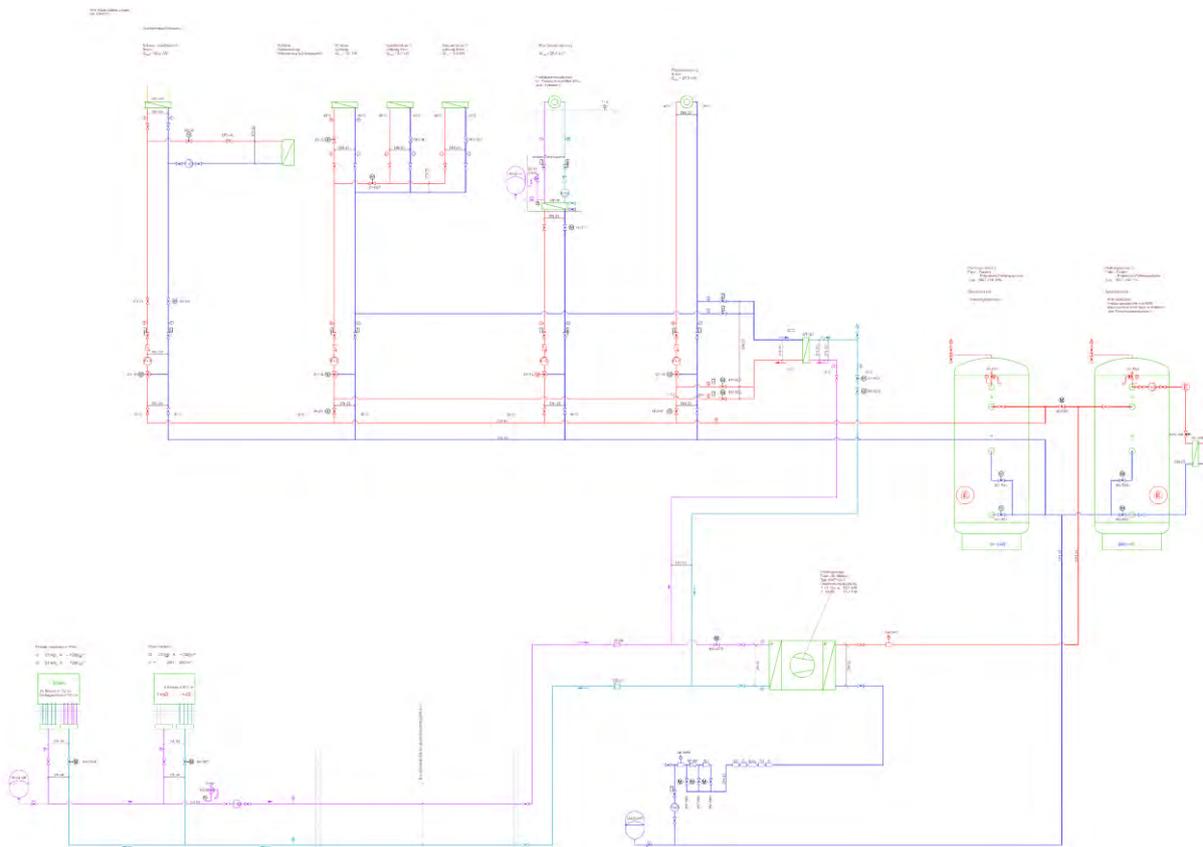


Abbildung 2-19: Schema Heizungsversuchsanlage

Die Grundstruktur aus Abbildung 2-11 wurde zum Strukturbaum in Abbildung 2-20 erweitert. An dem Element Übergabe sind die zwei genannten Übergabevarianten angeschlossen. Da es in der FMEA darum gehen soll grundsätzliche Anlagenfehler zu finden und diese für den weiteren Projektablauf zu priorisieren ist es ausreichend jede Übergabeart nur einmal an das Element Übergabe anzuschließen. Aus diesem Grund ist auch an das Element Verteilung nur ein FMEA-Modul der Beimischschaltung gekoppelt. Der Speicher mit Rücklaufeinschichtung ist an das Element Speicherung angeschlossen. Das Element Wärmeerzeuger verfügt über eine Wärmepumpe.

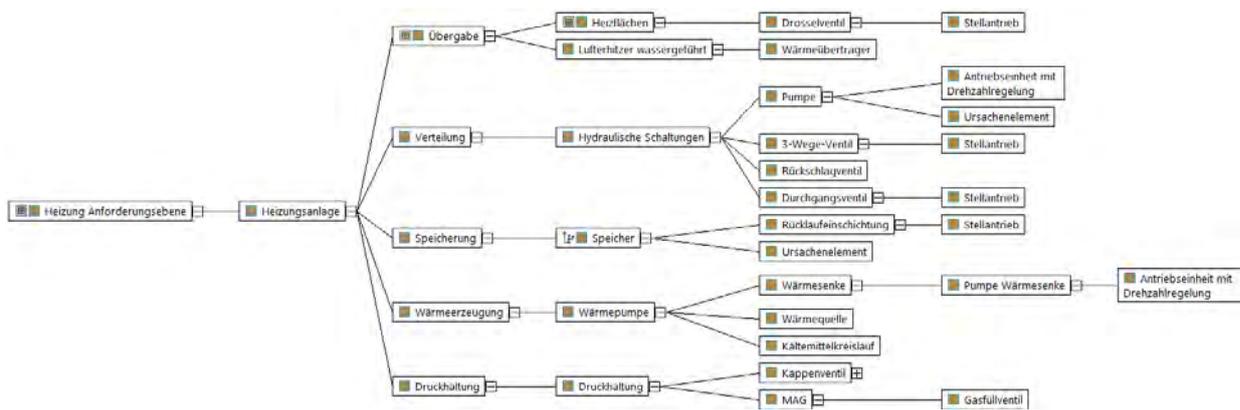


Abbildung 2-20: FMEA-Strukturbaum der Heizungsversuchsanlage

2.6.2 Fehlernetze der Versuchsanlage

2.6.2.1 Funktionseinschränkende Fehler

Die Erkenntnisse aus der Erstellung der Fehlernetze werden im Folgenden kurz dargelegt. Abbildungen aller Fehlernetze sind im Anhang A5-2 zu finden.

Fehler: zu warm

Wird es in einem Raum mit Fußbodenheizung zu warm, liegt dies an einer mangelhaften Regulierung des Massestroms durch das Drosselventil mit Stellantrieb.

Die zweite Übertragungsvariante ist der Lufterhitzer. Er verfügt wie die Fußbodenheizung nur über eine Massestromregulierung. Er kann nicht seine Heizungsvorlauftemperatur oder Lufteintrittstemperatur beeinflussen. Sinkt durch den Lufterhitzer auf Grund einer Verengung des Strömungsweges der Luftvolumenstrom kann die Luftaustrittstemperatur ebenfalls, wenn der Wärmeübergang durch die Verengung nicht behindert wird, ansteigen. Dieser Fehler würde aber nur im Extremfall zu einer Überhitzung eines Raumes führen, wenn die Massestromregulierung des Heizwassermediums ebenfalls beeinträchtigt ist. Der Fehler einer zu warmen Lufteintrittstemperatur am Lufterhitzer, der zu einer zu hohen Luftaustrittstemperatur am Lufterhitzer führt, wird in der FMEA der Lüftungsanlage untersucht

Fehler: Kleiner Nutzerkreis zu kalt

Wird ein Raum nicht ausreichend mit Wärme versorgt kann die Ursache des Fehlers auf einen schlechten Wärmeübertrager-Zustand oder einen zu kleinen Heizwassermassestrom zurückgeführt werden. Ein zu kleiner Heizwassermassestrom kann durch eine mangelhaften Massestromregulierung oder verengten Fließwegen verursacht werden. Zu mangelhaften Wärmeübertrager-Zuständen gehören Verschmutzungen, Lufteinschlüsse oder erhöhte Wärmeverluste an die Umgebung.

Fehler des Luftherhitzers deren Ursache in der RLT-Anlage (z.B. Luftförderung oder WRG) zu suchen sind, werden in der FMEA der Lüftungsanlage untersucht.

Fehler: Nutzerkreis eines Teilsystems zu kalt

Gibt es bei einem größeren Nutzerkreis den Behaglichkeitsfehler „zu kalt“ liegt ein Fehler des Teilsystems durch die Verteilung vor. Die Beimischschaltung hat die Aufgabe einen Heizungswassermassestrom bei einer bestimmten Vorlauftemperatur der Übergabe zur Verfügung zu stellen. Daher betreffen die möglichen Fehler die Vorlauftemperatur und den Massestrom. Wird zu wenig Wärme bereitgestellt kann der Massestrom zu klein sein. Fehlerursachen hierfür können die Pumpe, das Durchgangsventil, oder ein geschlossener Fließweg sein. Ist die Vorlauftemperatur zu kalt kommen das Durchgangsventil und das 3-Wege-Ventil als Fehlerquelle in Frage.

Fehler: Gesamter Nutzerkreis zu kalt

Liegt in der Versuchsanlage bei dem gesamten Nutzerkreis der Behaglichkeitsfehler „Zu kalt“ vor, sind die Ursachen für diesen Fehler in der Speicherung, Wärmebereitstellung und Druckhaltung zu suchen. Der Speicher kann als Fehlerursache einen zugesetzten bzw. geschlossenen Fließweg haben der zu einem zu kleinen Lade- oder Entlademassestrom führen kann. Auf der Seite des Wärmeerzeugers liegen die Ursachen bei einem zu kleinen Massestrom auf der Wärmequellen- oder Wärmesenken-Seite. Ein zu kleiner Massestrom kann auf einen Pumpenfehler oder verschmutzte bzw. geschlossene Fließwege zurückgeführt werden. Der zu kleine Massestrom kann Hoch- oder Niederdruckstörungen oder insgesamt eine zu kleine Wärmeerzeugerleistung auslösen. Auf der Wärmequellenseite kommt eine zu niedrige Vorlauftemperatur in Betracht. Auch ist ein Fehler durch eine zu schwache Entspannung des Kältemittels durch das Expansionsventil denkbar, welche dann zu flüssigen Kältemittel am Kompressor führen kann und diesen beschädigt. Fehler der Leistungsregelung des Kompressors sind ebenfalls denkbar. Fehler der Druckhaltung können, durch eine verminderte Auf- oder Abnahme des Wasserexpansions- bzw. Kontraktionsvolumens, zu einem zu hohen oder niedrigen Anlagendruck führen, welcher zu einem Anlagenausfall führt.

2.6.2.2 Effizienzeinschränkende Fehler

Fehler: Ineffizienz eines Teilbereichs

Ursachen des Fehlers „Ineffizienz eines Teilbereichs“ sind die, welche bereits Ursache für den Behaglichkeitsfehler „zu warm“ waren. Zusätzliche Fehlerursachen der Wärmeübergabe-Komponenten beziehen sich auf den Wärmeübertragerzustand oder Wärmeverluste.

Fehler: Ineffizienz eines Teilsystems

Für einen effizienzverschlechternden Fehler, der ein Teilsystem betrifft wurden die Fehlerursachen in der Verteilung des Teilsystems verortet. Fehler entstehen durch einen

zu großen geförderten Massestrom oder durch zu hohe Vorlauftemperaturen. Auch können nichtintermittierende Komponenten eine Fehlerursache sein.

Fehler: Ineffizienz der Gesamtanlage

Wird durch einen Fehler die Effizienz der gesamten Versuchsanlage beeinträchtigt, kommen als Fehlerquellen die Wärmebereitstellung und Speicherung in Betracht. Fehlerursachen des Speichers können Fehler in der Rücklaufeinschichtung oder eine mangelhafte Wärmedämmung sein. Fehlerursachen der Wärmepumpe können eine schlechte Regelung des Expansionsventils oder des Kompressors sowie zu große Masseströme auf Wärmequellen- und Wärmesenken-Seite sein. Auch werden abträgliche Bedingungen auf der Wärmequellenseite bedacht.

2.7 Risikoanalyse und FED-Möglichkeiten

2.7.1 Einleitung

Für die Komponenten der Heizungsversuchsanlage wurde eine Risikoanalyse mithilfe der Aufgabenpriorität durchgeführt. Die Ergebnisse werden im Folgenden nur verkürzt dargelegt. Die ausführlichen Bewertungen können Anhang A-5.3 in tabellarischer Form entnommen werden.

Aus der Fehlerrecherche sind bereits einige Möglichkeiten bekannt, um die in der FMEA identifizierten Fehler zu erkennen. Es wurde eine Auswahl getroffen welche FED-Methoden aus der Recherche eingesetzt werden können, um die betreffenden Fehler zu erkennen. Diese werden nach der Fehlerbewertung kurz im Kontext der Versuchsanlage diskutiert.

Ausführliche Ergebnisse der Recherche zu Fehlererkennungs- und Diagnosemethoden sind in Anhang A-5.4 in tabellarischer Form zu finden. In diesem Anhang wird kurz auf den Fehler, die Methode und die genutzten Messwerte sowie Signale eingegangen. Aus den beschriebenen Methoden wurden benötigte GA-Effizienzklassen nach DIN EN 15232 Teil 1 und Automationsklassen nach DIN EN 18599 Blatt 11 abgeleitet. Die zur FED nötige Monitoringklasse ist nach VDI 6041 die Klasse 1.

2.7.2 Übergabe

Luftherhitzer

Fehler die als Ursache einen zu großen Heizwassermassestrom über die Mengenregulierung als Ursache haben, besitzen die höchste Priorität. Die übrigen Fehlerursachen sollten dem Nutzer durch seine Folgen recht schnell auffallen oder bei einer Wartung entdeckt werden. Die bewertete Priorität der übrigen Fehlerursachen ist daher nur mittel.

Allgemeine Fehler wie „Zuluft zu warm“ oder „Zuluft zu kalt“ können über die in der Versuchsanlage vorhandene Sensorik aufgedeckt werden, da eine Soll-Zulufttemperatur

in der Regelung hinterlegt ist (vgl. [Grob et. al. (2002) Anhang A S. 185-187]). Zu warme Zuluft - als mögliches Symptom eines zu großen Heizwassermassestroms - kann nachgewiesen werden.

Auch kann über die Vor- und Rücklauftemperaturen des Lufterhitzer-Heizkreises, bzw. die Luftein- und Luftaustrittstemperatur des Lufterhitzers, auf die Aktivität des Lufterhitzers geschlossen werden und diese mit dem geforderten Betriebszustand des Erhitzers abgeglichen werden (vgl. [Gropp et. al. (2003) S. 144]). Eine nicht erwünschte Lufterwärmung durch den Erhitzer lässt sich in der Versuchsanlage durch Auswertung der Luftein- und Luftaustrittstemperatur aufdecken.

Viele Methoden zur Fehlererkennung aus der Literaturrecherche benötigen eine Wärmemengen- oder Volumenstrommessung (vgl. [Feist et. al. (2003) S.111], [Stockinger et. al. (2010) S.82], [Hyvifirinen et. al. (1996) Kap. 3.1.2]). Die nötige Sensorik ist in der Versuchsanlage nicht vorhanden.

Fußbodenheizung

Ist ein zu großer Heizwassermassestrom durch die Mengenregulierung für einen Fehler ursächlich, besitzen diese Fehler eine hohe Priorität.

Die übrigen Fehlerursachen sollten dem Nutzer durch seine Folgen recht schnell auffallen oder treten aufgrund der Fehlerhäufigkeit von H=2 für Fußbodenheizungen nur selten auf. Die bewertete Priorität der übrigen Fehlerursachen ist daher nur niedrig bis mittel.

Ob ein Raum grundsätzlich bedarfsgerecht beheizt wird kann in der Versuchsanlage durch den Vergleich der Raumtemperatur mit der hinterlegten Raum-Solltemperatur erfolgen (vgl. [Baumann et. al. (2005) S.38 - 39; S 143 & 149], [Voss & Engelmann (2008) S. 68], [Niekamp et. al. (2017) S. 15-16 und S. 18], [Emmerich et. al. (2003) S. 148], [Hyvifirinen et. al. (1996) Anhang 3A]).

Messungen direkt an Heizkreisen der Fußbodenheizung sind nicht vorhanden.

Verfahren welche die Rücklauftemperatur zur Fehlererkennung nutzen (vgl. [Röther et. al. (2015) S.22-24]), sind hier voraussichtlich schwierig anzuwenden, da der Einfluss eines Heizkreises auf die gemeinsame Rücklauftemperatur der hydraulischen Schaltung als gering angesehen wird. Die Erprobung einer Fehlererkennung durch die Rücklauftemperatur der hydraulischen Schaltung erfolgte nicht.

2.7.3 Verteilung

Fehlerursachen, die zum Funktionsverlust eines Teilsystems führen haben eine mittlere Priorität, da diese durch eine Nutzerrückmeldung schnell auffallen. Hingegen haben, auf Grund ihrer Unauffälligkeit, effizienzverschlechternde Fehlerursachen eine hohe Aufgabenpriorität. Es sollte das intermittierende Verhalten der Komponenten, der geförderte Volumen- bzw. Massestrom über die Pumpe sowie die über das 3-Wege-Ventil gemischte Vorlauftemperatur überwacht werden. Durch diese Maßnahmen könnten auch Fehlerursachen, die zum Funktionsverlust führen überwacht werden.

Ein Fokus der Fehlererkennung an der Beimischschaltung wird auf die Prüfung der Vorlaufemperatur gelegt, da in der Regelung eine Soll-Vorlaufemperatur hinterlegt ist. Zu warme Vorlaufemperaturen im Heizkreis, als Teil der effizienzverschlechternden Fehler, können entdeckt werden.

Eine Regelung der Vorlaufemperatur in Abhängigkeit von der Außentemperatur erfolgt jedoch nicht und findet, wenn nur händisch statt. Das Bestimmen einer Näherungsgleichung für die Vorlaufemperatur zur Fehlererkennung erfolgte daher nicht (vgl. [Plath (2009) S. 64 und 107] und [Görres et. al. (2007) S.133]). Hierdurch wird auch auf eine Fehlererkennung durch die Prüfung der Rücklaufemperatur der hydraulischen Schaltung verzichtet (vgl. [Plath (2009) S. 66] und [Röther et. al. (2015) S.22-24]).

Eine Absenkung der Temperaturen im Heizkreis erfolgt nicht (Fußbodenheizung). Daher wird keine Prüfung der Absenkttemperaturen umgesetzt (vgl. [Sewe (2018) Anhang B S. 54] und [Plath (2009) S. 78]).

Das 3-Wege-Ventil kann mit Hilfe der verbauten Temperatursensoren geprüft werden. Die in der Recherche aufgeführten Methoden lassen nicht immer einen Schluss auf das 3-Wege-Ventil als alleinige Fehlerursache zu. Eine geeignetere Methode zur Fehlererkennung wird in späteren Abschnitten entwickelt und vorgestellt.

In der Heizungsversuchsanlage stehen keine Wärmemengen- oder Volumenstrommessungen der Heizkreise zur Verfügung. Hierdurch entfallen alle Fehlererkennungsmethoden, die Wärmemengen mit anderen Eingangsgrößen korreliert haben (vgl. [Plath (2009) S. 78], [Sewe (2018) Anhang B S.127], [Emmerich et. al. (2003) S. 62-63], [Kappert et. al. (2005) S. 86-87], [Kerschberger et.al. (2004) S.127], [Voss & Engelmann (2008) S. 40&48] und [Niekamp et. al. (2017) S. 14-15]).

Auch werden keine Messdaten der Umwälzpumpen aufgezeichnet. Daher findet keine Prüfung der Effizienz der Pumpe statt (vgl. Nold (1994)).

2.7.4 Speicherung

Fehler durch die Ladepumpe, Ventile zur Steuerung der Ladung bzw. Entladung oder die Rücklaufeinschichtung besitzen eine hohe Aufgabenpriorität da sie mit einer Fehlerhäufigkeit von $H = 5$ bewertet sind. Blockierte Fließwege oder Schäden an der Wärmeisolierung als Fehlerursache sind eher selten. Auch fällt die Fehlerfolge von Blockierte Fließwege dem gesamten Nutzerkreis auf. Daher sind sie trotz ihrer hohen Bedeutung nur mit einer mittleren Aufgabenpriorität bewertet.

Grundsätzlich sollte durch die Speichertemperatur in der Entnahmeebene eine Aussage getroffen werden können, ob der Speicher zu warm oder kalt ist, wenn die Soll-Vorlaufemperaturen der angeschlossenen Heizkreise bekannt sind.

Durch das schnelle Ansteigen der Vorlaufemperatur des Wärmeerzeugers kann ein verschlossener Fließweg zur Speicherladung erkannt werden (vgl. [Bonin (2018) S. 57]). Die Anwendung dieses Vorgehens in der Versuchsanlage erscheint jedoch fraglich, da der untersuchte Pufferspeicher und die Wärmepumpe parallel zu den Wärmeverbrauchern geschaltet sind. Der Ansatz wurde nicht geprüft.

Auch kann das Verhalten der Speichertemperatur in Abhängigkeit vom Be- und Entladezustand des Speichers untersucht werden (vgl. [Bonin (2018) S. 43]).

Fehlzirkulationen im Speicher wurden häufig durch Messungen der Volumenströme an den Speicheranschlüssen festgestellt (vgl. [Miara et. al. (2011) S. 37] und [Sewe (2018) Anhang B S.129]). Diese Messung scheidet jedoch aus. Fehlzirkulationen sollten jedoch die Temperaturschichtung im Speicher stören. Diese kann nach [Hyvifirinen et. al. (1996) Abschnitt 3.64 und 3.65] durch Speichertemperaturen in verschiedenen Speicherschichten geprüft werden.

Speicherverluste können durch Wärmemengenzähler und aufstellen einer geeigneten Energiebilanz bestimmt werden (vgl. [Knapp (2009) S. 100-101]). Wärmemengenzähler sind nicht vorhanden

2.7.5 Wärmeerzeugung

Wärmepumpen verfügen über eine interne Diagnose zum Kältemittelkreislauf. Der Fokus sollte auf den geförderten Masseströmen der Wärmequellen- und Wärmesenken-Seite liegen.

Die Vor- und Rücklauftemperaturen der Wärmeerzeuger können nach Näherungsgleichungen bestimmt werden und mit den gemessenen Temperaturen verglichen werden (vgl. [Plath (2009) S. 64 und S. 107] und [Baumann et. al. (2005) S.150]). Im Betrieb der Wärmepumpe dominiert häufig die Speicherladung. Dabei treten zu Beginn der Speicherladung niedrige Vor- und Rücklauftemperaturen auf, die dann mit Voranschreiten der Ladung ansteigen. Daher müssten die gemessenen Temperaturen über einen längeren Zeitraum gemittelt werden, um sie mit Ergebnissen aus einer Näherungsgleichung vergleichen zu können. Auch sollten bei Anwendung dieses Verfahrens gemessene Temperaturen während der Warmwasserbereitung unberücksichtigt bleiben. Es ist keine Heizkurve in der Versuchsanlage hinterlegt. Das Verfahren wurde daher nicht erprobt.

Fehlerhafte Masseströme auf Wärmesenken- und Wärmequellenseite können durch die Prüfung der Temperaturspreizung gefunden werden (vgl. [Bonin (2018) S. 58-66]). Grundsätzlich kann über Strömungswächter geprüft werden, ob ein Massestrom gefördert wird (vgl. [Koenigsdorff & Heinrich (2008)] und [Bonin (2018) S. 72 und S. 75]). Ob eine Wärmequelle hydraulisch abgeglichen ist, kann geprüft werden, indem das Verhalten der Vorlauftemperaturen einzelner Kollektorkreise bzw. Sondenfelder untersucht wird. Sinken einige Vorlauftemperaturen schneller als andere, spricht dies für einen zu hohen Massestrom im jeweiligen Kreis bzw. Feld (vgl. [Kappert et. al. (2005) S. 107]).

Häufig wird die Effizienz einer Wärmepumpe durch Messung des elektrischen Verbrauchs und einer Wärmemengenmessung bestimmt (vgl. u.a. [Plath (2009) S. 71] und [Bonin (2018) S. 28]). Dieses Vorgehen scheidet aus, da keine Wärmemengenzähler in der Versuchsanlage vorhanden sind.

2.7.6 Druckhaltung

Fehler der Druckhaltung weisen eine mittlere Aufgabenpriorität auf. Fehler an der Druckhaltung können durch Prüfung des statischen Drucks in Heizungsanlagen aufgedeckt werden (vgl. [Sewe (2018) S.58]). Der statische Überdruck in der Heizungsanlage sollte ausgewertet werden.

2.8 Erarbeitung von RLT-Anlagenstrukturen in der FMEA

2.8.1 FMEA-Grundstruktur der RLT-Anlage

Es wird zu Beginn eine Grundstruktur erarbeitet, die es ermöglicht eine Vielzahl von raumluftechnischen Anlagen abzubilden.

Jede Anlage, die mit Hilfe der FMEA abgebildet wird, soll aus mehreren Systemelementen bestehen. Das erste Element ist die Anforderungsebene. In diesem sind Anforderungen der Nutzer und Anlagenbetreiber an die RLT-Anlage definiert. An das Element Anforderungsebene schließt sich das Element RLT-Anlage an. Darin sind Funktionen und Anforderungen festgelegt, um die Erwartungen der Nutzer und Anlagenbetreiber zu erfüllen. An das Element RLT-Anlage schließen sich die Elemente Übergabe, Nachkonditionierung Teilbereich, Nachkonditionierung Teilsystem, Luftverteilung, Konditionierung, Wärmerückgewinnung und Luftförderung an. Jedes dieser Elemente besitzt Funktionen, Anforderungen und Fehlfunktionen, die möglichst allgemeingültig mit dem Element RLT-Anlage verknüpft werden, um einen Großteil der denkbaren raumluftechnischen Anlagen abbilden zu können. Der allgemeine Strukturbaum ist in Abbildung 2-21 zu sehen.

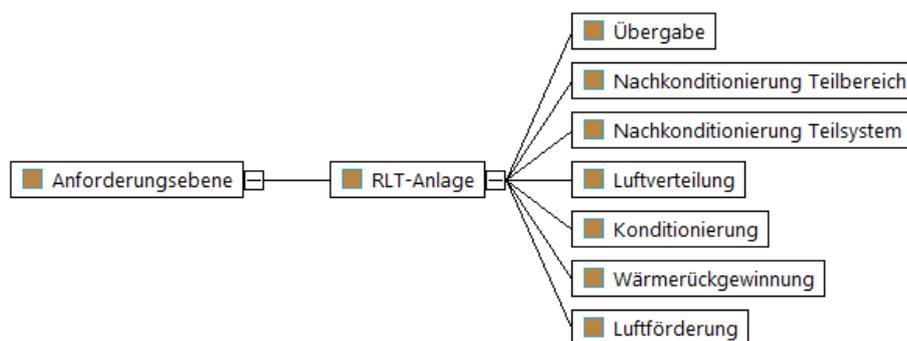


Abbildung 2-21: Strukturbaum einer allgemeinen RLT-Anlage

An die Elemente rechts in der Abbildung können FMEA-Module von Komponenten oder Teilsystemen angeschlossen werden. In den nächsten Abschnitten des Kapitels 2.8 werden auf die festgelegten Funktionen, Anforderungen und Fehlfunktionen, der in Abbildung 2-21 dargestellten Elemente eingegangen.

2.8.2 Anforderungsebene

Dieses Element hat die Forderung, dass die Nutzeranforderungen erfüllt werden sollen. Diese Anforderungen sind thermische Behaglichkeit, Raumluftqualität, niedrige Betriebskosten und ein ökologischer Anlagenbetrieb. Den Anforderungen werden in Anlehnung an die Ausarbeitung zur Aufgabenpriorität Fehler zugeordnet. Die Festlegungen für die Anforderungsebene können Tabelle 2-11 entnommen werden.

Tabelle 2-11: Funktion, Anforderungen und Fehlfunktionen der Anforderungsebene

Funktion	Anforderung	Fehler
Nutzungsanforderungen erfüllen	thermische Behaglichkeit	Gesamter Nutzerkreis: zu warm
		Nutzerkreis eines Teilsystems: zu warm
		Nutzerkreis eines Teilbereichs: zu warm
		Gesamter Nutzerkreis: zu kalt
		Nutzerkreis eines Teilsystems: zu kalt
		Nutzerkreis eines Teilbereichs: zu kalt
		Gesamter Nutzerkreis: zu trocken
		Nutzerkreis eines Teilsystems: zu trocken
		Nutzerkreis eines Teilbereichs: zu trocken
		Gesamter Nutzerkreis: zu feucht
		Nutzerkreis eines Teilsystems: zu feucht
		Nutzerkreis eines Teilbereichs: zu feucht
	Raumluftqualität	Gesamter Nutzerkreis: Abgestandene Raumluft
		Nutzerkreis eines Teilsystems: Abgestandene Raumluft
		Nutzerkreis eines Teilbereichs: Abgestandene Raumluft
		Gesamter Nutzerkreis: verunreinigte Raumluft
		Nutzerkreis eines Teilsystems: verunreinigte Raumluft
		Nutzerkreis eines Teilbereichs: verunreinigte Raumluft
	niedrige Betriebskosten	erhöhte Betriebskosten durch Gesamtanlage bzw. mehrere Teilsysteme
		erhöhte Betriebskosten durch ein Teilsystem
		erhöhte Betriebskosten durch einen Teilbereich

Funktion	Anforderung	Fehler
	Ökologisch	erhöhte Umweltbelastung durch Gesamtanlage bzw. mehrere Teilsysteme
		erhöhte Umweltbelastung durch ein Teilsystem
		erhöhte Umweltbelastung durch einen Teilbereich

2.8.3 RLT-Anlage

Die raumluftechnische Anlage kann über die Funktionen Luftversorgung, Lufterwärmung, Luftkühlung, Luftbefeuchtung und Lufttrocknung verfügen, um die Anforderungen der Nutzer erfüllen zu können. Jede dieser Funktion ist zusätzlich in die Anforderung nach ihrem Betriebszustand eingeteilt. So ergibt sich für die Funktion Luftversorgung je nach Randbedingungen die Anforderung, dass gelüftet werden muss oder auch nicht um die Nutzer/Anlagenbetreiber zufrieden zu stellen. Die Funktion Luftreinigung ist nicht in Betriebszustände eingeteilt. Für alle Funktionen und sich ergebenden Anforderungen gilt zusätzlich die Forderung nach einem effizienten Anlagenbetrieb. Die sich ergebenden Fehler sind mit ihrer Folge in der Anforderungsebene verknüpft. In Tabelle 2-12 sind die Festlegungen dargestellt.

Tabelle 2-12: Funktion, Anforderungen und Fehlfunktionen der Anforderungsebene

Funktion	Anforderung	Fehler	Fehlerfolge
Luftversorgung	Lüften	Gesamtanlage: Zuluftvolumenstrom zu groß	Ineffizienz der Gesamtanlage oder mehrere Teilsysteme
		Teilsystem: Zuluftvolumenstrom zu groß	Ineffizienz eines Teilsystems
		Abschnitt eines Teilsystems: Zuluftvolumenstrom zu groß	Ineffizienz eines Teilbereichs
		Gesamtanlage: Zuluftvolumenstrom zu klein	Gesamter Nutzerkreis: Abgestandene Raumluf
		Teilsystem: Zuluftvolumenstrom zu klein	Nutzerkreis eines Teilsystems: Abgestandene Raumluf
		Abschnitt eines Teilsystems: Zuluftvolumenstrom zu klein	Nutzerkreis eines Teilbereichs: Abgestandene Raumluf
	Nicht Lüften	Gesamtanlage: Zuluftvolumenstrom zu groß	Ineffizienz der Gesamtanlage oder mehrere Teilsysteme
		Teilsystem: Zuluftvolumenstrom zu groß	Ineffizienz eines Teilsystems
		Abschnitt eines Teilsystems: Zuluftvolumenstrom zu groß	Ineffizienz eines Teilbereichs
Lufterwärmung	Heizen	Gesamtanlage: Zuluft zu warm	Gesamter Nutzerkreis: zu warm
		Teilsystem: Zuluft zu warm	Nutzerkreis eines Teilsystems: zu warm

Funktion	Anforderung	Fehler	Fehlerfolge	
		Abschnitt eines Teilsystems: Zuluft zu warm	Nutzerkreis eines Teilbereichs: zu warm	
		Gesamtanlage: Zuluft zu kalt	Gesamter Nutzerkreis: zu kalt	
		Teilsystem: Zuluft zu kalt	Nutzerkreis eines Teilsystems: zu kalt	
		Abschnitt eines Teilsystems: Zuluft zu kalt	Nutzerkreis eines Teilbereichs: zu kalt	
	Nicht Heizen	Gesamtanlage: Zuluft zu warm	Gesamter Nutzerkreis: zu warm	
		Teilsystem: Zuluft zu warm	Nutzerkreis eines Teilsystems: zu warm	
		Abschnitt eines Teilsystems: Zuluft zu warm	Nutzerkreis eines Teilbereichs: zu warm	
	Luftkühlung	Kühlen	Gesamtanlage: Zuluft zu kalt	Gesamter Nutzerkreis: zu kalt
			Teilsystem: Zuluft zu kalt	Nutzerkreis eines Teilsystems: zu kalt
Abschnitt eines Teilsystems: Zuluft zu kalt			Nutzerkreis eines Teilbereichs: zu kalt	
Gesamtanlage: Zuluft zu warm			Gesamter Nutzerkreis: zu warm	
Teilsystem: Zuluft zu warm			Nutzerkreis eines Teilsystems: zu warm	
Abschnitt eines Teilsystems: Zuluft zu warm			Nutzerkreis eines Teilbereichs: zu warm	
Nicht Kühlen		Gesamtanlage: Zuluft zu kalt	Gesamter Nutzerkreis: zu kalt	
		Teilsystem: Zuluft zu kalt	Nutzerkreis eines Teilsystems: zu kalt	
		Abschnitt eines Teilsystems: Zuluft zu kalt	Nutzerkreis eines Teilbereichs: zu kalt	
		Gesamtanlage: Zuluft zu feucht	Gesamter Nutzerkreis: zu feucht	
		Teilsystem: Zuluft zu feucht	Nutzerkreis eines Teilsystems: zu feucht	
		Abschnitt eines Teilsystems: Zuluft zu feucht	Nutzerkreis eines Teilbereichs: zu feucht	
Luftbefeuchtung	Befeuchten	Gesamtanlage: Zuluft zu trocken	Gesamter Nutzerkreis: zu trocken	
		Teilsystem: Zuluft zu trocken	Nutzerkreis eines Teilsystems: zu trocken	
		Abschnitt eines Teilsystems: Zuluft zu trocken	Nutzerkreis eines Teilbereichs: zu trocken	
		Gesamtanlage: Zuluft zu feucht	Gesamter Nutzerkreis: zu feucht	
		Teilsystem: Zuluft zu feucht	Nutzerkreis eines Teilsystems: zu feucht	
		Abschnitt eines Teilsystems: Zuluft zu feucht	Nutzerkreis eines Teilbereichs: zu feucht	
	Nicht Befeuchten	Gesamtanlage: Zuluft zu feucht	Gesamter Nutzerkreis: zu feucht	
		Teilsystem: Zuluft zu feucht	Nutzerkreis eines Teilsystems: zu feucht	
		Abschnitt eines Teilsystems: Zuluft zu feucht	Nutzerkreis eines Teilbereichs: zu feucht	
		Gesamtanlage: Zuluft zu trocken	Gesamter Nutzerkreis: zu trocken	

Funktion	Anforderung	Fehler	Fehlerfolge
		Abschnitt eines Teilsystems: Zuluft zu feucht	Nutzerkreis eines Teilbereichs: zu feucht
Lufttrocknung	Trocknen	Gesamtanlage: Zuluft zu trocken	Gesamter Nutzerkreis: zu trocken
		Teilsystem: Zuluft zu trocken	Nutzerkreis eines Teilsystems: zu trocken
		Abschnitt eines Teilsystems: Zuluft zu trocken	Nutzerkreis eines Teilbereichs: zu trocken
		Gesamtanlage: Zuluft zu feucht	Gesamter Nutzerkreis: zu feucht
		Teilsystem: Zuluft zu feucht	Nutzerkreis eines Teilsystems: zu feucht
		Abschnitt eines Teilsystems: Zuluft zu feucht	Nutzerkreis eines Teilbereichs: zu feucht
	Nicht Trocknen	Gesamtanlage: Zuluft zu trocken	Gesamter Nutzerkreis: zu trocken
		Teilsystem: Zuluft zu trocken	Nutzerkreis eines Teilsystems: zu trocken
		Abschnitt eines Teilsystems: Zuluft zu trocken	Nutzerkreis eines Teilbereichs: zu trocken
Luftreinigung		Gesamtanlage: verunreinigte Zuluft	Gesamter Nutzerkreis: verunreinigte Raumluft
		Teilsystem: verunreinigte Zuluft	Nutzerkreis eines Teilsystems: verunreinigte Raumluft
		Abschnitt eines Teilsystems: verunreinigte Zuluft	Nutzerkreis eines Teilbereichs: verunreinigte Raumluft
Energieeffizient Arbeiten		Ineffizienz der Gesamtanlage oder mehrerer Teilsysteme	erhöhte Betriebskosten durch Gesamtanlage bzw. mehrere Teilsysteme
			erhöhte Umweltbelastung durch Gesamtanlage bzw. mehrere Teilsysteme
		Ineffizienz eines Teilsystems	erhöhte Betriebskosten durch ein Teilsystem
			erhöhte Umweltbelastung durch ein Teilsystem
		Ineffizienz eines Teilbereichs	erhöhte Betriebskosten durch einen Teilbereich
			erhöhte Umweltbelastung durch einen Teilbereich

2.8.4 Bestandteile der raumlufotechnischen Anlage

2.8.4.1 Übergabe

Die Übergabe hat die Funktion Luft an Räume zu übergeben und abzuführen. Die definierten Fehler und Folgen sind in Tabelle 2-13 zu sehen. Fehler der Übergabe sollen

sich nur auf einen kleinen Bereich der RLT-Anlage auswirken und führen zu Funktionsverlusten oder Effizienzverschlechterungen. Die Fehlerursachen ergeben sich erst aus den an der Übergabe angeschlossenen FMEA-Modulen.

Tabelle 2-13: Funktion, Anforderungen und Fehlfunktionen der Übergabe

Funktion	Anforderung	Fehler	Fehlerfolge in	Ursachen
Luftübergabe an Raum	Lüften	Luftvolumenstrom zu groß	Übergabe: Ineffizienz	Fehler der Übergabe aus FMEA-Modul
		Luftvolumenstrom zu klein	RLT-Anlage: Abschnitt eines Teilsystems: Luftvolumenstrom zu klein	Fehler der Übergabe aus FMEA-Modul
	Nicht Lüften	Luftvolumenstrom zu groß	Übergabe: Ineffizienz	Fehler der Übergabe aus FMEA-Modul
	Effizienz	Ineffizienz	RLT-Anlage: Ineffizienz eines Teilbereichs	Luftvolumenstrom zu groß
				Fehler der Übergabe aus FMEA-Modul

2.8.4.2 Luftverteilung

Dieses Element hat die Funktion die geförderte Luft in die Teilsysteme zu verteilen. Dabei kann die Anforderung des Lüftens oder nicht Lüftens eines Teilsystems bestehen. Die Fehlfunktionen wirken sich auf die Funktion und Effizienz des jeweiligen Teilsystems aus. Die Fehlerursachen ergeben sich aus den Fehlfunktionen der an das Elemente Luftverteilung angeschlossenen FMEA-Module. Die festgelegten Anforderungen, Fehlfunktionen, Fehlerfolgen und Ursachen sind in Tabelle 2-14 aufgelistet.

Tabelle 2-14: Funktion, Anforderungen und Fehlfunktionen der Verteilung

Funktion	Anforderung	Fehler	Fehlerfolge in	Ursachen
Luftverteilung	Lüften	Luftvolumenstrom zu groß	Luftverteilung: Ineffizienz	Fehler der Luftverteilung aus FMEA-Modul
		Luftvolumenstrom zu klein	RLT-Anlage: Teilsystem Luftvolumenstrom zu klein	Fehler der Luftverteilung aus FMEA-Modul
	Nicht Lüften	Luftvolumenstrom zu groß	Luftverteilung: Ineffizienz	Fehler der Luftverteilung aus FMEA-Modul
	Effizienz	Ineffizienz	RLT-Anlage: Ineffizienz eines Teilsystems	Luftvolumenstrom zu groß
				Fehler der Luftverteilung aus FMEA-Modul

2.8.4.3 Luftförderung

Dieses Element fördert die in den Teilsystemen benötigte Luft. Je nach Anforderung ist der Betriebszustand Lüften oder nicht Lüften nötig. Fehler der Luftförderung führen zum Funktionsverlust oder Effizienzverschlechterung der gesamten Anlage. Die festgelegten Anforderungen, Fehlfunktionen, Fehlerfolgen und Ursachen sind in Tabelle 2-15 aufgelistet.

Tabelle 2-15: Funktion, Anforderungen und Fehlfunktionen der Luftförderung

Funktion	Anforderung	Fehler	Fehlerfolge in	Ursachen
Luftförderung	Lüften	Luftvolumenstrom zu groß	Luftförderung: Ineffizienz	Fehler der Luftförderung aus FMEA-Modul
		Luftvolumenstrom zu klein	RLT-Anlage: Gesamtanlage Luftvolumenstrom zu klein	Fehler der Luftförderung aus FMEA-Modul
	Nicht Lüften	Luftvolumenstrom zu groß	Luftförderung: Ineffizienz	Fehler der Luftförderung aus FMEA-Modul
	Effizienz	Ineffizienz	RLT-Anlage: Ineffizienz der Gesamtanlage	Luftvolumenstrom zu groß
Fehler der Luftförderung aus FMEA-Modul				

2.8.4.4 Konditionierungselemente

Das Element Konditionierung hat die Anforderungen Luft nach Bedarfsfall zu Temperieren und die Feuchte zu Regulieren. Auch soll durch die Konditionierung die Luft gereinigt werden. All diese Aufgaben sollen effizient erfüllt werden. In Lüftungstechnischen Anlagen kann die Luftkonditionierung an diversen Stellen erfolgen. In der Grundstruktur gibt es die Möglichkeit Luft zentral (Element: Konditionierung), für ein einzelnes Teilsystem (Element: Nachkonditionierung Teilsystem) oder aber nur für einen Abschnitt eines Teilsystems (Element: Nachkonditionierung Teilbereich) zu konditionieren. An die Konditionierungs-Elemente können FMEA-Module der Luftherhitzer, Luftkühler, Befeuchter und Filter angekoppelt werden. Fehler der Konditionierung können zu Funktionsverlusten oder Effizienzverschlechterungen im jeweiligen Anlagenteil führen. Die Festlegungen sind in Tabelle 2-16 zusammengefasst.

Tabelle 2-16: Funktion, Anforderungen und Fehlfunktionen der Konditionierungselemente

Funktion	Anforderung	Fehler	Fehlerfolge in	Ursachen
Konditionierung	Heizen	Zuluft zu warm	Jeweiliger Nutzerkreis: zu warm	Fehler der an das Konditionierungs-Element angeschlossenen FMEA-Luftherhitzer-Module
			Konditionierung: Ineffizienz	

Funktion	Anforderung	Fehler	Fehlerfolge in	Ursachen
		Zuluft zu kalt	Jeweiliger Nutzerkreis: zu kalt	
	Nicht Heizen	Zuluft zu warm	Jeweiliger Nutzerkreis: zu warm Konditionierung: Ineffizienz	
	Kühlen	Zuluft zu kalt	Jeweiliger Nutzerkreis: zu kalt Konditionierung: Ineffizienz	Fehler der an das Konditionierungs-Element angeschlossenen FMEA-Luftkühler-Module
		Zuluft zu warm	Jeweiliger Nutzerkreis: zu warm	
	Nicht Kühlen	Zuluft zu kalt	Jeweiliger Nutzerkreis: zu kalt Konditionierung: Ineffizienz	
	Befeuchten	Zuluft zu feucht	Jeweiliger Nutzerkreis: zu feucht Konditionierung: Ineffizienz	Fehler der an das Konditionierungs-Element angeschlossenen FMEA-Luftbefeuchter-Module
		Zuluft zu trocken	Jeweiliger Nutzerkreis: zu trocken	
	Nicht Befeuchten	Zuluft zu feucht	Jeweiliger Nutzerkreis: zu feucht Konditionierung: Ineffizienz	
	Trocknen	Zuluft zu trocken	Jeweiliger Nutzerkreis: zu trocken Konditionierung: Ineffizienz	Fehler der an das Konditionierungs-Element angeschlossenen FMEA-Lufttrockner/Luftkühler-Module
		Zuluft zu feucht	Jeweiliger Nutzerkreis: zu feucht	
	Nicht Trocknen	Zuluft zu trocken	Jeweiliger Nutzerkreis: zu trocken Konditionierung: Ineffizienz	
	Luftreinigung	Zuluft verunreinigt	Jeweiliger Nutzerkreis: verunreinigte Raumluft	Fehler der an das Konditionierungs-Element angeschlossenen FMEA-Luftfilter-Module
	Effizienz	Ineffizienz	RLT-Anlage: jeweiliger Anlagenteil: Ineffizienz	Luftkonditionierungsfehler
				Effizienzverschlechternde Fehler der an das Konditionierungs-Element angeschlossenen FMEA-Module

2.8.4.5 Wärmerückgewinnung

Das Element Wärmerückgewinnung hat die Funktion Zuluft, mit Hilfe der Abluft oder von Umweltwärme, vorzukonditionieren. Die Anforderungen sind die gleichen wie bei der Konditionierung mit der Ergänzung der Anforderung Mischluft. Luftkonditionierungsfehler wirken sich primär auf die Effizienz der Gesamtanlage aus, da die Behaglichkeit betreffenden Fehler durch nachgeschaltete Komponenten ausgeglichen werden können. WRG-Fehler, die zu einem Funktionsverlust der RLT-Anlage führen, sollten nur bei ungewöhnlichen thermischen Umständen oder schlechten Regelkonzepten auftreten und werden daher nicht berücksichtigt. Die Luftkonditionierungsfehler der Wärmerückgewinnung beschränken sich auf die, bei denen das mögliche WRG-Potenzial nicht voll ausgeschöpft wird, die WRG fehlerbedingt aktiv ist oder die Zuluft zu stark vorkonditioniert wird. In einigen WRG-Systemen wird der Zuluft Abluft beigemischt. Für diesen Umstand wurde eine zusätzliche Anforderung Mischluft definiert deren Fehler sich auf die Reinheit der Zuluft auswirken können. In Tabelle 2-17 sind die Festlegungen zu Anforderungen, Fehlern und Fehlerfolgen dokumentiert.

Tabelle 2-17: Funktion, Anforderungen und Fehlerfunktionen der Wärmerückgewinnung

Funktion	Anforderung	Fehler	Fehlerfolge	Ursachen
Zuluft mit Abluft oder Umweltwärme vorkonditionieren	Effizienz	Ineffizienz	RLT-Anlage Gesamtanlage: Ineffizienz	Luftkonditionierungsfehler der WRG
	Heizen	Zuluft zu kalt	Wärmerückgewinnung: Ineffizienz	Fehler der angeschlossenen FMEA-WRG-Module
	Nicht Heizen	Zuluft zu warm		
	Kühlen	Zuluft zu warm	Wärmerückgewinnung: Ineffizienz	Fehler der angeschlossenen FMEA-WRG-Module
	Nicht Kühlen	Zuluft zu kalt		
	Befeuchten	Zuluft zu trocken	Wärmerückgewinnung: Ineffizienz	Fehler der angeschlossenen FMEA-WRG-Module
	Nicht Befeuchten	Zuluft zu feucht		
	Trocknen	Zuluft zu feucht	Wärmerückgewinnung: Ineffizienz	Fehler der angeschlossenen FMEA-WRG-Module
	Nicht Trocknen	Zuluft zu trocken		
	Mischluft		Zu viel Abluft in Zuluft	Gesamtanlage: verunreinigte Zuluft
Zu viel Abluft in Zuluft			Wärmerückgewinnung: Ineffizienz	

2.8.5 Fehlernetze der Grundstruktur

2.8.5.1 Funktionseinschränkende Fehler

Fehler: Gesamter Nutzerkreis zu warm

In Abbildung 2-22 ist das Fehlernetz für den Behaglichkeitsfehler „Gesamter Nutzerkreis zu warm“ der Anforderungsebene zu sehen. Wird es dem gesamten Nutzerkreis zu warm sollte die Fehlerursache bei der zentralen Luftkonditionierung zu suchen sein. Es liegt eine Funktionsbeeinträchtigung für die gesamte RLT-Anlage vor was, nach den Festlegungen zur Aufgabepriorität, zu einer Fehlerbedeutung B = 10 führt. Der Fehler kann durch einen Luftherhitzer der im Heizfall die Luft zu stark erwärmt, einen Luftherhitzer der Luft erwärmt, obwohl dies nicht erforderlich ist oder durch einen Luftkühler der nicht ausreichend den Zuluftstrom abkühlt verursacht werden. Fehlerursachen der angesprochenen Komponenten werden bei der Anlagenbetrachtung ermittelt.

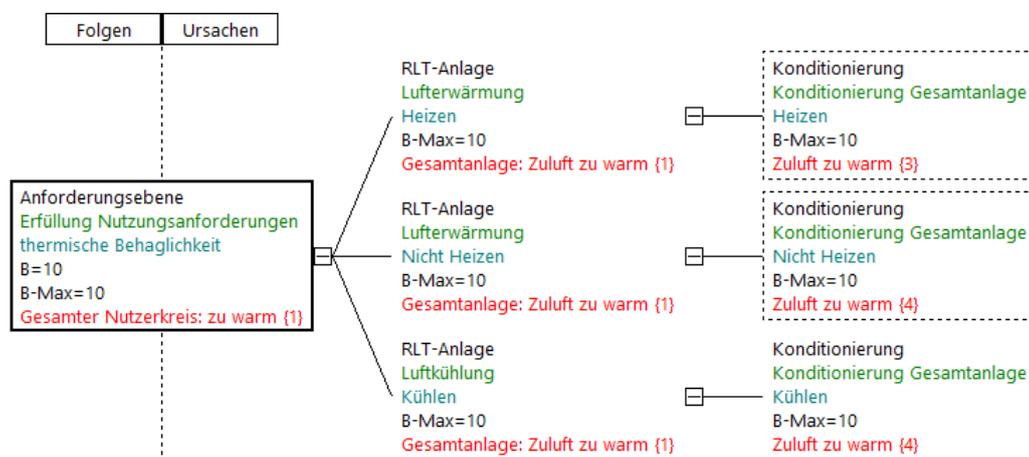


Abbildung 2-22: Fehlernetz RLT-Anlage Grundstruktur: Anforderungsebene Gesamter Nutzerkreis zu warm

Fehler: Nutzerkreis eines Teilsystems zu warm

Dieser Fehler kann auftreten, wenn in einem Teilsystem der Zuluftvolumenstrom nachkonditioniert wird. Der Behaglichkeitsfehler wirkt sich auf den Nutzerkreis eines Teilsystems aus und ist mit einer Fehlerbedeutung von B=8 bewertet. Ursachen sind bei den Luftkühler und Luftherhitzer der Nachkonditionierung zu suchen. Das Fehlernetz ist in Abbildung 2-23 zu sehen.

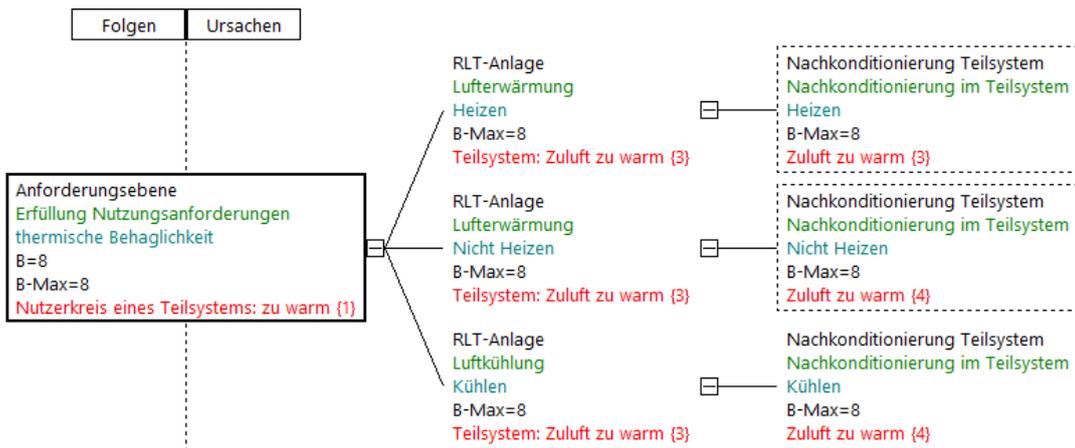


Abbildung 2-23: Fehlernetz RLT-Anlage Grundstruktur: Anforderungsebene Nutzerkreis eines Teilsystems zu warm

Fehler: Nutzerkreis eines Teilbereichs zu warm

Wird der Zuluftvolumenstrom kurz vor der Übergabe konditioniert, kann dieser Fehler auftreten. Mögliche Fehlerursachen sind bei den Komponenten zum kühlen oder heizen des Luftstroms im jeweiligen Betriebszustand zu suchen. Der Fehler wirkt sich nur auf einen kleinen Teil der Nutzer aus und wird mit der Bedeutung B=6 bewertet.



Abbildung 2-24: Fehlernetz RLT-Anlage Grundstruktur: Anforderungsebene kleiner Nutzerkreis zu warm

Fehler: Gesamter Nutzerkreis zu kalt

Wird es dem gesamten Nutzerkreis zu kalt sollte die Fehlerursache bei der zentralen Luftkonditionierung zu suchen sein. Es liegt eine Funktionsbeeinträchtigung für die gesamte RLT-Anlage vor was zu einer Fehlerbedeutung B = 10 führt. Der Fehler kann durch einen Luftkühler, der im Kühlfall die Luft zu stark kühlt, einen Luftkühler, der Luft kühlt, obwohl dies nicht erforderlich ist oder durch einen Luftheritzer, der im Heizfall nicht ausreichend den Zuluftstrom erwärmt, verursacht werden. Fehlerursachen der

angesprochenen Komponenten werden bei der Anlagenbetrachtung ermittelt. Das Fehlernetz ist in Abbildung 2-25 dargestellt.

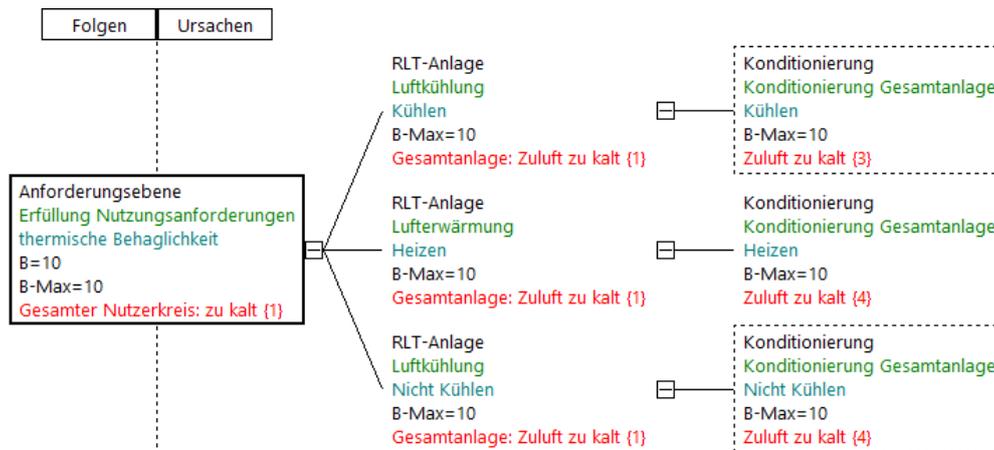


Abbildung 2-25: Fehlernetz RLT-Anlage Grundstruktur: Anforderungsebene Gesamter Nutzerkreis zu kalt

Fehler: Nutzerkreis eines Teilsystems zu kalt

Liegt bei einem größeren Nutzerkreis ein Behaglichkeitsfehler „zu kalt“ vor spricht dies für einen Fehler des Teilsystems durch die Nachkonditionierung. Die Funktion eines gesamten Teilsystems wird eingeschränkt und die Fehlerbedeutung ist B=8. Die für den Fehler verantwortlichen Komponenten sind der Luftkühler oder Lufterhitzer in den entsprechenden Betriebszuständen (vgl. Fehler: Gesamter Nutzerkreis zu kalt). Das Fehlernetz ist in Abbildung 2-26 zu sehen.

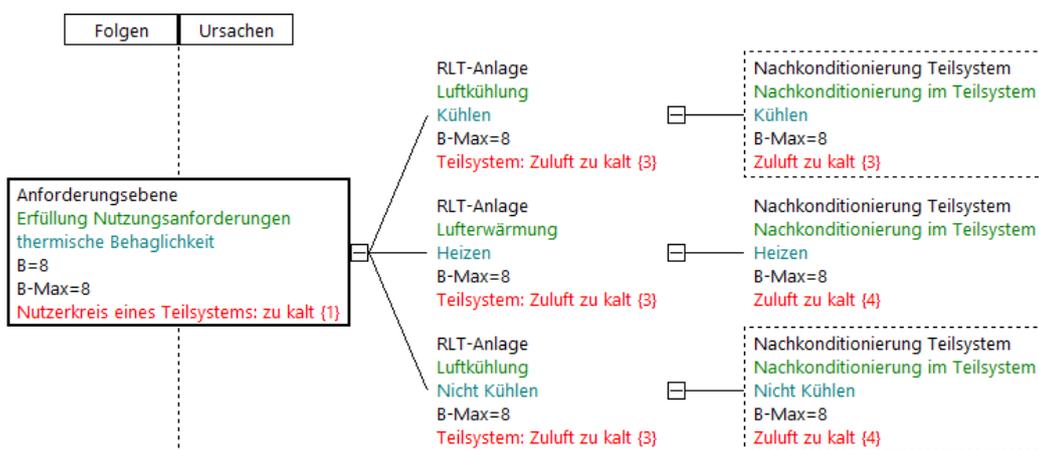


Abbildung 2-26: Fehlernetz RLT-Anlage Grundstruktur: Anforderungsebene Nutzerkreis eines Teilsystems zu kalt

Fehler: Nutzerkreis eines Teilbereichs zu kalt

Dieser Fehler kann auftreten, wenn kurz vor der Übergabe in einem Raum die Zuluft nachkonditioniert wird. Mögliche Fehlerursachen sind bei den Komponenten zum kühlen oder heizen des Luftstroms in den Betriebszuständen Heizen, Kühlen oder nicht Kühlen

zu suchen. Der Fehler wirkt sich nur auf einen kleinen Teil der Nutzer aus und wird mit der Bedeutung B=6 bewertet.

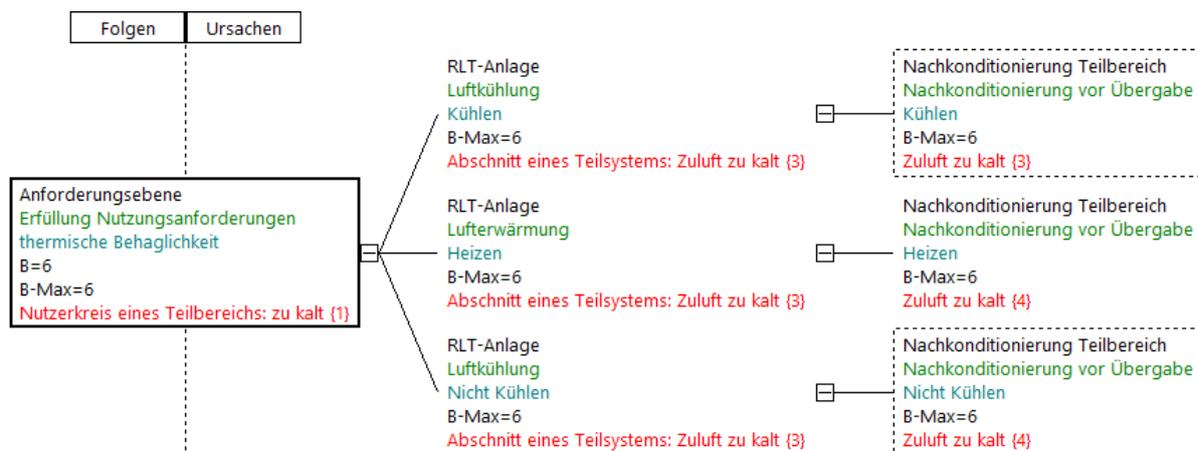


Abbildung 2-27: Fehlernetz RLT-Anlage Grundstruktur: Anforderungsebene Nutzerkreis eines Teilbereichs zu kalt

Fehler: Jeweiliger Nutzerkreis zu trocken

Der Behaglichkeitsfehler zu trocken kann, wie die Fehler zu warm oder zu kalt einen beschränkten Nutzerkreis betreffen. Der vom Fehler betroffene Nutzerkreis ergibt sich aus der Stelle, an der ein Luftbefeuchter oder Trockner in der Anlage eingebaut ist (zentrale Konditionierung, Nachkonditionierung in Teilsystemen oder zum Raum gehörige Nachkonditionierung). Der Fehler führt zum einem Funktionsverlust

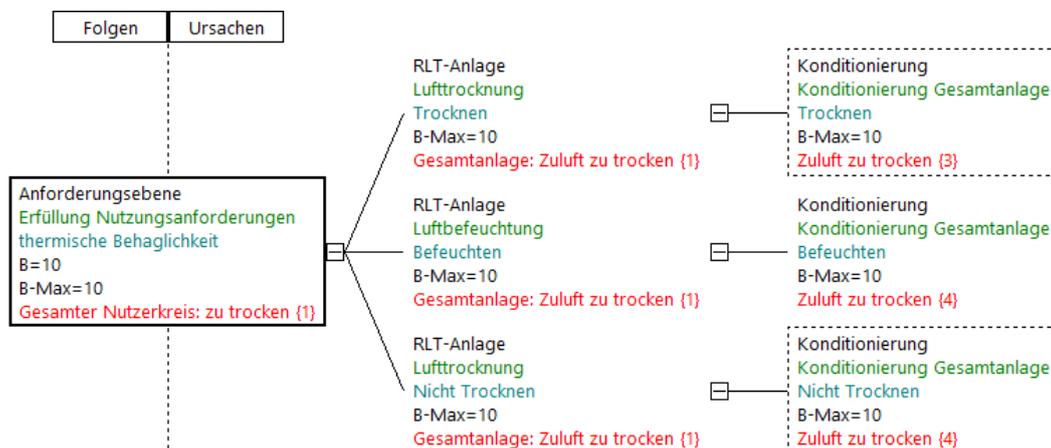


Abbildung 2-28: Fehlernetz RLT-Anlage Grundstruktur: Anforderungsebene Gesamter Nutzerkreis zu trocken

und wird, je nach Lage der Komponente mit der Bedeutung B=10, B=8 oder B=6 bewertet. Der Fehler kann im Betriebszustand Befeuchten durch eine zu kleine Befeuchterleistung durch den Luftbefeuchter verursacht werden. Auch kann die Trocknerleistung im Betriebszustand Trocknen zu groß sein. Ist im Betriebszustand „Nicht Trocknen“ der Trockner aktiv tritt der Fehler ebenfalls auf. Ein Fehlernetz ist in Abbildung 2-28 zu sehen.

Fehler: Jeweiliger Nutzerkreis zu feucht

Der Fehler kann im Betriebszustand Befeuchten oder nicht Befeuchten durch eine zu große Befeuchterleistung verursacht werden. Auch kann die Trocknerleistung im Betriebszustand Trocknen zu klein sein. Je nach Lage der Komponenten zur Lufttrocknung und Befeuchtung kann ein verschiedener Nutzerkreis von dem Fehler betroffen sein. Bei dem Fehler handelt es sich um einen Funktionsverlust. Die Fehlerbedeutung ist je nach betroffenem Nutzerkreis B=10, B=8 oder B=6. In Abbildung 2-29 ist ein Fehlernetz dargestellt.

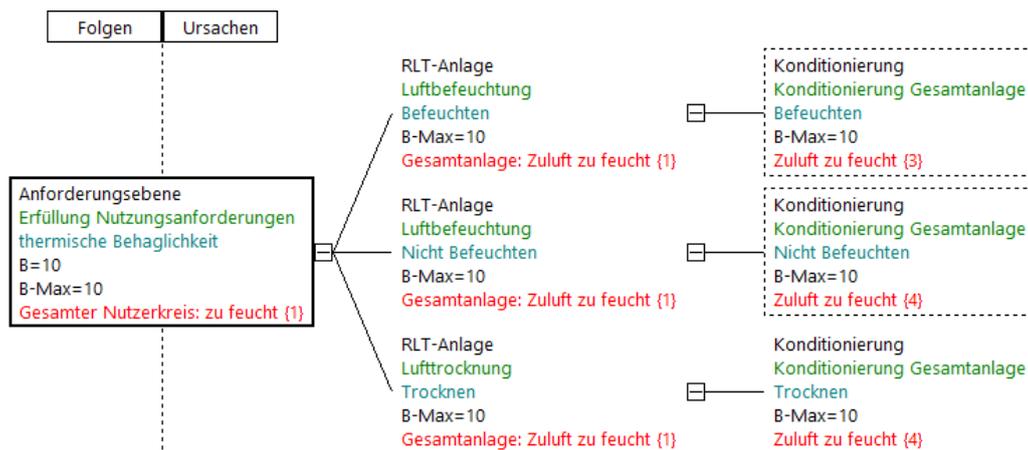


Abbildung 2-29: Fehlernetz RLT-Anlage Grundstruktur: Anforderungsebene Gesamter Nutzerkreis zu feucht

Fehler: Gesamter Nutzerkreis abgestandene Raumluft

Beklagt sich der gesamter Nutzerkreis über abgestandene Raumluft wird im Betriebszustand Lüften ein zu kleiner Luftvolumenstrom durch die Luftförderung transportiert. Die Fehlerursache ist bei den Ventilatoren, in erhöhten Druckverlusten oder Leckagen der Anlagenkomponenten vor der Verteilung zu suchen. Es können neben den Fehler der Luftförderung, je nach Anlagenkonfiguration, weitere Elemente wie Klappen mit dem Fehler „Gesamtanlage: Zuluftvolumenstrom zu klein“ verknüpft werden. Der Fehler hat eine Bedeutung von B=10. Das Fehlernetz ist in Abbildung 2-30 zu sehen.



Abbildung 2-30: Fehlernetz RLT-Anlage Grundstruktur: Anforderungsebene Gesamter Nutzerkreis Abgestandene Raumluft

Fehler: Nutzerkreis eines Teilsystems Abgestandene Raumluft

Wie das Fehlernetz in Abbildung 2-31 zeigt tritt dieser Fehler auf, wenn in der Luftverteilung in einem Teilsystem ein zu kleiner Luftvolumenstrom transportiert wird. Als

Fehlerursachen kommen Volumenstromregler in Betracht. Auch können je nach Anlage weitere Teilsystemkomponenten, die einen erhöhten Druckverlust oder Luftleckagen verursachen können, mit dem Fehler verknüpft werden. Der Fehler führt zu einem Funktionsverlust in einem Teilsystem und ist mit B=8 bewertet.

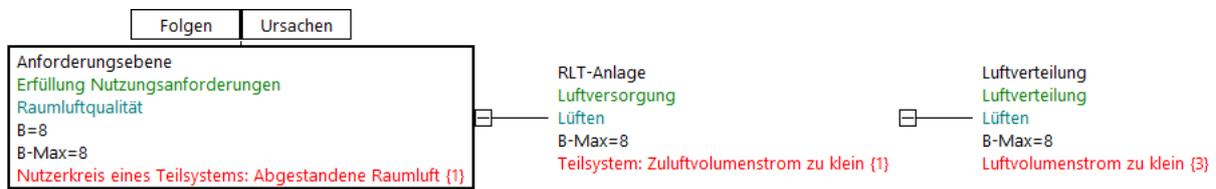


Abbildung 2-31: Fehlernetz RLT-Anlage Grundstruktur: Anforderungsebene Nutzerkreis eines Teilsystems Abgestandene Raumluft

Fehler: Nutzerkreis eines Teilbereichs Abgestandene Raumluft

Wird nur in einem Abschnitt eines Teilsystems über abgestandene Raumluft geklagt kann der Luftdurchlass eine Fehlerursache sein. Auch können Leckagen oder Druckverluste der Komponenten unmittelbar vor dem Raum eine Ursache darstellen. Der Funktionsverlust hat eine Bedeutung von B=6. Das Fehlernetz der Grundstruktur ist in Abbildung 2-32 zu sehen.

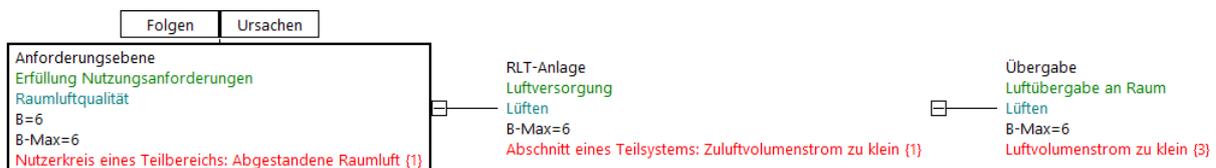


Abbildung 2-32: Fehlernetz RLT-Anlage Grundstruktur: Anforderungsebene Nutzerkreis eines Teilbereichs Abgestandene Raumluft

Fehler: Gesamter Nutzerkreis verunreinigte Raumluft

Dieser Fehler hat Einfluss auf den gesamten Nutzerkreis und besitzt daher die Bedeutung B=10. Ursachen sind in einem Fehler eines zentralen Luftfilters zu suchen oder in einem

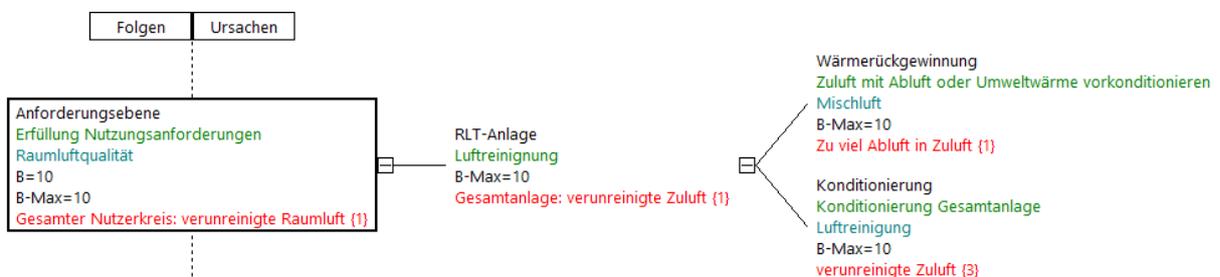


Abbildung 2-33: Fehlernetz RLT-Anlage Grundstruktur: Anforderungsebene Gesamter Nutzerkreis verunreinigte Raumluft

Wärmerückgewinnungssystem, welches Abluft der Zuluft beimischt. Das zugehörige Fehlernetz ist in Abbildung 2-33 zu sehen.

Fehler: Eingeschränkter Nutzerkreis verunreinigte Raumluf

Wirkt sich der Fehler verunreinigter Raumluf auf einen begrenzten Nutzerkreis aus, ist die Fehlerursache entweder bei einem Luftfilter für ein ganzes Teilsystem oder bei einem Luftfilter unmittelbar vor der Übergabe zu einem Raum zu suchen. Je nach Größe des betroffenen Nutzerkreises ist die Fehlerbedeutung B=8 oder B=6. Ein Fehlernetz ist in Abbildung 2-34 dargestellt.

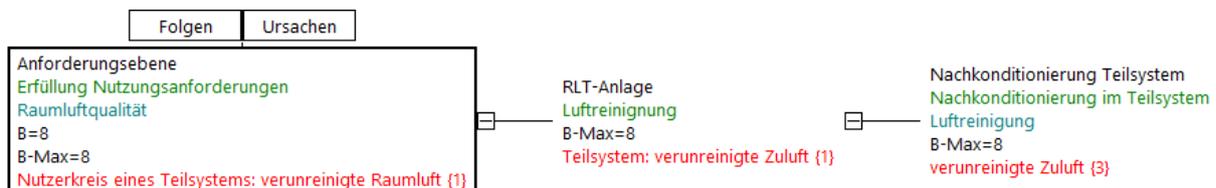


Abbildung 2-34: Fehlernetz RLT-Anlage Grundstruktur: Anforderungsebene Nutzerkreis eines Teilsystems verunreinigte Raumluf

2.8.5.2 Effizienzeinschränkende Fehler

Die zugehörigen Fehlernetze sind umfangreich und werden daher in den Anhang A6-1 ausgelagert.

Fehler: Ineffizienz Gesamtanlage oder mehrerer Teilsysteme

Der Fehler kann durch die Luftförderung, der zentralen Luftkonditionierung oder der Wärmerückgewinnung verursacht werden. Die Luftförderung ist für den Fehler verantwortlich, wenn im Betriebszustand Lüften oder nicht Lüften ein zu großer Luftvolumenstrom gefördert wird. Auch können erhöhte Druckverluste oder Leckagen je nach Regelungsart zur Ineffizienz führen.

Liegt die Ursache in der Konditionierung wird die Luft im jeweiligen Betriebszustand zu stark konditioniert oder eine Konditionierungskomponente ist aktiv obwohl sie inaktiv sein sollte. Ebenso können Komponenten in einem durch die Nutzung bedingten Zustand sein (z.B. verschmutzt oder verschlissen), der es erlaubt die Funktion zu erfüllen, jedoch erhöhte Energieverbräuche nach sich zieht.

Ist das Wärmerückgewinnungssystem für den Fehler verantwortlich, wird in einem Betriebszustand nicht das volle Potential der WRG genutzt. Wird Wärme rückgewonnen obwohl dies der Behaglichkeit abträglich ist, wird dieser Fehler ebenfalls zu den effizienzverschlechternden gezählt. Eine als Funktionsverlust gewertete Fehlerfolge wäre möglich. Jedoch werden die genutzten Wärmequellen nicht weit vom Behaglichkeitsfeld der Nutzer entfernt sein (meist Nutzung Abluft als Wärmequelle) und Komponenten der Luftkonditionierung könnten diese Fehler ausgleichen. Es sollte sich also vorrangig um einen effizienzbetreffenden Fehler handeln. Die Fehlerbedeutung ist mit B=8 bewertet.

Fehler: Ineffizienz eines Teilsystems

Der Fehler ist mit einer Bedeutung von $B = 7$ bewertet. Er tritt auf, wenn durch die Luftverteilung einem Teilsystem ein zu großer Luftvolumenstrom zur Verfügung gestellt wird. Auch tritt der Fehler ein, wenn die Nachkonditionierung eines Teilsystems den Zuluftvolumenstrom zu stark konditioniert oder die Komponenten nicht intermittieren.

Fehler: Ineffizienz eines Teilbereichs

Fehler von der Übergabe oder direkt vorgeschalteten Nachkonditionierungssystemen können die Effizienz eines Teilbereichs beeinträchtigen (z.B. Nacherhitzer vor dem Raum). Ursachen für den Fehler sind ein zu großer Luftvolumenstrom, eine zu starke Konditionierung der Zuluft für einen Bereich eines Teilsystems oder nicht intermittierende Komponenten. Der Fehler ist mit der Fehlerbedeutung $B = 5$ bewertet.

2.9 Anwendung der Grundstruktur auf die Versuchsanlage

2.9.1 Elemente und Struktur der Versuchsanlage

Mit den Festlegungen aus dem Kapitel 2.8 wird nun die RLT-Versuchsanlage abgebildet. Die Versuchsanlage ist eine Zu- und Abluftanlage. Sie umfasst ein Kreuzstrom-Wärmerückgewinnungssystem mit Leistungsregelung per Bypass, einer Mischluftkammer, einem Luftherhitzer zur zentralen Konditionierung, einem Luftherhitzer zur Konditionierung des Teilbereichs Pool, Volumenstromregler für die Teilbereiche und zwei Kanäle zur Außenluftansaugung von denen einer über einen Erdwärmeübertrager verfügt. Alle Luftfilter sind der zentralen Luftkonditionierung zuzuordnen. Die Fort- und Außenluftkanäle verfügen je über eine Klappe, um den Strömungsweg zu schließen. Die Zu- und Abluftventilatoren sind Drehzahl geregelt. Die Wärmepumpe als WRG zur Abluftentfeuchtung und Vorerwärmung der Zuluft ist nach jetzigem Stand noch nicht funktionsfähig und nicht Bestandteil dieser Betrachtung.

Die Anlagenkonfiguration lässt die Betriebszustände Lüften, nicht Lüften, Heizen und nicht Heizen zu, um die Funktionen Raumluftqualität und thermische Behaglichkeit zu gewährleisten. Die Funktion Luftreinigung kann ebenfalls erfüllt werden.

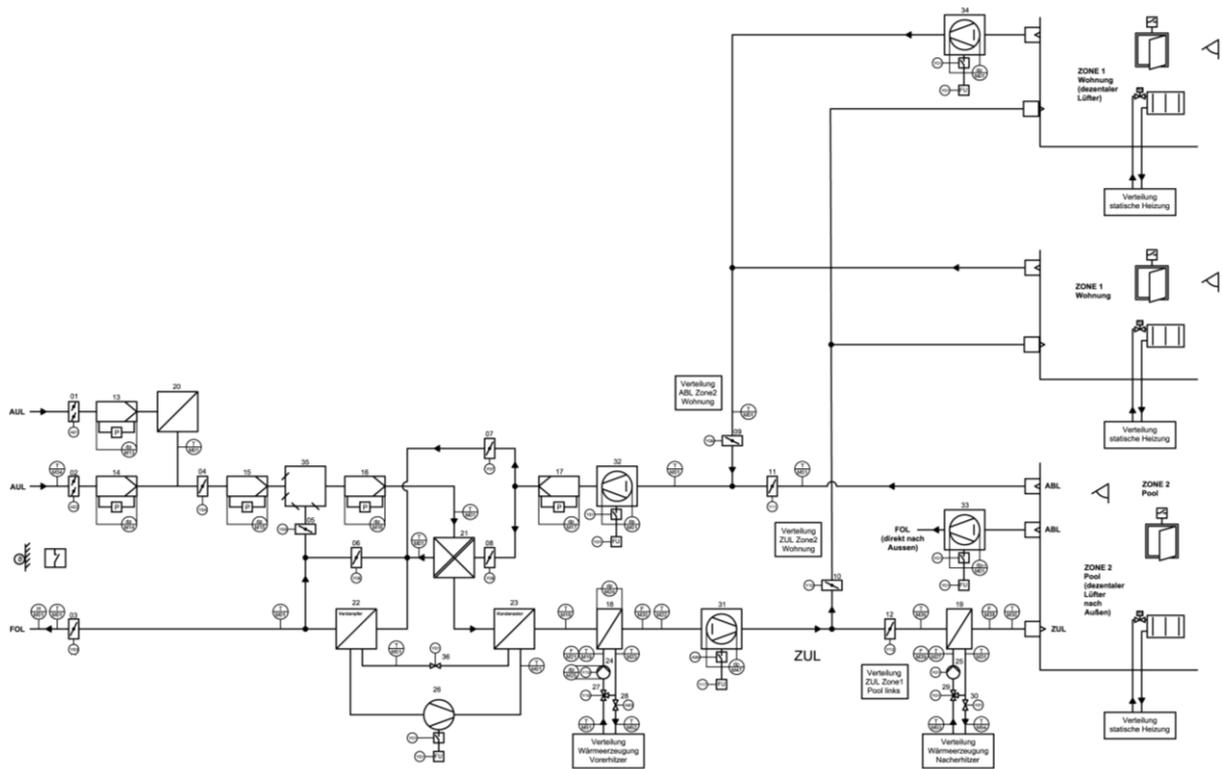


Abbildung 2-35: Schema RLT-Versuchsanlage

Die Grundstruktur aus Abbildung 2-21 wurde zum Strukturbaum in Abbildung 2-36 erweitert. An dem Element Übergabe ist der Luftdurchlass angeschlossen. Da es in der FMEA darum gehen soll grundsätzliche Anlagenfehler zu finden und diese für den weiteren Projektablauf zu priorisieren ist es ausreichend jede Übergabeart nur einmal an das Element Übergabe anzuschließen. Aus diesem Grund ist auch an das Element Luftverteilung nur ein FMEA-Modul Volumenstromregler gekoppelt. Der Ventilator mit Drehzahlregelung ist an das Element Luftförderung angeschlossen. Das Element Wärmerückgewinnung verfügt über einen Erdwärme-Übertrager, die Mischluftkammer und einen Kreuzstrom-Wärmeübertrager mit Bypass. An das Element Konditionierung schließen sich ein Lufterhitzer und Luftfilter an. Die Nachkonditionierung für Teilbereiche verfügt über einen zusätzlichen Lufterhitzer.

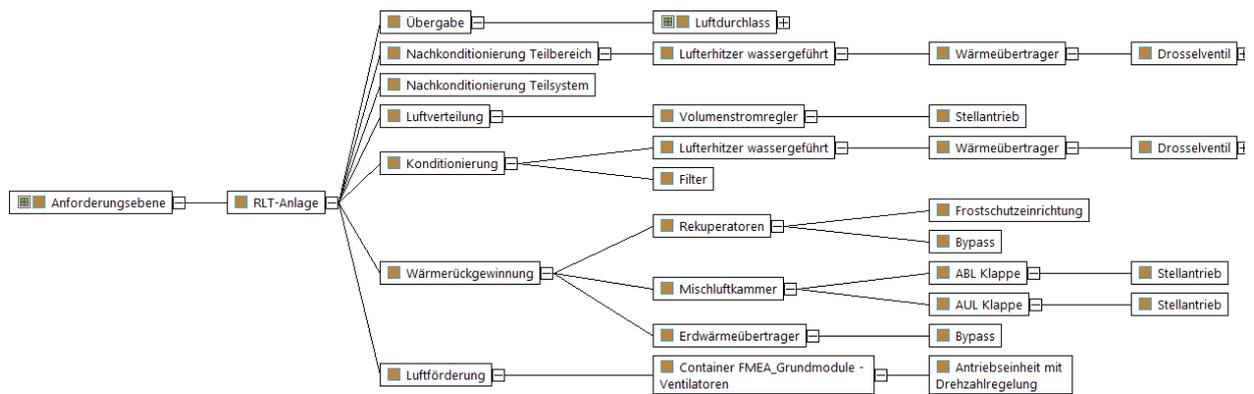


Abbildung 2-36: FMEA-Strukturbaum der RLT-Versuchsanlage

2.9.2 Fehlernetze der Versuchsanlage

2.9.2.1 Funktionseinschränkende Fehler

Die mitunter sehr ausgedehnten Fehlerbäume wurden in den Anhang A6-2 ausgelagert.

Fehler: Gesamter Nutzerkreis zu warm

Der Fehler kann im Betriebszustand „Heizen“ auftreten, wenn der Lufterhitzer mit einer zu hohen thermischen Leistung versorgt wird. Der Lufterhitzer kann diese Leistung durch eine Massestromregulierung mit einem Drosselventil beeinflussen. Ist die Leistung zu hoch sollte in jedem Fall ein Fehler des Drosselventils vorliegen. Im Betriebszustand „Nicht Heizen“ ist das Drosselventil ebenfalls die Fehlerursache.

Fehler: Nutzerkreis eines Teilbereichs zu warm

Ist ein kleiner Nutzerkreis vom Behaglichkeitsfehler zu warm betroffen, ist die Massestromregulierung des Nacherhitzers die Ursache. Der Fehler kann in den Betriebszuständen Heizen und nicht Heizen auftreten.

Fehler: Gesamter Nutzerkreis zu kalt

Als Fehlerursachen kommen der Lufterhitzer und seine Schnittstellen in Betracht.

Eine zu niedrige Lufteintrittstemperatur sollte, wenn kein Planungsfehler vorliegt, als Fehlerursache ausgeschlossen werden können. Ein zu großer über den Erhitzer geförderter Luftvolumenstrom kann durch eine im Vorfeld durchgeführte Prüfung der Luftförderung ausgeklammert werden.

Eine zu niedrige Vorlauftemperatur oder ein zu kleiner heizungsseitiger Massestrom ist der FMEA der Heizungsversuchsanlage zugeordnet. Diese Fehler werden durch heizungsseitige Fehlererkennungsmaßnahmen der hydraulischen Schaltung entdeckt (siehe auch Kapitel 3.6.3 und 3.6.4).

Als Fehlerursachen bleiben ein mangelhafter Wärmeübertragerzustand (nicht entlüftet, verschmutzt, ...), eine fehlerhafte Mengenregulierung über das Drosselventil oder geschlossene Fließwege übrig.

Denkbare Fehlerursachen durch die Wärmerückgewinnung können durch den Lufterhitzer ausgeglichen werden und sind somit effizienzverschlechternde Fehler. Es gibt in der Versuchsanlage keine Kühlkomponenten, die diesen Fehler verursachen können.

Fehler: Nutzerkreis eines Teilbereichs zu kalt

Ursachen des Fehlers liegen in dem Nacherhitzer vor dem Pool und seinen Schnittstellen. Es können die gleichen Aussagen wie im Fehler „Gesamter Nutzerkreis zu kalt“ getroffen werden.

Fehler: Gesamter Nutzerkreis abgestandene Raumluft

Dieser Fehler tritt im Betriebszustand Lüften auf und beinhaltet den Verlust der Funktion Raumluftqualität, der sich auf den gesamten Nutzerkreis auswirkt. Eine Fehlerursache ist ein zu kleiner geförderter Luftvolumenstrom durch die Ventilatoren. Weiterhin sind Luftleckagen zentraler Komponenten denkbar. Erhöhter Druckverlust zentraler Komponenten führen bei differenzdruckgeregelten und stufig geschalteten Ventilatoren ebenfalls zu kleineren Luftvolumenströmen.

Fehler: Nutzerkreis eines Teilsystems abgestandene Raumluft

Betrifft der Fehler abgestandene Raumluft den Nutzerkreis eines Teilsystems, ist von einer Ursache in dem Teilsystem auszugehen. In der Versuchsanlage sind Volumenstromregler des betroffenen Teilsystems das Ursachenelement.

Die Fehlerursache kann jedoch (je nach Regelungsart) in anderen Teilsystemen der Anlage liegen, wenn dieses mit einem zu großen Luftvolumenstrom versorgt wird. Diese Fehlerursache wird jedoch den effizienzverschlechternden Fehlern zugeordnet, da im betreffenden Teilsystem ein unnötig hoher Luftvolumenstrom transportiert wird.

Fehler: Nutzerkreis eines Teilbereichs abgestandene Raumluft

Gibt es in nur einem Raum ein Problem mit abgestandener Raumluft kommen die Komponenten, die zu dem Teilbereich gehören in Betracht. Diese sind in der Versuchsanlage der Luftdurchlass und der Nacherhitzer. Die Komponenten können Leckagen oder erhöhte Druckverluste aufweisen die als Fehlerursache dienen. Wie bei dem Fehler „Nutzerkreis eines Teilsystems abgestandene Raumluft“ können die Fehlerursachen in einem anderen Teilbereich liegen. Sie sind aus den gleichen Gründen hier nicht aufgeführt.

Fehler: Gesamter Nutzerkreis verunreinigte Raumluft

Die in der Versuchsanlage eingebauten Luftfilter sind zentral angeordnet. Sie können eine mögliche Fehlerursache sein. Weiterhin gibt es eine Mischluftkammer die durch

einen zu hohen Abluftanteil die Zuluft verschmutzen kann. Auch ist eine Leckage zwischen Zu- und Abluftseite des Kreuzstrom-Wärmeübertragers möglich.

2.9.2.2 Effizienzeinschränkende Fehler

Fehler: Ineffizienz der Gesamtanlage

Wird durch einen Fehler die Effizienz der gesamten Versuchsanlage beeinträchtigt, kommen als Fehlerquellen die Komponenten der Wärmerückgewinnung, der Luftkonditionierung und Luftförderung in Betracht.

Effizienzverschlechternde Fehlerursachen durch den Lufterhitzer sind die, die auch zu einem Fehler „zu warm“ führen. Weitere Fehlerursachen sind verschmutzte oder nicht entlüftete Wärmeübertrager sowie luftseitige Leckagen. Leckagen des Luftfilters können als Ursache auftreten. Je nach Regelung der Luftförderung können auch erhöhte Druckverluste zu hohen Verbräuchen führen.

Die Wärmerückgewinnung ist für eine Effizienzverschlechterung ursächlich, wenn das mögliche Rückgewinnungspotenzial nicht ausgeschöpft wird (Zustand Heizen und Kühlen), oder die Zuluft so stark vorkonditioniert wird, dass weitere Komponenten aktiv werden müssen, um einen Behaglichkeitsfehler zu vermeiden.

Fehler: Ineffizienz eines Teilsystems

In der Versuchsanlage sind den Teilsystemen nur Komponenten der Luftverteilung als Volumenstromregler zugeordnet. Die Fehlerfolge tritt auf, wenn einem Teilsystem im Zustand Lüften oder nicht Lüften ein zu großer Luftvolumenstrom bereitgestellt wird. Weiterhin können Leckagen oder ggf. auch erhöhte Druckverluste im Teilsystem den Fehler verursachen. An das Element Nachkonditionierung der Teilsysteme ist keine Komponente angeschlossen, wodurch dieses Element auch keine Fehler verursachen kann.

Fehler: Ineffizienz eines Teilbereichs

Ursachen für diesen Fehler sind die Übergabe und die Nachkonditionierung eines Bereichs. Die Komponente des Elements Übergabe ist der Luftdurchlass. Der Luftdurchlass ist die Ursache, wenn in einem Betriebszustand dem Raum/Bereich ein unnötig hoher Luftvolumenstrom zur Verfügung steht.

Effizienzverschlechternde Fehlerursachen durch den Nacherhitzer sind die, die auch zu einem Fehler „zu warm“ führen können. Weitere Fehlerursachen sind verschmutzte oder nicht entlüftete Wärmeübertrager.

Alle Leckagen der zum Teilbereich des Systems gehörenden Komponenten treten als mögliche Ursachen auf. Je nach Regelung der Luftförderung können auch erhöhte Druckverluste zu hohen Verbräuchen führen.

2.10 Risikobewertung und FED-Möglichkeiten

2.10.1 Einleitung

Für die Komponenten der Heizungsversuchsanlage wurde eine Fehlerbewertung mithilfe der Aufgabenpriorität durchgeführt. Die Ergebnisse werden im Folgenden nur verkürzt dargelegt. Die ausführlichen Bewertungen können Anhang A6-3 in tabellarischer Form entnommen werden.

Aus der literarischen Fehlerrecherche sind bereits einige Fehler, die in der FMEA der Versuchsanlage aufgenommen wurden, bekannt. Teilweise wurden in den Quellen Aussagen zur Fehlererkennung und den zu verwendenden Messwerten oder regelungstechnischen Signalen getroffen. Dieses Kapitel fasst die Aussagen der bereits erprobten FED-Möglichkeiten komponentenweise zusammen. Anhand der in der Automation der Versuchsanlage auflaufenden Datenpunkte werden die FED-Methoden aus der Recherche kurz im Kontext der Versuchsanlage diskutiert.

Im Anhang A6-4 sind die recherchierten FED-Möglichkeiten tabellarisch aufgeführt. Die benötigte Gebäudeautomations-Effizienzklasse nach DIN EN 15232 Teil 1 und der benötigte Automationsgrad nach DIN EN 18599 Blatt 11 wurden ergänzt. Die nötige Monitoringklasse nach VDI 6041 zur FED ist die Klasse 1.

2.10.2 Zentrale Komponenten

Ventilator

Fehler des Ventilators haben auf Grund der hohen Bedeutung für die Anlage und einer relativ hohen Fehlerhäufigkeit eine hohe Aufgabenpriorität.

Um die Aktivität von Ventilatoren zu prüfen können vorgegebene Zeitprogramme, erfasste Nutzungszeiten oder Schaltsignale des Ventilators mit Messungen am Ventilator (bspw. elektrische Leistungsaufnahme, Volumenstrom oder Differenzdruck) abgeglichen werden (vgl. [Wagner et. al. (2006) S.79], [Kleber et. al. (2009)]). Dieses Vorgehen kann in der Versuchsanlage zur Anwendung kommen, da Schaltsignale und Differenzdruckmessungen der Ventilatoren vorhanden sind.

Häufig werden Messungen des Luftvolumenstroms herangezogen, um Aussagen über zu hohe oder kleine Luftvolumenströme treffen zu können (vgl. [Ebel et. al. (2003) S.172], [Görres et. al. (2007) S. 93], [Großklos et. al. (2008) S.86] oder [Hauser et. al. (2004) S.71-72]). Dieses Vorgehen scheidet aus da die benötigte Messung nicht vorhanden ist. Eine Abschätzung des Luftvolumenstroms aus Daten der Wärmemengenzähler am Luftherhitzer ist möglich (vgl. [Fisch et. al. (2005) S. 57-58]). Eine Wärmemengenmessung ist in der Versuchsanlage jedoch nicht vorhanden.

Zur Bestimmung der Ventilatoreffizienz ist eine Messung der elektrischen Leistungsaufnahme nötig (vgl. [AMEV (2008) Anhang, Kap. 6.2, S.81]). Eine Anwendung scheidet aus.

In den später vorgestellten Methoden zur Fehlererkennung im Bereich der Luftförderung- und -verteilung, werden häufig das Stell- und Schaltsignal sowie der Differenzdruck der Ventilatoren herangezogen. Hierdurch werden effizienzbetreffende Fehler erkannt können jedoch nicht diagnostiziert werden.

Durch eine Messung des statischen Druckes in Nähe der Volumenstromregler können Rückschlüsse auf den vom Ventilator geförderten Luftvolumenstrom erfolgen (vgl. [Röther et. al. (2015) S. 35]). Hierfür wurde ein Verfahren entwickelt um Fehler am Ventilator oder aber am angeschlossenen Leitungsnetz entdeckt werden können.

Luftherhitzer

Sämtliche Fehlerursachen des zentralen Luftherhitzers haben eine hohe Aufgabenpriorität.

Um die Aktivität von Luftherhitzern zu erkennen kann keine Wärmemengenmessung mit dem geforderten Betriebszustand abgeglichen werden (vgl. [Feist et. al. (2003) S.111], [Stockinger et. al. (2010) S.82]). Eine Anwendung scheidet aus. Jedoch kann statt der Wärmemengenmessung auch die Lufteintritts- und Luftaustrittstemperatur verwendet werden (vgl. [Gropp et. al. (2003) S. 144]). Eine Umsetzung erfolgte für die luftherwärmenden Komponenten (Luftherhitzer, WRG und Mischluftkammer).

Rückschlüsse, ob der Luftherhitzer erwartungsgemäß funktioniert, lassen sich durch einen Vergleich der gemessenen Zulufttemperatur mit der Soll-Zulufttemperatur ziehen (vgl. [Grob et. al. (2002) Anhang A S. 185-187]). Eine Berücksichtigung des Betriebszustand des Luftherhitzers sollte jedoch dabei erfolgen (vgl. [House et.al. (2001) Regel 3]). Eine Auswertung der gemessenen und geforderten Zulufttemperatur kann in der Versuchsanlage erfolgen.

FED-Maßnahmen aus der Recherche die Fehler der Wärmeversorgung am Luftherhitzer entdecken sollen, benötigen Wärmemengenmessungen (vgl. [Hyvfirinen et. al. (1996) Kap. 3.1.2]). Diese Messungen sind nicht vorhanden. Weiterhin werden die Fehlererkennungsmöglichkeiten im FMEA Kapitel der Heizungsversuchsanlage diskutiert. Die entwickelten Verfahren werden im Kapitel 3.6 vorgestellt und können auf den Heizkreis des Luftherhitzers angewendet werden.

Zur Beurteilung der Effizienz des Erhitzers werden Druckverlustmessungen (wasser- und luftseitig) oder Rücklauf температурmessungen(wasserseitig) in Verbindung mit den Volumenströmen (wasser- und luftseitig) ausgewertet (vgl. [Deeskow et. al. (2010) S.25], [Hyvfirinen et. al. (1996) Kap. 3.1.2]). Dieses Vorgehen scheidet aus, da kleine separaten Rücklauf temperaturen, Druckverluste oder Volumenströme der Luftherhitzer erfasst werden.

Luftfilter

Alle Fehlerursachen der zentralen Luftfilter haben eine hohe Aufgabenpriorität.

Verschmutzte Filter können durch Abstriche am Filtermaterial und dem Anlegen von Kulturen gefunden werden (vgl. [Niekamp et. al. (2017) S. 35-36 und Anhang 4]). Dieses Verfahren eignet sich nicht für eine automatisierte Fehlererkennung. Auch sollten die Verschmutzungen bei den vorgeschriebenen Wartungen des Filters auffallen.

Auch lassen sich mit Hilfe eine Differenzdruckmessung am Filter Leckagen oder Verschmutzungen an diesem erkennen (vgl. [Ebel et. al. (2003) S. 64-65 und Abb 4.2.7-3]). Die Differenzdruckmesswerte müssen mit, vom aktuellen Luftvolumenstrom abhängigen, Referenzwerten verglichen werden. In der Versuchsanlage gibt es einen Differenzdruckwächter, der mit einem statischen Grenzwert arbeitet. Dieser wird bereits ausgewertet.

Erdwärmeübertrager

Fehler die den Erdwärmeübertrager an sich betreffen haben trotz ihrer Auswirkung auf die ganze RLT-Anlage, durch ihre geringe Fehlerhäufigkeit, nur eine mittlere Aufgabenpriorität. Sind der Bypass oder anderweitige mechanische Komponenten die Fehlerursache am Erdwärmeübertrager, besitzen diese Fehler jedoch eine hohe Aufgabenpriorität.

Um Fehler am Erdwärmeübertrager zu finden, sollte geprüft werden, ob er der aktuell erforderlichen Luftkonditionierung zuträglich ist. Hierzu ist die aktuelle Außentemperatur, die Temperatur der Luft nach dem Erdwärmeübertrager und der aktuelle Betriebszustand der RLT-Anlage notwendig (vgl. [Wille et. al. (2004) S. 37-39], [Gropp et. al. (2003) S. 138] und [Pafferott et. al. (2002) S. 18]). Auf eine Umsetzung in der Versuchsanlage wurde verzichtet, da es keine repräsentative Außentemperaturmessung gibt und der Bypass des Erdwärmeübertragers nur händisch bedient werden kann.

Zur Prüfung der Leistungsregelung des Erdwärmeübertragers im Teillastbetrieb ist die Außenlufttemperatur, die Temperatur am Ende des Erdwärmeübertragers und die Temperatur der gemischten Luft aus dem Erdwärmeübertrager und aus dem Bypass nötig (vgl. [Gropp et. al. (2003) S. 139] und [Kerschberger et. al. (2002) S. 170]). Hierdurch können Mischungsverhältnisse der Luft aus dem Erdwärmeübertrager und dem Bypass abgeschätzt und diese in Verbindung mit dem Stellsignal der Leistungsregelung/Bypass ausgewertet werden. Das Vorgehen scheidet für die RLT-Versuchsanlage aus, da nur die gemischte Lufttemperatur nach Erdwärmeübertrager und Bypass gemeinsam gemessen wird.

Mischluftkammer

Alle Fehlerursachen der Mischluftkammer haben eine hohe Aufgabenpriorität.

Grundsätzlich ist es möglich mit Hilfe der außenluftseitigen Ein- und Austrittstemperaturen auf eine Aktivität der Mischluftkammer zu schließen und diese mit der geforderten Regelsequenz der Luftheizung abzugleichen. Ein Vorschlag hierzu wird im Kapitel 3.7.7 beschrieben.

Zur Prüfung der regelungstechnischen Ansteuerung der Mischluftkammer, kann das Stellsignal der Mischluftkammer mit der Regelsequenz der Luftheizung oder der Raumluftqualität abgeglichen werden (vgl. [Bollin et. al. (2008) S.67] und [House et.al. (2001) Regel 5 und 8]). Bei diesem Vorgehen wird nach regelungstechnischen Fehlern gesucht. Regelungstechnische Fehler sind nicht der Fokus des Forschungsprojektes. Der Außenluftanteil nach der Mischluftkammer kann abgeschätzt werden und in Verbindung mit dem Stellsignal der Mischluftkammer ausgewertet werden um fehlerhafte Klappenstellungen erkennen zu können (vgl. [House et.al. (2001) Regel 2 und 18] und [House et.al. (2001) Regel 10]). Hierfür müssen die außenluftseitige Ein- und Austrittstemperatur sowie die abluftseitige Eintrittstemperatur bekannt sein. Die Messungen der Temperaturen müssen ggf. durch Messungen der Luftfeuchtigkeit ergänzt werden um die Volumenstromanteile hinreichend genau berechnen zu können. Die Messungen sind in der RLT-Versuchsanlage vorhanden, jedoch scheint die Temperaturmessung am außenluftseitigen Eintritt der Mischluftkammer nicht valide. Auf eine Umsetzung wurde verzichtet.

Kreuzstrom-WRG

Auch bei der Kreuzstrom-WRG haben alle Fehlerursachen eine hohe Aufgabenpriorität.

Wie auch bei der Mischluftkammer oder dem Luftherhitzer ist es mit Hilfe der Ein- und Austrittstemperatur der WRG möglich auf deren Aktivität zu schließen und mit der geforderten Regelsequenz der Luftheizung abzugleichen. Ein umgesetzter Vorschlag wird im Kapitel 3.7.7 beschrieben.

Mit Hilfe der zu- und abluftseitigen Ein- und Austrittstemperaturen der WRG kann der Temperaturübertragungsgrad berechnet werden um diesen mit Referenzwerten zu vergleichen. Mit diesem Vorgehen können Fehler am Bypass/ der Leistungsregelung, Verschmutzungen oder Leckagen entdeckt werden (vgl. [Feist et. al. (2003) S.120] und [Lambertz et. al. (2006) S. 210]). Dieses Vorgehen ist in der RLT-Versuchsanlage grundsätzlich umsetzbar, jedoch liegen nicht genug Messwerte vor um Referenz-Temperaturänderungsgrade, für verschiedene Stellsignalbereiche und Volumenstromverhältnisse, bestimmen zu können.

In eine ähnliche Richtung geht das Vorgehen nach [Hausladen et. al. (2007) S. 41]. Hier wird, aus der Ablufttemperatur am WRG-Eintritt, der Zulufttemperatur am WRG-Eintritt und der Soll-Zulufttemperatur am WRG-Austritt, eine theoretische Stellung der Bypassklappe berechnet und diese mit dem tatsächlichen Stellsignal abgeglichen. Auch für dieses Vorgehen sind nicht genügend Messdaten, in verschiedenen Betriebszuständen, vorhanden um die theoretische Stellung der Bypassklappe valide ableiten zu können.

2.10.3 Teilsystem betreffenden Komponenten

Volumenstromregler

Fehlerursachen, die zum Funktionsverlust eines Teilsystems führen (verteilter Luftvolumenstrom zu klein) haben eine mittlere Priorität, da davon ausgegangen wird, dass die Folge dem Nutzer schnell auffällt. Ist die Fehlerfolge nur effizienzverschlechternd ist die Aufgabenpriorität hingegen hoch.

Um festzustellen, ob eine Volumenstromregler ordnungsgemäß funktioniert, kann der Volumenstrom an der Komponente gemessen und mit dem geforderten Soll- bzw. Planungswert verglichen werden. Zu kleine oder zu große Luftvolumenströme lassen sich so erkennen (vgl. [Birnbaum et. al. (2007) S.208] und [Jagnow & Gebhardt (2018) S.69]). Das Vorgehen scheidet aus, da keine Volumenstrommessungen vorgenommen werden. Eine weitere Möglichkeit der Fehlererkennung ist es die tatsächliche Klappenstellung des Volumenstromreglers zu bestimmen und mit dem Stellsignal des Volumenstromreglers bzw. dem Betriebszustand der RLT-Anlage abzugleichen (vgl. [Niekamp et. al. (2017) S. 18-19]). Dieses Vorgehen kann nicht umgesetzt werden, da die tatsächliche Klappenstellung nicht erfasst wird.

Unter Nutzung des gemessenen statischen Drucks vor dem Volumenstromregler und dem Stellsignal des Volumenstromreglers wurde, unter Verwendung des Differenzdrucks und des Stellsignals des Ventilators, ein Verfahren vorgeschlagen, dass unter anderem fehlerhafte Klappenstellungen an Volumenstromreglern erkennen kann. Das Verfahren wird im Kapitel 3.7.6 vorgestellt.

2.10.4 Teilbereich betreffenden Komponenten

Nacherhitzer

Fehlerursachen die zu einem Funktionsverlust und zum Fehler „Nutzerkreis eines Teilbereichs: zu kalt“ oder „Nutzerkreis eines Teilbereichs: abgestandene Raumluft“ führen sind mit einer mittleren Aufgabenpriorität bewertet. Effizienzverschlechternde Fehlerursachen haben eine hohe Aufgabenpriorität.

Die aus der Recherche aufgeführten möglichen FED-Maßnahmen wurden bereits in Kapitel 2.10.2 diskutiert.

Luftdurchlass

Fehlerursachen, die zum Funktionsverlust eines Teilbereichs führen (Luftvolumenstrom zu klein) haben eine niedrige Priorität, da die Folge dem Nutzer auffallen sollte. Ist die Fehlerfolge effizienzverschlechternd ist die Aufgabenpriorität hingegen mittel.

In der Recherche zu Fehlererkennungsmaßnahmen wurde, durch die Auswertung der spezifischen Leistungsaufnahme der Ventilatoren (SFP-Wert), ein erhöhter Druckverlust in einer RLT-Anlage festgestellt, dessen Ursache eine Nutzermanipulation am

Luftdurchlass war (vgl. [Großklos et. al. (2008) S.79-80]). Jedoch ist durch dieses Vorgehen eine Eingrenzung der Fehlerursache auf den Luftdurchlass nicht möglich. In der RLT-Versuchsanlage werden keine elektrischen Leistungsaufnahmen der Ventilatoren und Luftvolumenströme erfasst. Die Prüfung des SFP-Wertes zur Fehlererkennung scheidet damit aus.

Durch Auswertung von Messdaten des Raums, wie Luftfeuchtigkeit oder CO₂-Gehalt, können Rückschlüsse auf eine fehlerhafte Belüftung des Raums gezogen werden. Jedoch wäre auch bei diesem Vorgehen keine Eingrenzung auf den Luftdurchlass als Fehlerursache möglich.

Sollen Fehler am Luftdurchlass gefunden werden, müssten an jedem Durchlass separate Druck- oder Luftvolumenstrommessungen installiert werden. Dieses Vorgehen wäre sehr aufwendig.

Auf Grund der niedrigen Aufgabenpriorität wurden keine Fehlererkennungsmaßnahmen für Luftdurchlässe entwickelt und umgesetzt.

2.11 Risikoanalyse Kälteanlage

Für die Betrachtungen einer Kälteanlage mit den Methoden der FMEA wurden ausschließlich Kompressionskälteanlagen in Betracht gezogen. Diese Systemvariante ist die derzeit häufigste im Bereich der Gebäudetechnik. Von Vorteil ist, dass sich diese Systeme zwar in Hinblick auf die verwendete Verdichter-Bauart, den Verdampfer-Typ, die Art der Rückkühlung und das verwendete Kältemittel unterscheiden, jedoch thermodynamisch sehr ähnlich sind.

Im Wesentlichen sollen Fehler beim Betrieb der Kälteanlage identifiziert werden, um Fehlerfolgen zu vermeiden. Konkret sind dies den nachfolgenden Kategorien zugeordnete Bedeutungsprioritäten:

Tabelle 2-18: Einordnung der Bedeutung oder Schwere der Fehlerfolge für Kälteanlagen

Bedeutung / Priorität gering = 1 / hoch = 10	Kategorie	Beispiele
B = 1 zu planender Handlungsbedarf	Vermeidung von Mehrenergiebedarf	- Prozessollgrößen unlogisch - Wärmeübertrager verschmutzt - Erhöhte Pumpen- und Ventilator Drehzahl - Betriebsdauer und Bedarfsanalyse
B = 2 / nicht verwendet		
B = 3 / nicht verwendet		
B = 4 zeitnaher Handlungsbedarf	Optimierung des Kontroll- und Wartungsaufwandes	- Optimierung Reinigungsaufwand - Verringerung Kontrollintervalle
B = 5 / nicht verwendet		
B = 6 / nicht verwendet		
B = 7	Sicherstellung der Funktion	- Erhöhter Verschleiß - kurze Schaltintervalle

schneller Handlungsbedarf		- Thermische Überbelastung (Ölverbrennung)
B = 8 / nicht verwendet		
B = 9 / nicht verwendet		
B = 10 akuter Handlungsbedarf	Vermeidung von Anlagenausfällen	- Leckage Erkennung - Überdruckabschaltung - Überschreitung der zul. Verdichtungs-Endtemperatur

Tabelle 2-19: Einordnung der Auftretenswahrscheinlichkeit der Ursache für Kälteanlagen

Auftretenswahrscheinlichkeit t gering = 1 / hoch = 10	Kategorie	Beispiele
A = 1 hoher Erkennungsaufwand	Mehrenergiebedarf	- Prozesssollgrößen unlogisch - Betriebsdauer und Bedarfsanalyse
A = 2 / nicht verwendet		
A = 3 / nicht verwendet		
A = 4 mit Diagnosetools erkennbar	Wartungserfordernis	- Verhältnis zwischen Rückkühl- und Außentemperatur nicht plausibel - gemessener Prozessverlauf und Simulationsmodell unterscheiden sich stark - Erhöhte Pumpen- und Ventilator Drehzahl
A = 5 / nicht verwendet		
A = 6 / nicht verwendet		
A = 7 erkennbar durch Überwachung	Funktionseinschränkung	- Wärmeübertrager stark verschmutzt - Kältemittelverlust - Sollwerte werden nicht erreicht
A = 8 / nicht verwendet		
A = 9 / nicht verwendet		
A = 10 offensichtlich	Anlagenausfall	- Anlagenabschaltung durch Überwachungseinrichtungen (Überdruckabschaltung, Übertemperatur, Leckage)

Tabelle 2-20: Einordnung der Entdeckenswahrscheinlichkeit für Kälteanlagen

Entdeckenswahrscheinlichkeit gering = 10 / hoch = 1	Kategorie	Beispiele
E = 1 offensichtlich	Anlagenausfall	- Anlagenabschaltung durch Überwachungseinrichtungen (Überdruckabschaltung, Übertemperatur, Leckage)
E = 2 / nicht verwendet		
E = 3 / nicht verwendet		
E = 4 erkennbar durch Überwachung	Wartungserfordernis	- Verhältnis zwischen Rückkühl- und Außentemperatur nicht plausibel - gemessener Prozessverlauf und Simulationsmodell unterscheiden sich stark - Erhöhte Pumpen- oder Ventilatorumdrehzahl
E = 5 / nicht verwendet		
E = 6 / nicht verwendet		
E = 7 erkennbar Diagnosetools und Berechnungen	Mehrenergiebedarf	- Prozesssollgrößen unlogisch - Betriebsdauer und Bedarfsanalyse
E = 8 / nicht verwendet		
E = 9 / nicht verwendet		
E = 10 hoher Erkennungsaufwand	sporadische Ereignisse	- Fehler in der EMSR - Fehler die nur unter bestimmten Umständen auftreten

Wie aus der Tabelle 2-18 bis Tabelle 2-20 erkennbar, wurde von den möglichen 10 Abstufungen der Faktoren B, A und E für die Kältetechnik zunächst für das Projekt nur 4 Klassifikationen genutzt. Eine feinere Differenzierung ist jederzeit möglich. Durch diese Bewertungszuordnungen ist die Kritikqualitätsbeurteilung durch andere Verfahren abgelöst, entsprechend dem in 2.3.7 beschriebenen Verfahren möglich.

3 Fehlererkennung und Diagnose (FED)

3.1 Vorgehen und Begrifflichkeiten

Alle Methoden der Fehlererkennung und Diagnose können in diese grundsätzlichen Vorgehensschritte eingeteilt werden:

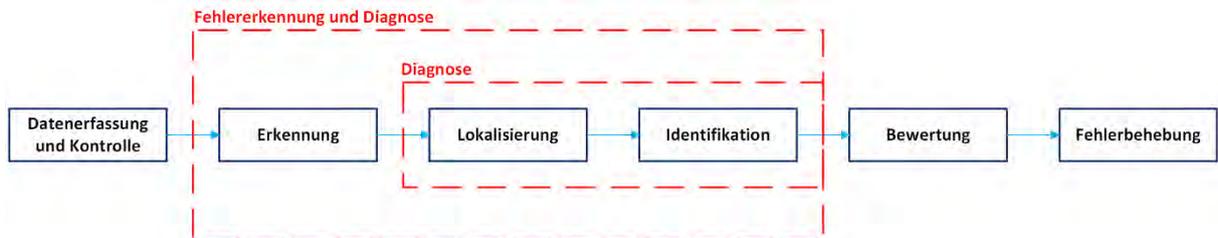


Abbildung 3-1: Allgemeiner Vorgang der Fehlererkennung und Diagnose

Nachdem der Methode Daten zur Verfügung gestellt werden, müssen diese zuerst auf Plausibilität und Vollständigkeit geprüft werden (vgl. [Sewe (2018) -1 S.27]). Zur Datenprüfung werden häufig einfach Wenn-Dann-Regeln angewendet (vgl. [Benndorf et.al. (2018)]). In der anschließenden Fehlererkennung werden diese Daten auf das Vorhandensein von Anlagenfehlern während des Prüfzeitraums hin untersucht. Konnte ein Fehler erkannt werden muss im Anschluss das fehlerhafte Teilsystem oder die fehlerhafte Komponente lokalisiert werden. Wurde der Fehler auf einen Systemteil eingegrenzt, wird die Fehlerart und deren Schwere bzw. Bedeutung im Bezug zum Gesamtsystem bestimmt (vgl. [Lunze (2016)] S.288). Hierfür eignet sich das durch die FMEA-Methode gewonnene Expertenwissen. Die Schritte Fehlerlokalisierung und Fehleridentifikation werden in anderen Veröffentlichungen auch als Fehlerdiagnose zusammengefasst. Nach der Diagnose werden die nötigen Gegenmaßnahmen zur Reaktion auf den Fehler abgewogen. Je nach Schwere der bewerteten Fehlerauswirkung werden Maßnahmen zur Fehlerbehebung ergriffen:

- den Prozess in sicheren Zustand bringen (z.B. Stoppen)
- den Prozess in zuverlässigen Zustand bringen (z.B. ändern von Temperaturen oder Drücken)
- die Rekonfiguration des Prozesses durch Nutzung redundanter Komponenten oder Sensorik
- die Inspektion zur genaueren Bestimmung des Fehlers
- die Wartung
- die Reparatur

(vgl. [Isermann (2011) S. 16] und [Isermann (1994) S.10])

In MFGeb sollen die Reaktionen auf einen Fehler ausschließlich durch das technische Personal erfolgen und sind daher nicht primärer Bestandteil des Forschungsprojektes.

Die Bewertung eines potentiellen Fehlers kann dazu genutzt werden, um zu entscheiden, für welche Fehler FED-Maßnahmen entwickelt werden sollen.

Eine Verfahrensweise zur Erstellung eines Programmes zur Überwachung von Maschinen wird bspw. in der DIN ISO 17359:2018-05 beschrieben. Das Vorgehen ist allgemein beschrieben und auf jede Maschine anwendbar. Die einzelnen Teilschritte gliedern sich in: Kosten-Nutzen-Analyse, Anlagenaudit, Zuverlässigkeits- und Gefährdungsaudit, Auswahl einer geeigneten Gefährdungsstrategie, Auswahl der Überwachungsmethode, Datenaufnahme und Analyse, Festlegung der Instandhaltungsaktion und Bewertung. Die FMEA ist im Bereich des Zuverlässigkeits- und Gefährdungsaudit eingebettet. Im Kapitel 7.3, Seite 13 wird die Durchführung einer FMEA oder FMECA² empfohlen „um zu erwartende Schäden, Symptome und potentielle Messparameter zu identifizieren, die die Existenz oder das Entstehen solcher Schäden anzeigen.

Im Anhang der Norm werden Formblätter für die Zuordnung von Schäden zu Messparametern oder Messtechniken eingeführt. Diese beinhalten Beispiele der Schadensarten mit Zuordnung zu möglichen Symptomen, Parameteränderungen oder Erkennungsverfahren. Fehler-Symptom-Matrizen wurden bspw. im Forschungsprojekt „Courage“ [Grob et. al. (2002)] zur Erfassung möglicher Fehlerarten und Fehlersymptome in einer Demonstrationsanlage eingesetzt. Die nachfolgende Grafik zeigt beispielhafte eine solche Matrix.

Maschinenart: Bezeichnung	Symptome / Parameteränderungen							
	Symptom A	Symptom B						
Schadensarten / Fehlerarten								
1 Fehler A								
2 Fehler B								
3								
4								
5								
6								
7								
8								
9								
10								

Abbildung 3-2: Allgemeiner Vorgang der Fehlererkennung und Diagnose

In der Literaturrecherche zu möglichen Methoden zur Fehlererkennung und Diagnose findet sich ein oft wiederholendes Vokabular wieder, welches an dieser Stelle kurz erläutert werden soll.

² FMECA – Failure Mode Effects and Criticality Analysis, Deutsch: Fehlermöglichkeits- Einfluss- und Kritikalitätsanalyse, erweiterte FMEA im Bereich der Ausfallbewertung mit konkreten Ausfallraten

Es werden die Begriffe Fault, Failure und Malfunction unterschieden und definiert:

Fehler (Fault): Ist ein Zustand in dem mindestens eine unerlaubte Abweichung einer Prozessgröße vom üblichen/akzeptablen Zustand auftritt

Ausfall (Failure): Ist ein Ereignis, das zum dauerhaften Verlust der Fähigkeit eines Systems führt, eine seiner Funktionen erfüllen zu können

Funktionsstörung (Malfunction): Ist ein Ereignis, dass zur nicht dauerhaften anormalen Erfüllung der Funktion eines Prozesses führt

(vgl. [Isermann (2011) Kapitel 2.2])

Weitere regelmäßig genutzte Begriffe werden hier erläutert:

Fehlerzustand (Error): Abweichung einer gemessenen oder berechneten Ausgangsgröße zur richtigen Ausgangsgröße (z.B. Soll-Wert)

Störgröße (Disturbance): Eine unbekannte, nicht beeinflussbare und unmessbare Eingangsgröße des Prozesses

Störeinfluss (Perturbation): Eine Eingangsgröße die zu einer zeitweisen Abweichung von der gewollten Ausgangsgröße führt

Symptom: Änderung/Abweichung einer überwachten Größe vom normalen Verhalten

Residuum (Residual): Differenz aus gemessener und durch ein Modell vorhergesagter Größe, die als Fehlerindikator genutzt wird

Sicherheit (Safety): Fähigkeit prozessbedingte Gefährdungen für Personen, die Umwelt oder Geräte zu vermeiden

Zuverlässigkeit (Reliability): Fähigkeit eines Prozesses in einem bestimmten Zeitraum seine Funktion erfüllen zu können (mittlerer Zeitraum zwischen Fehlern)

Verfügbarkeit (Availability): Wahrscheinlichkeit, dass ein Prozess in einem bestimmten Zeitraum zufriedenstellend funktioniert

(vgl. [Isermann & Ballé (1996)])

3.2 Eigenschaften von FED

Wie bei jeder Diagnose sind auch bei der FED die Sensitivität und Spezifität wichtige Eigenschaften der Methode.

Sensitivität: Gibt es einen Fehler, wird dieser erkannt und ein Alarm ausgegeben. Die Anzahl der unterbliebenen Alarme sollte möglichst klein sein (richtig-positiv).

Spezifität: Tritt kein Fehler auf, so soll auch kein Alarm ausgegeben werden. Die Anzahl der Fehlalarme soll möglichst klein sein (richtig-negativ) um nicht gegen ständige Alarme immunisiert zu werden (siehe Äsops Der Hirtenjunge und der Wolf). Die Spezifität sollte im Idealfall auch erhalten bleiben, wenn sich Veränderungen in der Anlagennutzung ergeben.

Um Methoden zur FED flächendeckend in der Gebäudetechnik einsetzen zu können sollten diese möglichst ohne großen Aufwand auf andere technische Systeme übertragbar sein. Hierbei sollte bedacht werden, dass jede gebäudetechnische Anlage ein Unikat darstellt. Aus diesem Grund besitzen messdatenbasierte FED-Verfahren für

jede Anwendung in diesem Bereich eine aufwendige Anlernphase. Der Fokus von MFGeb sollte daher auf grundsätzliche, in jeder Anlage wiederzufindende, physikalische Zusammenhänge beschränkt werden, um eine breite Anwendung finden zu können.

Auch kann die Rechenleistung der Hardware, die zur FED zur Verfügung steht ein Entscheidungskriterium sein, welche Methode angewendet werden kann.

Weiterhin ist die Geschwindigkeit, mit der die FED-Methode einen Fehler erkennen muss, ein entscheidender Faktor. So müssen Sicherheitsrelevante Fehler wesentlich schneller als effizienzbetreffende Fehler aufgespürt werden. Da in MFGeb keine sicherheitsrelevanten Fehler untersucht werden sollen ist die Anforderung an die Erkennungs- und Diagnosegeschwindigkeit eher von untergeordnetem Rang

3.3 FED-Methoden

3.3.1 Allgemein

Es gibt in der vielfältigen Literatur einige Vorschläge FED-Methoden in Kategorien einzuteilen. Es kann zum einen nach wissensbasierten, signalbasierten und prozessbasierten Erkennungsmethoden zum anderen nach Fehlererkennung mit Hilfe von einem oder mit mehreren Messwerten unterschieden werden (vgl. [Isermann (2011) Kapitel 2]). Zusätzlich können FED-Methoden in quantitativ modellbasierte, qualitativ modellbasierte und prozesshistorisch basierte Methoden kategorisiert werden (vgl. [Venkatasubramanian et.al. (2002)] und [Katipamula & Brambley (2005)]). Auch ist es möglich nach Top-Down-Ansätzen, bei denen Lastprofile ganzer Gebäude zur Fehlererkennung analysiert werden, und nach Bottom-Up Ansätzen, bei denen Analysen von Teilsystemen und Komponenten im Vordergrund stehen, zu unterscheiden (vgl. [Seem (2006)]). Weiterhin können FED-Methoden nach on-line- und off-line-Verfahren unterschieden werden. Weiterhin wird vorgeschlagen die möglichen Methoden zuerst nach wissensbasierten und messdatenbasierten Verfahren zu unterteilen und diese jeweils nochmal in vorhersagebasierte Verfahren, klassifizierungsbasierte Verfahren und Verfahren zur Suche nach Ausreißern einzuteilen (vgl. [Benndorf et.al. (2018)]). Es wird der Vorschlag zur Kategorisierung der FED-Methoden von [Benndorf et.al. (2018)] übernommen (Tabelle 3-1).

Tabelle 3-1: Einteilung der FED-Verfahren

FED basiert auf Verfahren	Expertenwissen	Messdaten
Vorhersage	physikalische Modelle	Regressionsmodelle, Neuronale Netzwerke, quantitative Modelle
Klassifizierung	Wenn-Dann-Regeln	Mustererkennung, Support Vector Maschinen, Bayes-Klassifikator
Suche nach Ausreißern	Wenn-Dann-Regeln	dichtebasierende Clusteranalysen

Jedoch lässt sich nicht jede Erkennungs- und Diagnosemethode scharf in alle vorgeschlagenen Kategorien einsortieren. So basieren bspw. Grey-Box-Modelle oder auch das PCA-Verfahren auf Expertenwissen und Messdaten (vgl. [Liu & Liu (2019)]). Es folgen kurze Erläuterungen zu den FED-Verfahren.

3.3.2 Wissensbasierte Verfahren

3.3.2.1 Allgemein

Um wissensbasierte Verfahren zur FED anwenden zu können sind detaillierte analytische und heuristische Informationen über eine Anlage oder einen Prozess nötig mit deren Hilfe Modelle zur Fehlererkennung und Diagnose erstellt werden können. Im Informationsgewinn liegt der Nachteil dieser Verfahren. Je nach zu untersuchendem System kann es langwierig sein das, für die Entwicklung eines Verfahrens zur FED, nötige Wissen zusammenzutragen.

[Provan et.al. (2009)] versuchten bereits durch Informationen aus einem BIM-Modell einfache Regeln zur FED an Beleuchtungen abzuleiten, jedoch mussten hierfür einige Vereinfachungen bei der Anzahl der Sensoren und Aktoren in Kauf genommen werden. Auch konnten keine, für die FED verwendbaren, Schwellwerte aus dem BIM-Modell abgeleitet werden. Im Forschungsprojekt MFGeb soll Wissen aus einer FMEA gewonnen werden welches dann als Grundlage der FED dient. Bereits [Struss et.al. (1996)] nutzten die FMEA, um ein elektronisches Motorsteuergerät für Dieselmotoren zu analysieren und Regeln zur Fehlerdiagnose abzuleiten. Schon damals wurde erkannt, dass es notwendig ist qualitative FMEA-Modelle effizient aus Elementen einer Bibliothek zu erstellen, die nur das lokale Verhalten beschreiben, ohne einen größeren Kontext der Anlage zu berücksichtigen. Der Kontext der Elemente in der Anlage erschließt sich erst aus den Verknüpfungen der Elemente untereinander. [Struss et.al. (1996)] fanden durch die FMEA 26 mögliche Fehlerarten und deren Ursachen, von denen 23 bei der angeschlossenen Evaluation bestätigt werden konnten. Nur eine Fehlerart, die bei der FMEA-Durchführung nicht berücksichtigt worden ist, konnte in Evaluationsphase entdeckt werden.

Trotz der aufwendigeren Entwicklung befinden sich wissensbasierte FED-Verfahren in der gebäudetechnischen Anwendung (z.B. [Bushby et.al. (2019)]).

3.3.2.2 Vorhersagebasierte Verfahren

Das fehlerfreie Verhalten von technischen Anlagen und Prozessen werden durch physikalische Modelle vorhergesagt. Die Modelle basieren meist auf Differentialgleichungen oder Zustandsraummodellen wie sie auch zur Entwicklung von Reglern eingesetzt werden (vgl. [Sewe (2018) -1 Kapitel 6] mit [Lunze (2014)] Kapitel 4). Auch finden Simulationen Verwendung, um Systemverhalten vorherzusagen (vgl. [Bhatia et.al. (2014)]). Mit den Modellen werden Ausgangsgrößen berechnet, die mit den Messdaten der Anlage verglichen werden. Die Differenz aus dem vorhergesagten Wert zum Messwert ergibt ein Residuum, mit welchem eine Entscheidung zum Fehlerzustand

der Anlage getroffen werden kann. Die Bestimmung des Residuum-Schwellwerts bei dem ein Fehler erkannt wird, muss unter Umständen für jede neue Anlage separat erfolgen. Bevor ein Modell zur Fehlererkennung bzw. Diagnose genutzt wird, muss dieses kalibriert werden (vgl. [Salsbury & Diamond (2001)]). Werden dazu Messdaten verwendet, sollte sichergestellt sein, dass diese ein fehlerfreies Systemverhalten widerspiegelt. Ist dies nicht gewährleistet, müssen die nötigen Schwellwerte durch Expertenwissen festgelegt werden, da es sonst zu unterlassenen Alarmen kommen kann (niedrige Sensitivität).

3.3.2.3 Klassifizierungsbasierte Verfahren

Bei wissensbasierten Klassifizierungsverfahren wird mit Hilfe von Wenn-Dann-Regeln ein Klassifizierungsmodell erstellt mit dessen Hilfe entdeckt wird, ob sich eine technische Anlage oder Prozess in einem fehlerbehafteten Zustand befindet. Klassifizierungsmodelle können durch neue Regeln erweitert werden, um neue Fehlerzustände zu erkennen und zu diagnostizieren. Bei klassifizierungsbasierten Verfahren werden keine Grenzwerte nötig (vgl. [Benndorf et.al. (2018)]). In [House et.al. (1999)] wird dieses Verfahren empfohlen, wenn ein Fehler nur wenige Symptome aufweist. Daraufhin wurde in [House et.al. (2001)] ein Regelsatz für Lüftungsanlagen (air-handling unit performance assessment rules - APAR) beschrieben. APAR wurde, zusammen mit einem von [Castro et.al. (2002)] entwickelten Verfahren zur Fehlerdetektion an Volumenstromreglern, an mehreren Gebäuden validiert (vgl. [House et.al. (2003)] und [Schein et.al. (2006)]). Die Eingrenzung auf Fehlerursachen erfolgte jedoch nicht automatisiert und die Fehler wurden teilweise in Komponenten verortet, die nicht für diesen ursächlich waren. Aus diesem Grund schlugen [Schein & Bushby (2005)] einen hierarchischen Wenn-Dann-Regelansatz vor, der gewerkeweise, von den Komponenten der Erzeugung, über die Verteilung hin zur Übergabe, Fehlerabfragen vornimmt. [Sewe (2018) Kapitel 5.1] erarbeitete einen Regelsatz von 17 allgemeingültigen Regeln für die FED in heizungstechnischen Anlagen.

3.3.2.4 Verfahren zur Suche nach Ausreißern

Modelle zur Ausreißer-Erkennung können ohne Vorkenntnis über auftretende Anlagen- und Prozessfehler aufgestellt werden, da die Erstellung mit Wissen über den fehlerfreien Anlagenbetrieb erfolgt (vgl. Nach [Benndorf et.al. (2018)]). Zum Wissen über den fehlerfreien Betrieb gehören jedoch Kenntnisse über die im Betrieb ablaufenden Regelsequenzen und physikalischen Zusammenhänge. Daher sind Verfahren der Klassifizierung und Vorhersage zur Ausreißersuche nötig. [Benndorf & Réhault (2016)] sind der Meinung, dass, nachdem sie sich mit messdatenbasierenden Verfahren zur Klassifizierung auseinandergesetzt haben, regelbasierte Ansätze mit Ausreißerererkennung vielversprechend seien.

3.3.3 Messdatenbasierte Verfahren

3.3.3.1 Allgemein

Bei diesen Methodenkomplex werden Verfahren zur FED durch prozesshistorische Daten eines Systems angelernt. Die Trainingsdaten müssen eine Aussage zur korrekten oder fehlerhaften Systemverhalten zum jeweiligen Messzeitpunkt enthalten. Um eine große Bandbreite von Systemverhalten abdecken zu können ist eine große Menge an Messdaten für diese Verfahren unabdingbar. Andererseits wird weniger Wissen über das System zum Entwickeln der FED-Maßnahmen vorausgesetzt. Jedoch ist Expertenwissen zum Anlernen dieser Verfahren notwendig, da entschieden werden muss ob die prozesshistorischen Daten zu einem Zeitpunkt ein korrektes oder fehlerbehaftetes Systemverhalten darstellen. Auch werden immer wieder Simulationsdaten anstelle von Messdaten genutzt, um Modelle anzulernen. So nutzen [Benndorf & Rehault (2016)] eine Simulation, um ihrem Modell ein fehlerfreies Anlagenverhalten beizubringen. Auch werden Simulationen genutzt, um Auswirkungen von Fehlern zu ermitteln und entwickelte FED-Methoden zu testen (z.B. bei [Xiao & Wang (2003)]). Die Anpassung einer Simulation an reale Anlagen kann unter Umständen sehr aufwendig sein, da Anlagenparameter oft ungenau dokumentiert sind oder Simulationsmodelle zu große Fehler aufweisen (vgl. [Li (2009)]).

3.3.3.2 Vorhersagebasierte Verfahren

Vorhersagebasierte Verfahren nutzen neuronale Netzwerke, Regressionsmodelle, Autoregressionsmodelle oder qualitative Modelle. Um die Modelle anzulernen sind Messdaten eines fehlerfreien Anlagenbetriebs aus allen Betriebszuständen erforderlich. Daher ist das Anlernen der Modelle schwierig. Die Modelle neigen bei unbekanntem Bedingungen dazu einen Fehllarm auszugeben (falsch-positiv) (vgl. [Benndorf et.al. (2018)]). Jedoch gibt es Ansätze unvollständige Trainingsdaten mit zufälligen Werten zu ergänzen, wodurch die Modellvorhersagen, für die keine Trainingsdaten vorhanden sind, mit einer hohen Varianz versehen werden (vgl. [Jin et.al. (2019)]).

Ein Problem bei der Modellierung komplexer Systeme ist die stark ansteigende Anzahl von Parametern. Betriebszustände, Ein- und Ausgänge des Systems werden benötigt um das Systemverhalten ausreichend realitätsnah beschreiben zu können. Werden alle vorhandenen Parameter ohne weiteres Expertenwissen genutzt, sind die erstellten Vorhersagemodelle sehr rechenintensiv. [Müller et.al. (2015)] stellen eine Methode vor um die zur Black-Box-Modellerstellung genutzten Parameter automatisiert, durch CP-Tensor-Dekomposition, zu verringern, ohne die Vorhersagefähigkeit der Modelle zu reduzieren. [Yan et.al. (2014)] nutzten einen bereits erprobten Algorithmus (ReliefF) um für das Modell bedeutende Parameter zu identifizieren.

Vorhersagemodelle benötigen einen ständigen Input an Messdaten, um das Verhalten des Systems vorhersagen zu können. Es können statt Messwerten auch Performance Indikatoren, die als Kennwert eines Prozesses dienen, vorhergesagt werden [Zho et.al.

(2009)]. Die Vorhersagen des Modells werden mit den zu überprüfenden Messwerten oder Kennwerten des Systems verglichen.

3.3.3.3 Klassifizierungsbasierte Verfahren

Diese Verfahren erkennen in welchem Zustand sich eine Anlage befindet. Genutzt werden dabei Entscheidungsbäume, Support-Vektor-Maschinen oder Bayes'sche Klassifikatoren. In [House et.al. (1999)] werden mehrere Verfahren erläutert und miteinander verglichen. Mit allen Verfahren konnten gute Ergebnisse erzielt werden. Bei komplexen Fehlern wird auf Grund der geringeren Rechenintensität der Bayes'sche Klassifikator empfohlen. [Kim & Braun (2015)] liefern eine Anwendung eines solchen Klassifikators zur FED in Kältemaschinen mit Hilfe virtueller Sensoren. Anders als vorhersagebasierte Verfahren nutzen diese Methoden Trainingsdaten, die auch Fehlzustände eines Systems beinhalten. Dadurch wird das Anlernen des Verfahrens komplex, da der Fehler in den Trainingsdaten bereits bekannt sein muss, bevor er durch die FED erkannt werden kann. Fehler die nicht in den Trainingsdaten vorkommen werden später nicht erkannt (vgl. [Benndorf et.al. (2018)]). Jedoch arbeiten klassifizierungsbasierte Verfahren zuverlässig, wenn sie Trainingsdaten in ausreichender Qualität zur Verfügung haben (vgl. [House et.al. (1999)]).

3.3.3.4 Verfahren zur Suche nach Ausreißern

Diese Methoden nutzen Clustering-Verfahren, prinzipiellen Komponentenanalysen (PCA) oder statistischen Verfahren. Die Methoden werden meist mit Trainingsdaten für den fehlerfreien Gebäudebetrieb angelernt und erkennen Ausreißer, wenn Messpunkte stark von dem angelernten Verhalten abweichen (vgl. [Benndorf et.al. (2018)]). Dadurch neigen Sie, besonders, wenn sich ändernde Umweltbedingungen neue – für das Verfahren unbekannte – Betriebszustände erfordern, dazu häufiger Fehlalarme auszugeben [Benndorf & Rehault (2016)]. Um auf sich ändernde Umweltbedingungen einstellen zu können, wurde in [Li (2009)] ein PCA-Verfahren in Verbindung mit Zeit-Frequenz-Transformation umgesetzt. Dieses Vorgehen führte jedoch dazu, dass Fehler mit degenerativem Charakter häufig nicht erkannt wurden. Eine weitere Erweiterung des PCA-Ansatzes verfolgten [Liu & Liu (2019)] indem sie Expertenwissen nutzten, um das Modell auf wechselnde Betriebsbedingungen anzupassen. Einen komplett anderen Ansatz verfolgte [Seem (2006)]. Er nutzte einen statistischen Top-Down-Ansatz bei den Verbrauchswerte zu tagesweisen Profilen klassifiziert worden sind, um dann nach Ausreißern zu suchen.

3.4 FED-Methoden in MFGeb

3.4.1 Allgemein

In MFGeb werden die Betriebszustände klassifiziert und in diesen nach Ausreißern gesucht. Meist kommt dabei der wissensbasierte Ansatz mit Wenn-Dann-Regeln zur

Anwendung. Eine Ausnahme bildet die Fehlererkennung am 3-Wege-Ventil. Hier wurde ein messwertbasiertes Verfahren entwickelt, bei dem Massestromverhältnisse vorhergesagt und mit den tatsächlichen Massestromverhältnissen verglichen werden.

Der Test der später vorgestellten Regeln erfolgte offline – also nicht im laufenden Anlagenbetrieb – mit den vom Projektpartner zur Verfügung gestellten Daten zu verschiedenen Fehlerszenarien. Diese Daten werden in eine Messdatenverwaltungssoftware übertragen und von dort aus, per in VBScript programmierten Algorithmen, auf Fehler untersucht. Dabei werden minütliche Istwerte von Stell-, Schalt- und Messsignalen ausgewertet.

Die Algorithmen werden in späteren Kapiteln verbal und in den Anhängen zusätzlich durch Programmablaufpläne und kommentierte Auszüge des Quelltextes erläutert. Im Quelltext sind Kommentare eingerückt und durch einen geraden Apostroph (') markiert. An die Erläuterungen der Algorithmen schließen sich Tests auf Grundlage der vom Projektpartner bereitgestellten Messdaten an.

Die Entwicklung der FED-Methoden erfolgte mit Messdaten welche definierte Fehlerszenarien enthalten. Die Fehlerszenarien wurden durch Erkenntnisse aus der FMEA abgeleitet. Der Fokus lag auf Fehler mit einer mittleren bis hohen Aufgabenpriorität. Zusätzlich wurden Messdaten aus dem fehlerfreien Anlagenbetrieb genutzt, um die FED-Methoden zu evaluieren, bzw. benötigte Grenzwerte und Betrachtungszeiten der FED-Methode anzupassen.

3.4.2 Standard und erweiterte Ausstattung

Für die Steuerungs- und Regelungsaufgaben in gebäudetechnischen Anlagen bestehen je nach verwendeter Regelungsstrategie unterschiedliche Anforderungen an den Umfang der erforderlichen Datenpunkte. Neben der reinen Regelungsaufgabe können diese Informationen auch zur Fehlererkennung analysiert werden. Dafür ist ein Zugriff auf zum Teil bereits vorhandene Datenschnittstellen zum System oder der GLT notwendig. Aus den Zielvorgaben der Fehlererkennung (welche Fehler sind relevant und müssen gemeldet werden) in Verbindung mit den geeigneten Erkennungsmethoden ergibt sich ein Anforderungsprofil an Datenpunkte und Verarbeitungsfunktionen.

Neben Fehlfunktionen von gebäudetechnischen Einzelkomponenten sind gerade Fehlerszenarien, die auf Ebene der Gesamtanlage auftreten, nur auf Grundlage einer umfangreichen Datenlage und geeigneter Diagnosemethoden zu erkennen. Für die Datenerhebung ist ein umfangreiches technisches Monitoring (TMon, VDI 6041) erforderlich. Dabei kann das TMon innerhalb der Gebäudeautomation, unter Nutzung der Daten aus der GA und zusätzlicher Sensorik oder als vollkommen eigenständiges System aufgebaut sein. Weiterhin bestehen Unterschiede darin, ob ein TMon im Rahmen einer Bestandssanierung nachgerüstet oder im Rahmen eines Neubaus bereits in frühen Planungsphasen konzeptioniert wird. Für beide Maßnahmen ist es aus wirtschaftlicher Sicht wichtig, bereits vorhandene bzw. für Grundfunktionalitäten wie regelungstechnische Vorgänge, Überwachungsmaßnahmen oder zur Energieverbrauchsabrechnung benötigte

technische Strukturen der Gebäudeautomation (Messtechnik und Datenverarbeitung) zu nutzen. Gerade die Potentiale dezentraler Komponenten sollten berücksichtigt und für die Weiterverarbeitung in der zentralen Gebäudeleittechnik genutzt werden. Hierzu zählen bspw. Regelventile, Pumpen, Wärmeerzeugern, etc. die über eine entsprechende „dezentrale Intelligenz“ und standardisierte Datenschnittstellen verfügen. Eine Fragestellung dabei ist, inwiefern bereits in frühen Phasen der Anlagenplanung bzw. vorhandener technischer Dokumentationen bei Bestandsanlagen eine ausreichende Planungsgrundlage für die Betriebsüberwachung generiert werden kann. Ziel ist es eine möglichst große Schnittmenge bei der Nutzung von Gebäudeautomationsstrukturen für die unterschiedlichen Anwendungsbereiche der Gebäudetechnik, das TMon und die FED-Methoden zu erreichen.

Gemeinsam mit den Anforderungen aus regelungstechnischer Sicht besteht zumeist eine Schnittmenge zwischen der vorhandenen und erforderlichen Hardware. Diese zu ermitteln ermöglicht es, vorhandene Ressourcen effektiv zu nutzen und den erforderlichen messtechnischen Mehraufwand, als ein wichtiger Aspekt für die Wirtschaftlichkeit der FED-Maßnahmen, möglichst gering zu halten.

3.5 Messdatenerfassung und -Aufbereitung

Über das hauseigene ViciOne Steuerungs- und Automationssystem werden Daten der Versuchsanlage erfasst. Die Daten umfassen Temperaturen, Drücke, Feuchten und Luftqualitätssensoren, sowie Sollwerte, Schalt- und Stellsignale von Komponenten. Es wurden ca. 800 Datenpunkte erfasst, welche in einer Datenbank eines SQL-Servers abgelegt wurden. Das Speichern der Datenpunkte in der Datenbank erfolgte anwendungsfallbezogen in einem festen zeitlichen Raster oder im Change of Value (VOV)-Verfahren.

Heizungsseitig wurden zwei Messzeiträume jeweils vom Winter bis in das Frühjahr gefahren. In diesen Messzeiträumen wurden insgesamt 14 Fehlerszenarien in die Heizungsversuchsanlage implementiert. Die Dauer der implementierten Fehlerszenarien betrug dabei ein bis drei Tage. Die übrigen Messdaten eines Messzeitraumes spiegeln den fehlerfreien Anlagenbetrieb wieder. In Anhang A4-1 sind die implementierten Fehlerszenarien aufgelistet. Die implementierten Fehlerszenarien wurden anhand einer vorher durchgeführten FMEA ausgewählt (siehe auch Kapitel 2.7 und 2.10).

Raumlufttechnische Messreihen wurden im August 2020, März 2021, Januar sowie März 2022 aufgenommen. Dabei wurden 43 Fehlerszenarien in die raumlufttechnische Versuchsanlage implementiert. Die Dauer eines implementierten Fehlerszenarios lag bei einer viertel Stunde bis zu zwei Stunden. In Anhang A4-2 sind die raumlufttechnischen Fehlerszenarien aufgeführt.

Nach der Beendigung eines Messzeitraumes wurde dem IBIT ein Backup der Messwert-Datenbank zur Verfügung gestellt. Das Backup wurde in einen eigenen SQL-Server importiert und per selbstprogrammierter Schnittstelle mit einer Messdatenverwaltungssoftware verknüpft.

In der Messdatenverwaltungssoftware wurden die Messdaten, welche in verschiedensten zeitlichen Rastern vorlagen, in einem minütlichen Raster linear abgebildet.

3.6 Fehlererkennungsalgorithmen für Heizungstechnik

3.6.1 Einleitung

Die nachfolgende Tabelle 3-2 zeigt Fehlerarten in der Versuchsanlage für die Regeln zur Fehlererkennung entwickelt wurden. In der rechten Spalte ist die Bewertung der FMEA-Aufgabenpriorität (AP) angegeben. Für die zu entwickelnden Fehlererkennung wurden zunächst die Fehlerszenarien mit einer hohen und mittleren Bewertung gewählt.

Tabelle 3-2: Erprobte Regeln und erkennbare Fehler in der Heizungstechnik

FED	Fehlerart	Ursache	AP
Fehlererkennung an den Heizflächen eines Raumes	Heizwassermassestrom zu groß	Defekt oder nicht intermittierender Betrieb	H
	Heizwassermassestrom zu klein	Defekt	N-M
Fehlererkennung durch die Heizkreis-Vorlauftemperatur	Vorlauftemperatur zu warm	Defekt 3-Wege-Ventil	H
	Vorlauftemperatur zu kalt	Defekt 3-Wege-Ventil oder Pumpe sowie Fehler Wärmeerzeugung und Wärmespeicherung	H
Fehlererkennung am 3-Wege-Misch-Ventil	3-Wege-Ventil: Massestrom Tor A zu klein und Massestrom Tor B zu groß	Defekt	M
	3-Wege-Ventil: Massestrom Tor A zu groß und Massestrom Tor B zu klein	Defekt	H
Fehlererkennung am Speicher	Speicher: zu wenig nutzbare Wärme	Ventil- oder Pumpenfehler der Speicherladung oder -Entladung, Fehler Rücklaufeinschichtung sowie verschlossene Fließwege	M-H
Fehlererkennung anhand der Wärmepumpenspreizung	Leistung Wärmeerzeugung zu klein	Diverse Fehler an Wärmepumpe oder Fehler die zu einer Veränderung der sekundären Masseströme führen	M-H
	Leistung Wärmeerzeugung zu groß		
	Ineffizienz Wärmeerzeugung		

In MFGeb konnten nicht alle für als relevant bewerteten Fehlerszenarien Fehlererkennungs- und Diagnosealgorithmen entwickelt werden.

Nicht betrachtet:

- Fehlererkennung fehlerhafte Masseströme durch Nutzung von Pumpendatenmessdaten

- Fehlererkennung am Heizkreis per Temperaturspreizung
- Fehlererkennung für Komponenten der Wärmepumpe
- Fehlererkennung durch Taktverhalten der Wärmepumpe
- Fehlererkennung durch Prüfung Vor- und Rücklauftemperatur mit Hilfe von Näherungsgleichungen.
- Fehlererkennung durch Geschwindigkeit der Vorlauf-Temperaturänderung der Wärmepumpe
- Fehlererkennung für die Druckhaltung
- Fehlererkennung nicht intermittierender Komponenten der hydraulischen Schaltung
- Erkennung regelungstechnischer Fehler

3.6.2 Fehlererkennung an den Heizflächen eines Raumes

3.6.2.1 Einleitung

Fehler einer Heizfläche, die zu einer Unterkühlung eines Raumes führen wurden in der FMEA-Fehlerbewertung der Heizungsversuchsanlage lediglich mit einer mittleren Aufgabenpriorität bewertet, da eine hohe Entdeckungswahrscheinlichkeit durch den Nutzer vorausgesetzt wurde. Verursacht ein Heizflächenfehler jedoch eine Raumüberhitzung oder einen unnötig hohen Energieverbrauch, hat dieser eine hohe Aufgabenpriorität.

In der Versuchsanlage sind die Räume mit Fußbodenheizungen und Einzelraumregelungen ausgerüstet. Jeder Fußbodenheizkreis verfügt über ein Stellventil. Die Heizflächen eines Raumes können, in Abhängigkeit von der Heizanforderung, zwei grundlegende Zustände annehmen - EIN und AUS. Eine Heizanforderung eines Raumes wird ausgegeben, wenn die Entwicklung der Raumtemperatur den Schluss zulässt, dass die Regeldifferenz e_{Raum} demnächst größer als 0,5K wird. Die Regeldifferenz berechnet sich nach:

$$e_{Raum} = \vartheta_{Raum,soll} - \vartheta_{Raum} \quad (3-1)$$

Die Heizanforderung erlischt, wenn die Raumtemperaturen sich so entwickeln, dass die Regeldifferenz kleiner als 0K wird. Da die Heizanforderungen des jeweiligen Raumes durch die Datenpunkte des Schaltbefehls $A_{Raum,HZG}$ zur Verfügung stehen, wurden keine integralen und differenzialen Bestandteile der Einzelraumregelungen betrachtet.

Es werden in den folgenden Abschnitten Vorschläge zur Prüfung der Raumzustände mit und ohne Heizanforderung unterbreitet und an Messdaten der Räume (Wohnzimmer, Schlafzimmer, Büro, HWR, Kinderzimmer, Küche und Garage) der Versuchsanlage in Zwickau erprobt. Dabei sind Messungen an den Heizflächen selbst ausgeschlossen (z.B. Volumenstrom, Wärmeleistung, Vorlauf-, Rücklauf und Heizoberflächentemperatur).

Es werden folgende Raumbezogenen Datenpunkte genutzt:

- Heizanforderung des Raumes $A_{Raum,HZG}$: 0 – keine Anforderung; -1 – Heizanforderung
- Soll-Raumtemperatur $\vartheta_{Raum,soll}$ in °C
- Ist-Raumtemperatur ϑ_{Raum} in °C
- Bewegungsmelder $A_{Raum,Bewegung}$: 0 – keine Bewegung; -1 – Bewegung
- Fensterzustand $A_{Raum,Fenster}$: 0 – Fenster geschlossen; -1 – Fenster offen

Weitere Datenpunkte:

- Uhrzeit t
- Außentemperatur ϑ_{AUL} in °C

Hinweise zu anderen Datenpunkt Konfigurationen werden im Nachfolgenden gegeben.

3.6.2.2 Fehlererkennung bei Räumen mit Heizanforderung

Ist die aktuelle Regeldifferenz im Heizbetrieb kleiner als 2K und größer als -2K wird die Raumheizung als fehlerfrei angenommen. Überschreitet die Regeldifferenz während einer Heizanforderung 2K (Raum tendenziell zu kalt), sollte die Regeldifferenz über die Zeit kleiner werden. Zur Prüfung wird die Differenz aus der aktuellen Regeldifferenz und der Regeldifferenz vor 2 Stunden $\dot{e}_{Raum}(t)$ berechnet. Für einen fehlerfreien Zustand sollte

$$\begin{aligned}\dot{e}_{Raum}(t) &= e_{Raum}(t) - e_{Raum}(t - 2h) \\ &= \left(\vartheta_{Raum,soll}(t) - \vartheta_{Raum}(t) \right) \\ &\quad - \left(\vartheta_{Raum,soll}(t - 2h) - \vartheta_{Raum}(t - 2h) \right) \leq 0\end{aligned}\tag{3-2}$$

gelten, da dann der Raum in den letzten beiden Stunden nicht weiter ausgekühlt ist. Wird in einem Zeitraum von 4h die Regeldifferenz von 2K überschritten und kühlt der Raum weiter aus, wird ein Fehler an der Heizfläche vermutet und ein Fehlerindikator nimmt den Wert EINS an.

Zusätzlich wird ein Heizflächenfehler vermutet, sobald die Temperatur von 4°C (eingestellte Frostschutztemperatur) für eine Dauer von 4 h unterschritten wird. Sind die der Heizfläche vorgeschalteten Komponenten fehlerfrei, liegt die Fehlerursache bei der Heizfläche des Raumes.

Der Vollständigkeit halber wird von einem fehlerhaften Zustand ausgegangen, wenn eine Heizanforderung vorliegt, jedoch die Regeldifferenz über einen Zeitraum von 4h kleiner als -2K ist (Raum tendenziell zu warm). Dieser Fehler wäre regelungstechnischer Natur oder könnte einen Sensorfehler als Ursache haben. Der Fehlerindikator soll in diesem Fall den Wert MINUS ZWEI annehmen.

3.6.2.3 Fehlererkennung bei Räumen ohne Heizanforderung

Räume ohne Heizanforderung werden auf die Inaktivität ihrer Heizflächen getestet, indem das Abkühlverhalten des betreffenden Raums untersucht wird. Bedingt durch die thermische Trägheit der Räume sinkt die Raumtemperatur jedoch nicht sofort, sobald die Raumheizung deaktiviert wurde. Verschiedene innere und äußere Faktoren nehmen zudem Einfluss auf die Raumtemperatur, welche für eine Prüfung der Inaktivität der Heizflächen berücksichtigt werden müssen.

- Die Außentemperatur ϑ_{AUL} sollte kleiner als die Raumtemperatur ϑ_{Raum} sein, um ein Temperaturgefälle zur Auskühlung bieten zu können. Daher ist es ratsam nur Räume mit Außenwandflächen mit dem vorgestellten Verfahren zu prüfen.
- Solare Gewinne im Raum sollten über den Prüfzeitraum ausgeschlossen werden können.
- Der Raum soll ungenutzt sein, um innere Wärmegewinne ausschließen zu können.

Daher erfolgt die Prüfung der Inaktivität der Heizflächen nur unter folgenden Bedingungen:

- $\vartheta_{Raum} - \vartheta_{AUL} \geq 10K$
- die Uhrzeit zwischen 22:30 Uhr und 4:30 Uhr liegt, um solare Gewinne ausschließen zu können (Möglich ist auch für jeden Tag den Zeitpunkt des Sonnenunter- und -Aufgangs zu berechnen bzw. zu hinterlegen)
- in den letzten 3h keine Aktivität im Raum durch Bewegungsmelder oder Fensterbetätigungen verzeichnet wurde. Weitere nutzbare Datenpunkte zur Bestimmung der Aktivität im Raum könnten bspw. hinterlegte Zeitprogramme, Messung des el. Stromverbrauch, Messung der Beleuchtungsstärke oder Verzeichnung von Türöffnungen sein.
- die Lüftungsanlage deaktiviert ist, oder die Lüftungsanlage aktiv ist und die Zulufttemperatur kühler als die Raumtemperatur ist.

Andere Einflussfaktoren können weitere Heizflächen sein, die nicht durch die Einzelraumregelung freigegeben werden. Dies ist in der Versuchsanlage nicht der Fall. Auch könnten Wärmegewinne durch angrenzende beheizte Räume oder interne nutzungsunabhängige Wärmequellen das Resultat der Prüfung beeinträchtigen.

Fußbodenheizflächen besitzen eine hohe thermische Trägheit und können daher nicht schnell auf Störgrößen oder veränderte Betriebsbedingungen reagieren. Zeiträume, die zur Fehlerbewertung herangezogen werden, müssten diesen Umstand berücksichtigen. Der Zeitraum in der die Raumauskühlung untersucht wird, wird mit Hilfe der umgestellten Gleichung nach [DIN EN 12831-1 (2017) F.1] mit Messdaten, die den Bedingungen der Prüfung der inaktiven Heizfläche entsprechen, abgeschätzt. Dazu wurde die Gebäudezeitkonstante τ für mehrere Abkühlvorgänge eines Raumes berechnet und die Ergebnisse der beiden mittleren Quantile arithmetisch gemittelt. τ wurde mit 208,8h bestimmt. Das Ergebnis entspricht einer gut gedämmten und schweren Bauweise. Der

Abkühlzeitraum $\Delta t_{Abk\u00fchlung}$ soll so lang sein, dass eine Raumabk\u00fchlung von 0,1K erreicht werden kann und gleichzeitig die Temperaturdifferenz $\vartheta_{Raum} - \vartheta_{AUL}$ zu Beginn der Abk\u00fchlung 10K betr\u00e4gt. Nach Umgestellter Gleichung aus [DIN EN 12831-1 (2017) F.1] ergibt sich dann $\Delta t_{Abk\u00fchlung}$ nach:

$$\Delta t_{Abk\u00fchlung} = -208,8h \cdot \ln\left(1 - \frac{0,1K}{10K}\right) \quad (3-3)$$

$\Delta t_{Abk\u00fchlung}$ betr\u00e4gt 126min.

Sind die Bedingungen zum Test der inaktiven Heizfl\u00e4che erf\u00fcllt, dann wird gepr\u00fcft, ob der Raum \u00fcber die Zeit ausk\u00fchlt. Dazu wird die Differenz der aktuellen Raumtemperatur zur Raumtemperatur von vor 126min $\Delta t_{Abk\u00fchlung}$ gebildet. Der Zeitpunkt, ab dem die Differenzen berechnet werden k\u00f6nnen, wird als t_{Start} vermerkt.

$$\Delta T_{Abk\u00fchlung,Raum}(t) = \vartheta_{Raum}(t) - \vartheta_{Raum}(t - \Delta t_{Abk\u00fchlung}) \quad (3-4)$$

Wird eine der 4 oben genannten Bedingungen nicht mehr erf\u00fcllt, wird der Pr\u00fcfzeitraum beendet. Die Differenzen werden nun, wenn $t - t_{Start}$ mindestens 2h betr\u00e4gt, \u00fcber den untersuchten Zeitraum nach Gleichung (3-5) zu $\overline{\Delta T_{Abk\u00fchlung,Raum}}(t)$ gemittelt.

$$\overline{\Delta T_{Abk\u00fchlung,Raum}}(t) = \frac{1}{t - t_{Start}} \cdot \sum_{i=t_{Start}}^t \Delta T_{Abk\u00fchlung,Raum}(i) \quad (3-5)$$

Die einzuhaltende Regel f\u00fcr ein fehlerfreies Verhalten nach Beendigung des Pr\u00fcfzeitraumes lautet:

$$\overline{\Delta T_{Abk\u00fchlung,Raum}}(t) \leq \overline{\Delta T_{Abk\u00fchlung,Raum,GW}} \quad (3-6)$$

Der Grenzwert $\overline{\Delta T_{Abk\u00fchlung,Raum,GW}}$ wurde empirisch mit 0,05k festgelegt (minimale Aufw\u00e4rmung zul\u00e4ssig).

Wird die Regel verletzt, ist die W\u00e4rmebilanz f\u00fcr den Raum \u00fcber den Pr\u00fcfzeitraum positiv und es kommt zu einer Erw\u00e4rmung. Der Fehlerindikator der Heizfl\u00e4chen des betrachteten Raumes nimmt nun den Wert MINUS EINS an.

3.6.2.4 Umsetzung und Erprobung

Das beschriebene Vorgehen zur Pr\u00fcfung der Raumheizung wurde in einen Algorithmus mit VB-Skript umgesetzt. Ein exemplarischer Programmablaufplan und Quelltext mit Kommentaren sind im Anhang A5-5 zu finden.

Der Algorithmus wurde an Messdaten der Messreihen vom 13.3.2020 bis 20.08.2020 und vom 18.01.2021 bis 09.04.2021 getestet. W\u00e4hrend der Messreihen wurden keine Fehler

in die Raumheizung implementiert. Jedoch konnten trotzdem einige fehlerhafte Zustände vom Algorithmus erkannt werden.

Im ersten gefundenen Fehlerzustand (Abbildung 3-3) ist das Wohnzimmer an einem Tag im Februar 2021 trotz aktiver Heizfläche zu kühl.

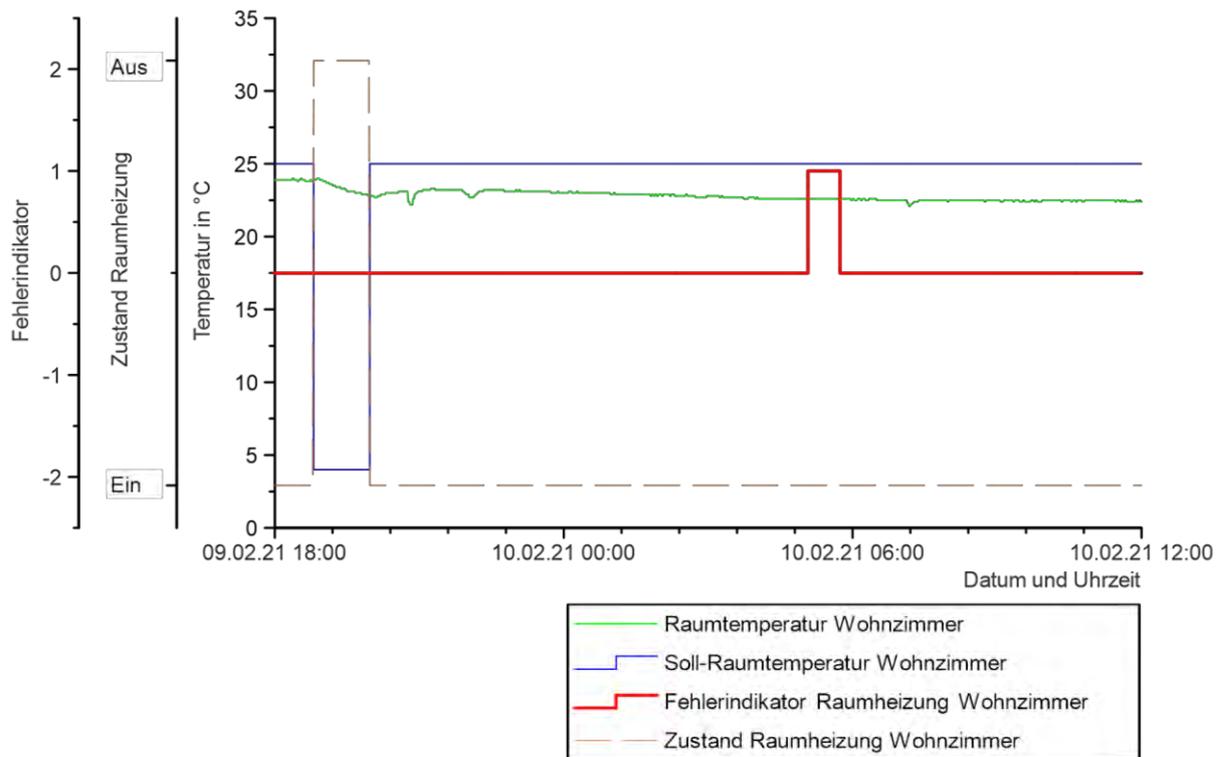


Abbildung 3-3: Anwendung der Regel zur Prüfung der Raumheizung: Raum zu kalt Raumheizung

Am 10.02.2021 überschritt ab 1:04 Uhr die Regeldifferenz 2K, obwohl die Raumheizung aktiv war. Die Regeldifferenz stieg weiter bis 2,4K an. Der Fehler wurde 05:04 entdeckt (Fehlerindikator gleich EINS). Die Regeldifferenz verharrte ab 3:44 Uhr länger als 2h bei 2,4K. Da sich die Regeldifferenz nicht weiter vergrößerte nahm der Fehlerindikator ab 5:44 Uhr wieder den Wert NULL an. Der erkannte Fehler der Übergabe trat in einem Zeitraum auf in dem die Außentemperaturen ungewöhnlich kalt waren (-16°C bis -21°C) und gleichzeitig die Soll-Raumtemperatur bei verhältnismäßig hohen 25°C lag. Zusätzlich war die Raumheizung von 18:48Uhr bis 19:58Uhr deaktiviert, weil die Soll-Raumtemperatur auf 4°C abgesenkt wurde (Fensteröffnung). In dieser Phase sank die Raumtemperatur bereits um 1,3K ab, was die spätere, zu große Regeldifferenz begünstigt haben dürfte. Die Vor- und Rücklauftemperatur des Heizkreises lag während dieses Fehlers bei ca. 37°C bis 38°C und 33°C bis 34°C. Zeitgleich betrug die Soll-Vorlauftemperatur 42,5°C und wurde somit nicht erreicht.

Die Ursachen des Fehlers dürften, neben einer sehr kalten Witterung und einer hohen Soll-Raumtemperatur, vor allem an der nicht erreichten Soll-Vorlauftemperatur liegen.

Somit sind die der vorgeschalteten Komponenten der Raumheizung nicht fehlerfrei und der Fehler kann nicht in der Heizfläche verortet werden. Im Fehlerzeitraum war bereits die Vorlauftemperatur der Wärmepumpe kühler als $42,5^{\circ}\text{C}$ (38°C bis 39°C).

Im nächsten fehlerhaften Zustand erlischt die Heizanforderung trotz des Erreichens der Soll-Raumtemperatur nicht (Abbildung 3-4).

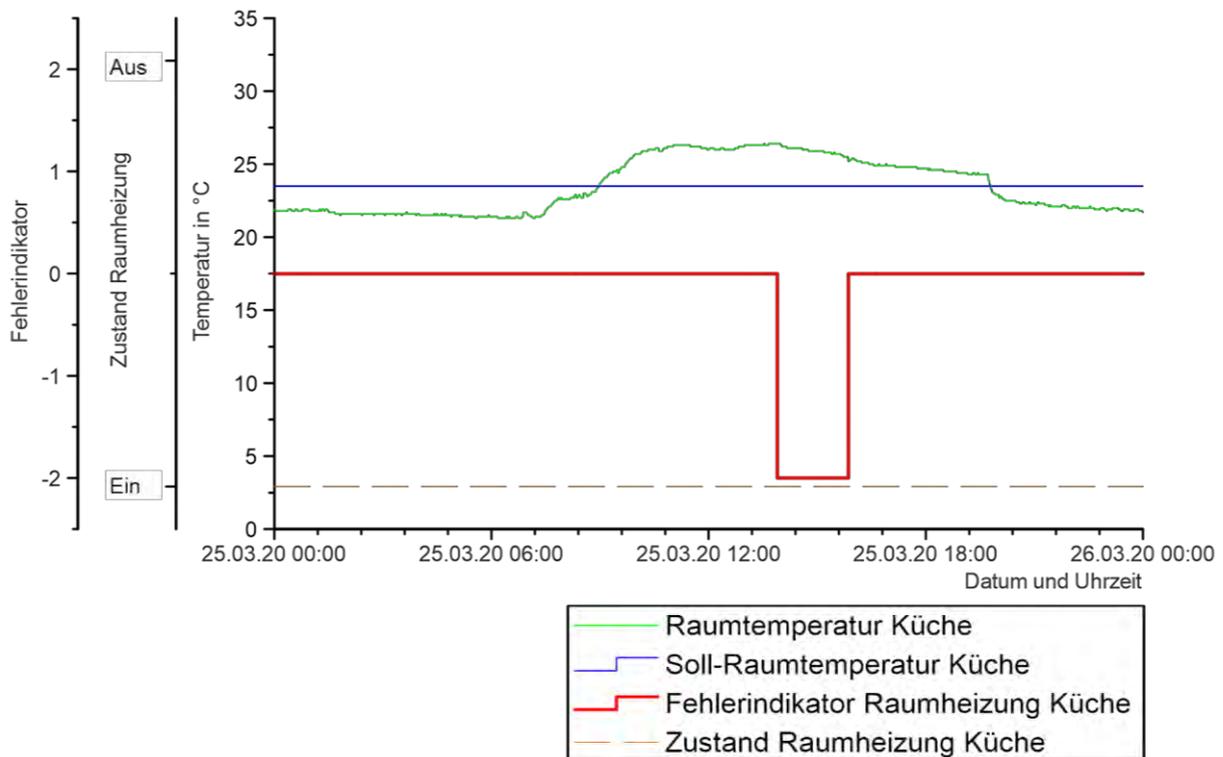


Abbildung 3-4: Anwendung der Regel zur Prüfung der Raumheizung: Raum erwärmt über Raumsolltemperatur und Raumheizung ist aktiviert

In der Küche liegt die Soll-Raumtemperatur bei $23,5^{\circ}\text{C}$. Diese wurde kurz vor 9:00 erreicht. Jedoch erlosch dabei nicht die Heizanforderung des Raumes. Die Raumtemperatur steigt weiter an. Dabei betrug die Regeldifferenz bis zu $-2,9\text{K}$ (13:40). Ab 13:54 wird der Fehler durch den Algorithmus erkannt. Ab 13:59 beginnt sich der Raum, trotz weiterhin aktiver Raumheizung, langsam abzukühlen. Ab 15:52 sind nicht mehr die Bedingungen für einen fehlerhaften Zustand der Raumheizung gegeben. Der gefundene Fehler hat regelungstechnische Ursachen und trat im weiteren Versuchszeitraum nicht wieder auf. Ein manueller Nutzereingriff ist daher als Fehlerursache wahrscheinlich.

In einem weiteren fehlerhaften Zustand der Raumheizung kühlt der Raum trotz der deaktivierten Heizfläche und den dafür geeigneten Bedingungen nicht ab (Abbildung 3-5).

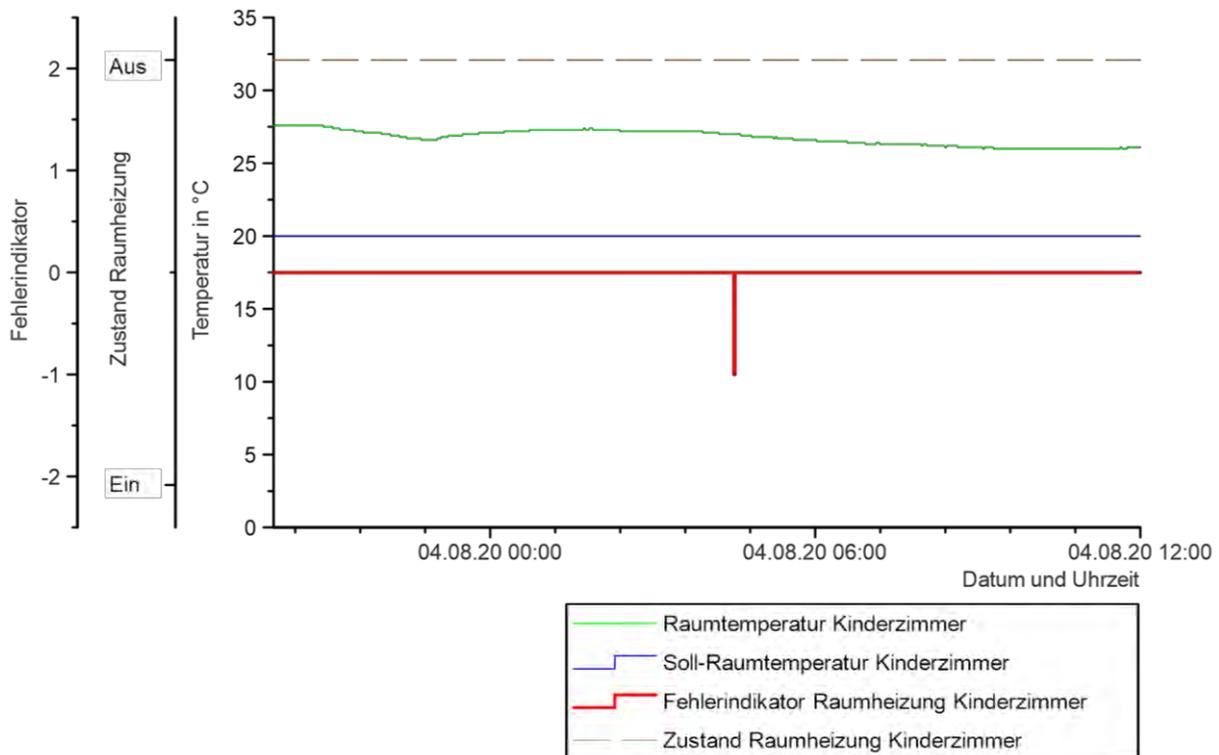


Abbildung 3-5: Anwendung der Regel zur Prüfung der Raumheizung: Raum erwärmt sich trotz deaktivierter Raumheizung

Am 4.8.2020 konnte ein Fehler in einem Kinderzimmer festgestellt werden. Der Test der deaktivierten Raumheizung konnte am 3.8.2020 22:30 beginnen und lief bis zum 4.8.2020 4:30. In diesem Zeitraum stieg die Raumtemperatur geringfügig von 26,7°C zu Beginn des Tests auf am Ende 27°C an. Während des Tests konnte durch Bewegungsmelder und Fensterkontakte keine Aktivität im Raum festgestellt werden. Auch lag die Außentemperatur im Testzeitraum zwischen 13,4 und 16,2°C – bot also ein Potenzial zur Raumauskühlung. Die Lüftungsanlage war aktiv, brachte jedoch die Zuluft mit einer Temperatur von 21,3 bis 21,5°C ein – ein weiteres Potential zur Raumauskühlung. Eine Raumerwärmung ist ab ca. 23:00 im Diagramm zu erkennen. Zu diesem Zeitpunkt lag die Vor- und Rücklauftemperatur des Fußbodenheizkreises bei 26,3°C und 26,2°C. Die letzte nennenswerte vorherige Wärmeabgabe des Heizkreises fand am 3.8.2020 um 6:00 statt. Eine Erwärmung des Raumes durch die Fußbodenheizung scheint damit ausschließbar. Grund des Temperaturanstiegs kann eine Raumebelegung sein, die nicht durch den Bewegungsmelder registriert wurde. Weiterhin wurde auch im Kino mehrfach eine Temperaturerhöhung während des Tests der deaktivierten Raumheizung nachgewiesen. Auch hier wird vermutet, dass die Bewegungsmelder nicht ausreichend genau die Raumebelegung wiedergeben oder interne Wärmequellen die Ursache sind. Weiterhin sind Wärmegewinne durch angrenzende Räume nicht komplett ausschließbar.

Das Verfahren zum Test der deaktivierten Raumheizung sollte im Rahmen nachfolgender Feldtests weiter evaluiert werden.

3.6.3 Fehlererkennung durch die Heizkreis-Vorlauftemperatur

3.6.3.1 Einleitung

Eine falsche Vorlauftemperatur eines Heizkreises kann verschiedene Fehlerursachen und Fehlerfolgen haben. Das Erkennen einer fehlerhaften Vorlauftemperaturregelung kann als Anstoß einer weiterführenden Diagnose dienen. Je nach Fehlerursache und -folge der fehlerhaften Vorlauftemperatur liegt eine mittlere bis hohe Aufgabenpriorität vor.

3.6.3.2 Fehlererkennung

Die Prüfung der Vorlauftemperatur erfolgt nur wenn der betreffende Heizkreis aktiv ist. Zur Feststellung einer fehlerhaften Vorlauftemperatur werden 3 Kenngrößen genutzt. Diese sind die aktuelle Regeldifferenz $e_{\vartheta VL}$, die zeitliche Veränderung der Regeldifferenz $\dot{e}_{\vartheta VL}$ und der Fenstermittelwert der Regeldifferenz der letzten Stunde $\overline{e_{\vartheta VL}}$. Die Regeldifferenz wird nach Formel (3-13) berechnet.

$$e_{\vartheta VL}(t) = \vartheta_{VL,soll}(t) - \vartheta_{VL}(t) \quad (3-7)$$

Ist $e_{\vartheta VL}(t)$ positiv ist die Vorlauftemperatur des Heizkreises tendenziell zu kalt. Ist jedoch $e_{\vartheta VL}(t)$ negativ ist die Vorlauftemperatur eher zu warm.

Der Fenstermittelwert der Regeldifferenz kann rekursiv, wenn der Heizkreis bereits eine Stunde oder länger aktiv ist, berechnet werden (Formel (3-8)) oder wird geschlossen für die verfügbaren Regeldifferenzen, wenn der Heizkreis kürzer als eine Stunde aktiv ist, berechnet (Formel (3-9)).

$$\overline{e_{\vartheta VL}}(t) = \overline{e_{\vartheta VL}}(t-1) + \frac{1}{m} (e_{\vartheta VL}(t) - e_{\vartheta VL}(t-m)) \quad (3-8)$$

$$\overline{e_{\vartheta VL}}(t) = \frac{1}{t - t_{start}} \cdot \sum_{k=t_{start}}^t e_{\vartheta VL}(k) \quad (3-9)$$

Die genutzte Fensterlänge m beträgt 60min. t_{start} bezeichnet den Zeitpunkt, ab den der Heizkreis aktiv ist.

Die zeitliche Veränderung der Regeldifferenz $\dot{e}_{\vartheta VL}$ wird nach Formel (3-10) berechnet.

$$\dot{e}_{\vartheta VL}(t) = e_{\vartheta VL}(t) - e_{\vartheta VL}(t - 6min) \quad (3-10)$$

Dabei wird von der aktuellen Regeldifferenz die Regeldifferenz vor 6min (empirisch ermittelt) subtrahiert. Ist das Ergebnis von $\dot{e}_{\vartheta VL}(t)$ positiv sinkt die Vorlauftemperatur im Vergleich zur Soll-Vorlauftemperatur. Bei einem negativen Ergebnis von $\dot{e}_{\vartheta VL}(t)$ steigt die Vorlauftemperatur im Verhältnis zur Soll-Vorlauftemperatur.

Die Kenngrößen werden in minütlichen, diskreten Zeitschritten berechnet und mit Grenzwerten verglichen. Anhand logischer Verknüpfungen der Vergleichsoperationen wird der Zustand der Vorlauftemperatur als fehlerfrei, fehlerhaft zu warm oder fehlerhaft zu kalt bewertet.

Wird eine Zustand als fehlerhaft zu warm erkannt sind folgende Bedingungen erfüllt:

$$\begin{aligned} & (e_{\vartheta VL}(t) < -e_{\vartheta VL,GW} \wedge \overline{e_{\vartheta VL}}(t) < -e_{\vartheta VL,GW} \wedge \dot{e}_{\vartheta VL}(t) \leq -\dot{e}_{\vartheta VL,GW}) \\ & \vee \\ & (e_{\vartheta VL}(t) < -2 e_{\vartheta VL,GW} \wedge \overline{e_{\vartheta VL}}(t) < -2 e_{\vartheta VL,GW}) \end{aligned} \quad (3-11)$$

Als Grenzwert der Regeldifferenz $e_{\vartheta VL,GW}$ wurden 3K genutzt. $\dot{e}_{\vartheta VL,GW}$ beträgt 0K/6min. Zusätzlich kann eine maximale Vorlauftemperatur hinterlegt werden bei deren überschreiten ein fehlerhafter Zustand vermerkt wird. Im Algorithmus wurde eine maximale Vorlauftemperatur von 55°C hinterlegt, um Schäden am Estrich der Fußbodenheizung vorzubeugen.

Wird über einen Zeitraum von 30min festgestellt, dass über 50% der Zustände der letzten 180min fehlerhaft zu warm waren und auch aktuell die Bedingung (3-11) erfüllt wird, wird der Fehlerindikator gleich MINUS EINS gesetzt – die Vorlauftemperatur wird als zu warm bewertet.

Wird eine Zustand als fehlerhaft zu kalt erkannt sind folgende Bedingungen erfüllt:

$$\begin{aligned} & (e_{\vartheta VL}(t) > e_{\vartheta VL,GW} \wedge \overline{e_{\vartheta VL}}(t) > e_{\vartheta VL,GW} \wedge \dot{e}_{\vartheta VL}(t) \geq \dot{e}_{\vartheta VL,GW}) \\ & \vee \\ & (e_{\vartheta VL}(t) > 2 e_{\vartheta VL,GW} \wedge \overline{e_{\vartheta VL}}(t) > 2 e_{\vartheta VL,GW}) \end{aligned} \quad (3-12)$$

Sind über einen Zeitraum von 30min mehr als 50% der Zustände der letzten 180min fehlerhaft zu kalt und aktuell die Bedingung (3-12) erfüllt wird, wird der Fehlerindikator gleich EINS gesetzt – die Vorlauftemperatur ist zu kalt.

3.6.3.3 Umsetzung und Erprobung

Der Programmablaufplan und der Quelltext sind im Anhang A5-7 zu finden.

In Abbildung 3-6 werden zwei Fehler an der Vorlauftemperatur dargestellt, die mit dem beschriebenen Vorgehen entdeckt wurden.

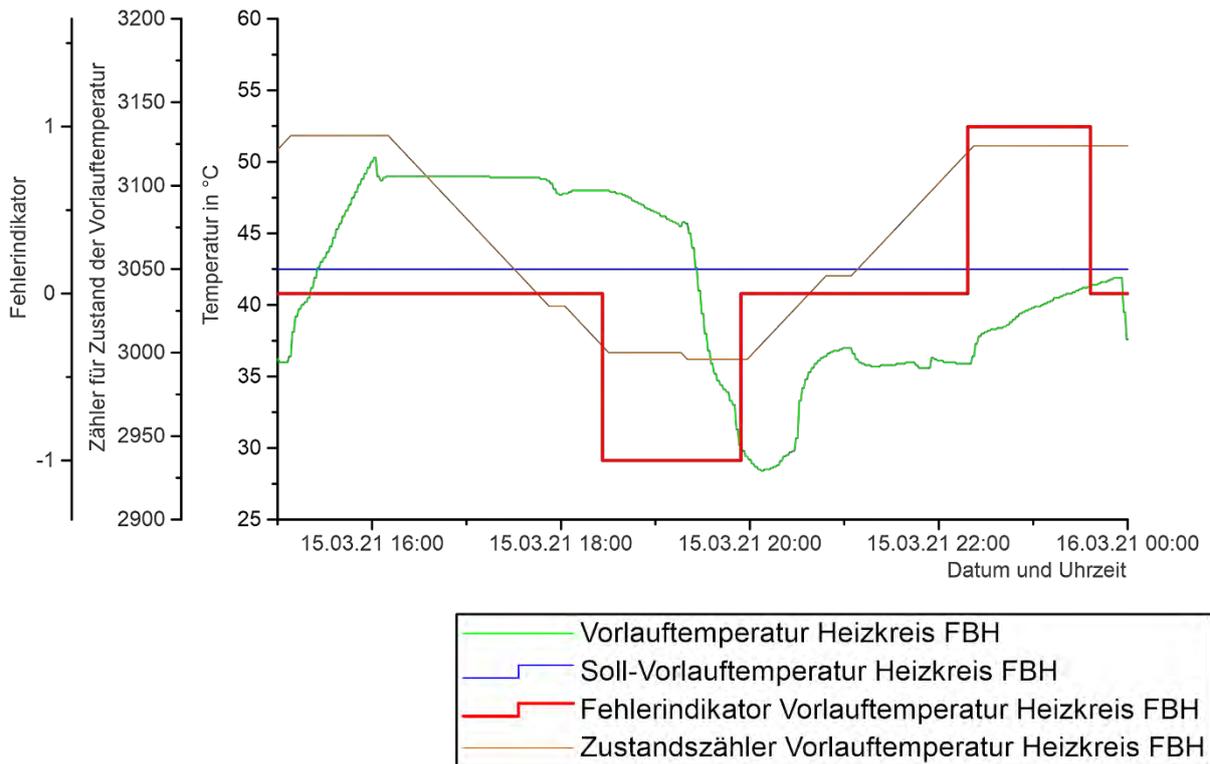


Abbildung 3-6: Anwendung der Regel zur Prüfung der Vorlauftemperatur: Vorlauftemperatur zuerst zu warm und dann zu kalt

Am 15.3.2021 wurde zu Testzwecken das Stellsignal des 3-Wege-Ventils konstant mit 100% vorgegeben. Die Vorlauftemperatur des Fußboden-Heizkreises $\vartheta_{VL,FBH}$ entspricht daher in guter Näherung der Vorlauftemperatur der Wärmeerzeugerseite $\vartheta_{VL,WE}$. Die Soll-Vorlauftemperatur $\vartheta_{VL,FBH,soll}$ beträgt 42,5°C. Ab 15:25 übersteigt $\vartheta_{VL,WE}$ und damit auch $\vartheta_{VL,FBH}$ die vorgegebene Soll- Vorlauftemperatur $\vartheta_{VL,FBH,soll}$. Ab 16:11 unterschreiten die Regeldifferenz $e_{\vartheta_{VL,FBH}}(t)$ sowie deren Fenstermittelwert $\overline{e_{\vartheta_{VL,FBH}}}(t)$ den vorgegebenen Grenzwert $e_{\vartheta_{VL,GW}}$ und die Vorlauftemperatur sinkt nicht ($\dot{e}_{\vartheta_{VL,FBH}}(t) \leq -\dot{e}_{\vartheta_{VL,GW}}$). Zu warme fehlerhafte Zustände werden festgestellt und der Zähler für wird für jeden erkannten zu warmen Zustand um EINS verringert. 18:26 wurde für 30min festgestellt, dass die Daten der letzten 3h mehr als 50% fehlerhafte, zu warme Zustände enthielt – Der Fehlerindikator nimmt den Wert MINUS EINS an.

Ab ca. 18:00 sinkt die Vorlauftemperatur der Wärmeerzeugerseite $\vartheta_{VL,WE}$ und damit auch die Vorlauftemperatur des Fußboden-Heizkreises $\vartheta_{VL,FBH}$. 19:59 überschreiten die Regeldifferenz $e_{\vartheta_{VL,FBH}}(t)$ sowie deren Fenstermittelwert $\overline{e_{\vartheta_{VL,FBH}}}(t)$ den vorgegebenen Grenzwert $e_{\vartheta_{VL,GW}}$ und die Vorlauftemperatur steigt nicht ($\dot{e}_{\vartheta_{VL,FBH}}(t) \geq \dot{e}_{\vartheta_{VL,GW}}$). Zu kalte fehlerhafte Zustände werden festgestellt und der Zähler für wird für jeden erkannten zu kalten Zustand um EINS erhöht. 22:18 wurde für 30min festgestellt, dass die Daten der letzten 3h mehr als 50% fehlerhafte, zu kalte Zustände enthielt – Der Fehlerindikator nimmt den Wert EINS an.

Die Versuchsanlage verfügt über keinen funktionsfähigen Außentempersensor. Daher wird die, sonst über die Außenlufttemperatur geführte, Vorlauftemperatur über einen konstanten Sollwert vorgegeben. Auch sinkt immer wieder die Vorlauftemperatur der Wärmeerzeugerseite $\vartheta_{VL,WE}$ ab und der installierte Pufferspeicher kann die Raumheizung nicht genügend lang mit hohen Vorlauftemperaturen versorgen. Daher ist im untersuchte Messzeitraum sehr häufig der Fehler einer zu kalten Vorlauftemperatur zu beobachten.

Weiterhin wurde der Algorithmus erfolgreich an Daten eines Hörsaals der Leipziger Straße der Fachhochschule Erfurt getestet für den, aus einem vorhergehenden Forschungsprojekt, Messdaten vom 19.10.2014 bis zum 4.5.2015 zur Verfügung standen.

Das beschriebene Vorgehen zur Prüfung der Vorlauftemperatur sollte evaluiert und die genutzten Grenzwerte sowie Prüfzeiträume an der überarbeiteten Versuchsanlage überprüft werden.

3.6.4 Fehlererkennung am 3-Wege-Misch-Ventil

3.6.4.1 Einleitung

Um das 3-Wege-Misch-Ventil zu überprüfen, könnte die Vorlauftemperatur des jeweiligen Heizkreises mit seiner Soll-Vorlauftemperatur verglichen werden. Jedoch setzt dieses Vorgehen voraus, dass stets hinreichend Wärme der Wärmeerzeugerseite zur Verfügung steht. Dies kann, durch bspw. einen Vorrang der Warmwasserbereitung, nicht immer sichergestellt werden. Als Mittel der Wahl zur Prüfung des 3-Wege-Misch-Ventils soll das Massestrommischungsverhältnis in Abhängigkeit vom Stellsignal untersucht werden. Das Vorgehen wird anhand einer Beimischschaltung, an der eine Fußbodenheizung angeschlossen ist, entwickelt und erprobt. Der Anteil des Verteiler-Massestroms \dot{m}_{vert} (Tor A des Ventils) am Gesamtmassestrom der Fußbodenheizung (Tor AB) kann mit

$$\dot{m}_{vert} = \frac{\vartheta_{VL,FBH} - \vartheta_{RL,FBH}}{\vartheta_{VL,vert} - \vartheta_{RL,FBH}} \quad (3-13)$$

bestimmt werden. Die Vor- und Rücklauftemperatur der Fußbodenheizung $\vartheta_{VL,FBH}$ und $\vartheta_{RL,FBH}$ werden messtechnisch in der Versuchsanlage erfasst. Die Vorlauftemperatur am Verteiler $\vartheta_{VL,vert}$ wird leider nicht gemessen und muss daher, abhängig vom jeweiligen Betriebszustand der Heizungsanlage, aus der oberen Pufferspeichertemperatur $\vartheta_{VL,Sp}$ und der Wärmeerzeuger-Vorlauftemperatur $\vartheta_{VL,WE}$ abgeleitet werden (siehe Abschnitt 3.6.4.2). Im daran anschließenden Abschnitt wird der Anteil des Verteilermassestroms in Abhängigkeit zum Stellsignal per deskriptiver Statistik ausgewertet. Danach wird auf das theoretische Vorgehen der Fehlererkennung eingegangen. Im Anschluss wurde der Algorithmus an Versuchsdaten erprobt.

3.6.4.2 Ermittlung der Verteilervorlauftemperatur

In der Versuchsanlage gibt es 3 Betriebszustände, die bei der Ermittlung von $\vartheta_{VL,Vert}$ berücksichtigt werden müssen:

- Warmwasservorrang
- Kein Warmwasservorrang und Wärmeerzeuger EIN
- Kein Warmwasservorrang und Wärmeerzeuger AUS

Ein vereinfachtes Schema der Heizungsanlage ist in Abbildung 3-7 zu sehen. Befindet sich die Heizungsanlage in der Warmwasserbereitung, wird nur ein hierfür vorgesehener Pufferspeicher durch den Wärmeerzeuger geladen (Warmwasservorrang). Die übrigen Wärmeverbraucher sind in der Versuchsanlage hydraulisch von der Wärmeerzeugerseite getrennt. Als Wärmequelle der übrigen Wärmeverbraucher am Heizungsverteiler dient lediglich ein weiterer Pufferspeicher, dessen obere Speichertemperatur $\vartheta_{VL,Sp}$ dann zur Bestimmung von $\vartheta_{VL,Vert}$ genutzt wird.

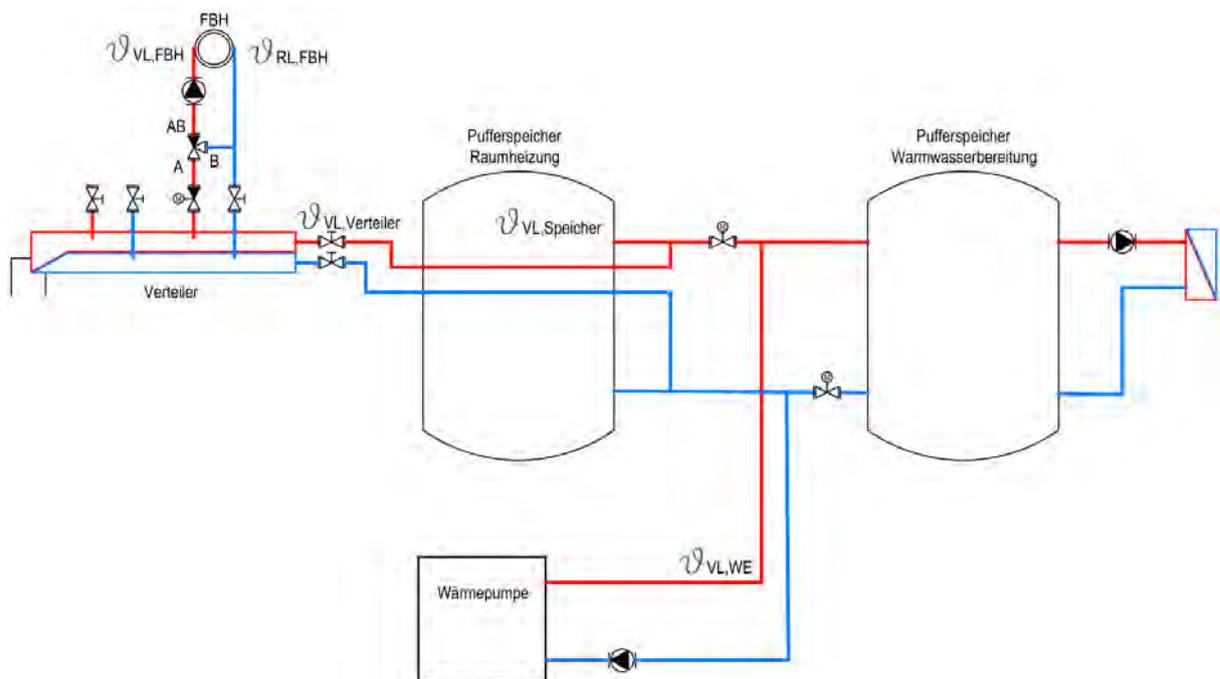


Abbildung 3-7: Vereinfachtes Schema der Heizungsanlage

Die Mischungsverhältnisse wurden an Messdaten eines Tages berechnet, an dem das Tor A des 3-Wege-Ventils durchgängig komplett geöffnet war, weil dann die gemessene Fußbodenheizungsvorlauftemperatur $\vartheta_{VL,FBH}$ der aus $\vartheta_{VL,WE}$ und $\vartheta_{VL,Sp}$ gemischten Temperatur entsprechen muss. Das Mischungsverhältnis wurde, für den im Messzeitraum jeweilig aktiven Betriebszustand, berechnet und dann über die Dauer des jeweiligen Betriebszustands arithmetisch gemittelt. Die Ergebnisse sind in Tabelle 3-3 aufgeführt.

Tabelle 3-3: Berechnung der Verteilervorlauftemperatur mit gemittelten Mischungsverhältnissen

Betriebszustand	Berechnung der Verteilervorlauftemperatur
Warmwasservorrang	$\vartheta_{VL,Vert} = \vartheta_{VL,Sp}$
Kein Warmwasservorrang und Wärmeerzeuger EIN	$\vartheta_{VL,Vert} = 0,18933 \vartheta_{VL,Sp} + 0,81067 \vartheta_{VL,WE}$
Kein Warmwasservorrang und Wärmeerzeuger AUS	$\vartheta_{VL,Vert} = 0,78401 \vartheta_{VL,Sp} + 0,21599 \vartheta_{VL,WE}$

Die Verteilervorlauftemperatur wurde, für den Tag mit komplett geöffnetem 3-Wege-Ventil, nach den Berechnungsvorschriften aus Tabelle 4 1 bestimmte und mit der gemessenen Fußbodenheizungsvorlauftemperatur $\vartheta_{VL,FBH}$ verglichen. Dabei wurde eine mittlere Abweichung von $\pm 0,905K$ festgestellt. Durch Einsatz eines exponentiell gleitenden Durchschnitts als Tiefenpassfilter konnte die Abweichung auf $\pm 0,779K$ verringert werden. Der Faktor zur Berechnung des Durchschnitts beträgt $f_{EGD} = 0,191$. Die Berechnung der Verteilervorlauftemperatur $\vartheta_{VL,Vert}$ erfolgt im Weiteren nach Tabelle 3-4. Werden die hydraulischen Verhältnisse im Wärmeerzeugerkreis geändert (z.B. Änderung Sollwerte der Pumpe), verliert die angegebene Rechenvorschrift ihr Gültigkeit. Eine Messung von $\vartheta_{VL,Vert}$ ist der Berechnung, wie sie hier vorgestellt wurde, vorzuziehen.

Tabelle 3-4: Berechnung der Verteilervorlauftemperatur mit gemittelten Mischungsverhältnissen und Tiefenpassfilter

Betriebszustand	Berechnung der Verteilervorlauftemperatur
Warmwasservorrang	$\vartheta_{VL,Vert}(t) = f_{EGD} \cdot \vartheta_{VL,Sp}(t) + (1 - f_{EGD}) \vartheta_{VL,Vert}(t - 1)$
Kein Warmwasservorrang und Wärmeerzeuger EIN	$\vartheta_{VL,Vert}(t) = f_{EGD} (0,18933 \vartheta_{VL,Sp}(t) + 0,81067 \vartheta_{VL,WE}(t)) + (1 - f_{EGD}) \vartheta_{VL,Vert}(t - 1)$
Kein Warmwasservorrang und Wärmeerzeuger AUS	$\vartheta_{VL,Vert}(t) = f_{EGD} (0,78401 \vartheta_{VL,Sp}(t) + 0,21599 \vartheta_{VL,WE}(t)) + (1 - f_{EGD}) \vartheta_{VL,Vert}(t - 1)$

3.6.4.3 Klassifizierung und Häufigkeitsverteilung

Zu jedem diskreten Zeitschritt t der Messreihe wurde nach dem Vorgehen aus Abschnitt 3.6.4.2 die Vorlauftemperatur des Verteilers $\vartheta_{VL,Vert}(t)$ berechnet. Mit der zugehörigen gemessenen Vor- und Rücklauftemperatur $\vartheta_{VL,FBH}$ und $\vartheta_{RL,FBH}$ des Fußbodenheizkreises wurde nach Gleichung (3-7) der Anteil des Verteilermassestroms $\dot{m}_{Vert}(t)$ am Gesamtmassestrom des Heizkreises berechnet. Die Berechnung erfolgte für alle Zustände, in denen der Fußbodenheizkreis aktiv war (Einschaltbefehl der Heizkreispumpe gleich EINS). Das zugehörige Stellsignal des 3-Wege-Ventils ist in 11 Klassen eingeteilt worden, denen dann die jeweiligen berechneten Anteile des

Verteilmassestroms zugeordnet wurden. Die genutzten Stellsignalklassen sind in Tabelle 3-5 abgebildet. Klassen der höheren Stellsignalsbereiche besitzen eine höhere Häufigkeit, weil der Wärmeerzeuger häufig niedrigere Vorlauftemperaturen als die vorgegebene Soll-Vorlauftemperatur des Fußbodenheizkreises zur Verfügung stellt. Es sollte in späteren Arbeiten zur Fehlererkennung an Heizkreisen geprüft werden ob allein diese Tatsache bereits zu Fehlererkennung genutzt werden kann. Weiterhin sind die Stellsignalklassen 50 und 100 überrepräsentativ, da diese im Rahmen von Versuchsreihen für mehrere Tage fest vorgegeben wurden.

Tabelle 3-5: Stellsignalklassen und ihre Häufigkeit im Messzeitraum

Stellsignalklasse	Stellsignalsbereich in %		relative Häufigkeit in %	absolute Häufigkeit in min
	von	bis		
0	0	<5	0,9	297
1	5	<15	0,4	127
2	15	<25	0,4	130
3	25	<35	0,5	156
4	35	<45	1,2	383
5	45	<55	16,0	5265
6	55	<65	3,4	1113
7	65	<75	13,2	4337
8	75	<85	18,3	6018
9	85	<95	14,0	4597
10	95	100	31,8	10468

Die berechneten und den Stellsignalklassen zugeordneten Anteile des Verteilmassestroms $\vartheta_{VL,Vert}(t)$ (Massestromanteil des Tors A) wurden statistisch ausgewertet. In Abbildung 3-8 bis Abbildung 3-13 sind beispielhaft Histogramme der absoluten Häufigkeiten von $\vartheta_{VL,Vert}(t)$ in der jeweiligen Stellsignalklasse dargestellt. In den Histogrammen wurde $\vartheta_{VL,Vert}(t)$ in Klassen der Breite von 0,05 unterteilt.

Signalklassen der höheren Stellsignalsbereiche haben eine große Ähnlichkeit, da Stellsignaländerungen nur noch eine kleine Änderung von $\vartheta_{VL,Vert}$ bewirkten. Die Klassen mittlerer Stellsignalsbereiche weisen eine größere Streuung von $\vartheta_{VL,Vert}$ auf, da kleine Änderungen des Stellsignals in diesen Bereichen größere Änderungen von $\vartheta_{VL,Vert}$ bewirken ($\frac{dm_{Vert}}{dY}$ bei $Y \sim 30\% \dots 40\%$ am Versuchsventil maximal).

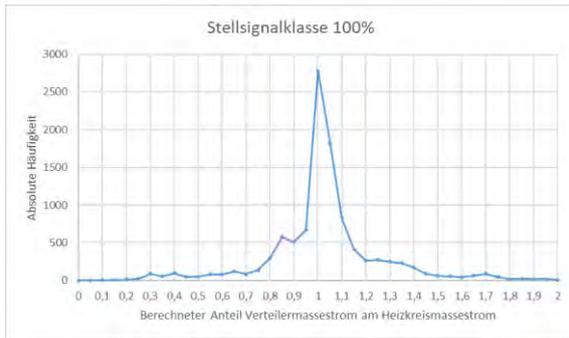


Abbildung 3-8: Histogramm Stellsignalklasse 10

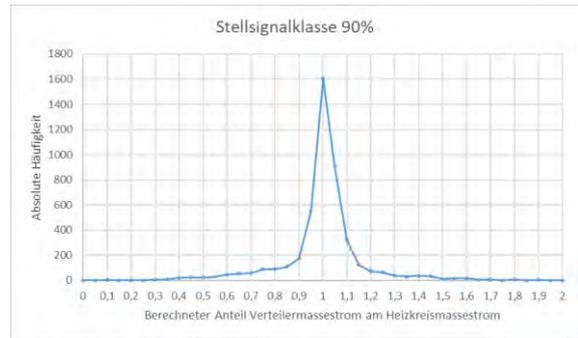


Abbildung 3-9: Histogramm Stellsignalklasse 9



Abbildung 3-10: Histogramm Stellsignalklasse 6



Abbildung 3-11: Histogramm Stellsignalklasse 5

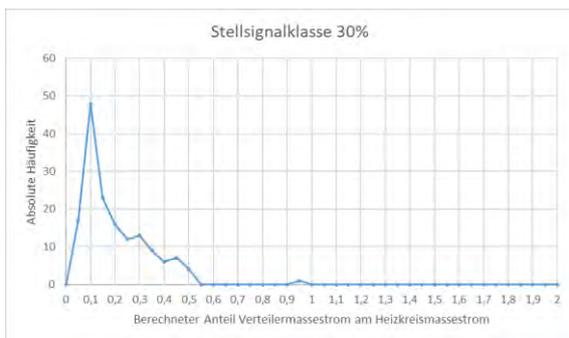


Abbildung 3-12: Histogramm Stellsignalklasse 3



Abbildung 3-13: Histogramm Stellsignalklasse 0

Aus den, der Stellsignalklassen zugeordneten, Massestromanteile wurde der arithmetische Mittelwert $\overline{\dot{m}_{Vert,Ref}}$ und die Varianz $\sigma^2_{\dot{m}_{Vert,Ref}}$ berechnet, welche später als Referenzwert zur Fehlererkennung am 3-Wege-Ventil genutzt werden (siehe auch Tabelle 3-6).

Tabelle 3-6: Arithmetische Mittelwerte und Varianzen der Stellsignalklassen

Stellsignalklasse	Stellsignalbereich in %		$\overline{\dot{m}_{Vert,Ref}}(Y)$	$\sigma^2_{\dot{m}_{Vert,Ref}}(Y)$
	von	bis		
0	0	<5	0,010	0,0022
10	5	<15	0,036	0,0107
20	15	<25	0,061	0,0090
30	25	<35	0,172	0,0178
40	35	<45	0,500	0,0769
50	45	<55	0,603	0,0605
60	55	<65	0,740	0,0613
70	65	<75	0,855	0,0712
80	75	<85	0,946	0,0573
90	85	<95	0,975	0,0293
100	95	100	1,001	0,0560

3.6.4.4 Fehlererkennung am 3-Wege-Ventil

Die Fehlererkennung erfolgt nach einem, für den Einsatz am 3-Wege-Ventil angepassten, Verfahren aus [Isermann (1994)] Kapitel 6.2. Anders als in [Isermann (1994)] Kapitel 6.2 müssen die zur Prüfung verwendeten Referenzgrößen über die Zeit veränderlich gestaltet werden. Es wird eine um die Varianz normierte Distanzfunktion erster Ordnung $\Delta^{(1)}(t)$ genutzt. Die einzuhaltende Regel zur Prüfung des Ventils lautet:

$$\Delta^{(1)}(t) = \pm \Delta^{(1)}_{GW} \quad (3-14)$$

Unter- oder überschreitet $\Delta^{(1)}(t)$ einen empirisch bestimmten Grenzwert $\Delta^{(1)}_{GW}$ liegt ein Fehler am 3-Wege-Ventil vor. Ist $\Delta^{(1)}(t)$ kleiner als $-\Delta^{(1)}_{GW}$ ist der Anteil des Massestroms aus dem Verteiler $\dot{m}_{Vert}(t)$ am Massestrom der Fußbodenheizung zu klein. Der zugehörige Fehlerindikator nimmt dann den Wert MINUS EINS an. Ist hingegen $\Delta^{(1)}(t)$ größer als $\Delta^{(1)}_{GW}$ ist der Anteil des Massestroms aus dem Verteiler $\dot{m}_{Vert}(t)$ zu groß und der Fehlerindikator nimmt den Wert EINS an. $\Delta^{(1)}_{GW}$ wurde empirisch mit 3,2 festgelegt.

Die normierte Distanzfunktion erster Ordnung berechnet sich nach Gleichung (3-15).

$$\Delta^{(1)}(t) = \frac{\sqrt{2} \cdot \delta^{(1)}_{\dot{m}}(t)}{\sqrt{\sigma^2_{\dot{m}_{Vert,Ref}}(t) + \sigma^2_{\dot{m}_{Vert}}(t)}} \quad (3-15)$$

$\delta^{(1)}_{\dot{m}}(t)$ ist die Distanzfunktion erster Ordnung der gemittelten Massestromanteile $\overline{\dot{m}_{Vert}}(t)$ und $\overline{\dot{m}_{Vert,Ref}}(t)$. Die Distanzfunktion wird nach Gleichung (3-16) bestimmt.

$$\delta^{(1)}_{\dot{m}}(t) = \overline{\dot{m}_{Vert}}(t) - \overline{\dot{m}_{Vert,Ref}}(t) \quad (3-16)$$

$\overline{\dot{m}_{Vert,Ref}}(t)$ und $\overline{\dot{m}_{Vert}}(t)$ sind über die Zeit veränderlich und werden durch einen Fenstermittelwert zur aktuellen Zeit berechnet.

$\overline{\dot{m}_{Vert}}(t)$ wird aus den nach Gleichung (3-7) berechneten Massestromanteilen $\dot{m}_{Vert}(t)$ berechnet. $\overline{\dot{m}_{Vert,Ref}}(t)$ ergibt sich aus den, zum jeweiligen Stellsignal passenden, Referenzwerten des gemittelten Massestromanteils $\overline{\dot{m}_{Vert,Ref}}(Y)$ im untersuchten Zeitfenster. Da das Stellsignal des Ventils über die Zeit veränderlich ist und damit verschiedene Referenzwerte $\overline{\dot{m}_{Vert,Ref}}(Y)$ in einem Zeitfenster hinterlegt sein können, muss auch $\overline{\dot{m}_{Vert,Ref}}(t)$ zu jedem Zeitpunkt neu bestimmt werden.

Die rekursive Berechnung von $\overline{\dot{m}_{Vert}}(t)$ und $\overline{\dot{m}_{Vert,Ref}}(t)$ erfolgt nach Gleichung (3-17) und (3-18).

$$\overline{\dot{m}_{Vert}}(t) = \overline{\dot{m}_{Vert}}(t-1) + \frac{1}{m}(\dot{m}_{Vert}(t) - \dot{m}_{Vert}(t-m)) \quad (3-17)$$

$$\begin{aligned} \overline{\dot{m}_{Vert,Ref}}(t) = & \overline{\dot{m}_{Vert,Ref}}(t-1) + \\ & \frac{1}{m}(\overline{\dot{m}_{Vert,Ref}}(Y(t)) - \overline{\dot{m}_{Vert,Ref}}(Y(t-m))) \end{aligned} \quad (3-18)$$

Die Fensterlänge m wurde mit 180min festgelegt, da keine Fehlalarme beobachtet, jedoch eine ausreichende Sensitivität der Fehlererkennung festgestellt wurde.

Liegen zu Beginn des Anlagenbetriebs noch nicht genug Daten vor um mit der Fensterlänge m zu rechnen, kann die Berechnung geschlossen, jedoch mit einer Variablen Fensterlänge m' , erfolgen. Z.B. für $\overline{\dot{m}_{Vert}}(t)$ nach:

$$\overline{\dot{m}_{Vert}}(t) = \frac{1}{m'} \sum_{k=1}^{m'} \dot{m}_{Vert}(k) \quad (3-19)$$

m' ist dabei die Länge des verfügbaren Zeitfensters.

Die Fenstervarianz, des aus den Temperaturmesswerten berechneten Verteilermassestromanteils $\dot{m}_{Vert}(t)$, zum aktuellen Zeitpunkt $\sigma^2_{\dot{m}_{Vert}}(t)$ kann mit Gleichung (3-20) rekursiv berechnet werden:

$$\begin{aligned} \sigma^2_{\dot{m}_{vert}}(t) &= \sigma^2_{\dot{m}_{vert}}(t-1) \\ &+ \frac{1}{m-1} \left(\dot{m}_{vert}(t)^2 - \dot{m}_{vert}(t-m)^2 \right) \\ &- 2\gamma(t) \frac{m-1}{m} \dot{m}_{vert}(t-1) - \frac{m-1}{m^2} \cdot \gamma(t)^2 \end{aligned} \quad (3-20)$$

Mit: $\gamma(t) = \dot{m}_{vert}(t) - \dot{m}_{vert}(t-m)$

Liegen zu einem Zeitpunkt noch nicht genug Daten vor um die feste Fensterlänge m zu nutzen erfolgt eine geschlossene Berechnung nach:

$$\sigma^2_{\dot{m}_{vert}}(t) = \frac{1}{m'-1} \sum_{k=1}^{m'} \left(\dot{m}_{vert}(k) - \overline{\dot{m}_{vert}}(t) \right)^2 \quad (3-21)$$

Die aktuelle Fenstervarianz der Referenzgröße $\sigma^2_{\dot{m}_{vert,Ref}}(t)$ wird nach dem Vorgehen von $\overline{\dot{m}_{vert,Ref}}(t)$ aus Gleichung (3-18) über die Fensterlänge gemittelt.

In der Versuchsanlage liegen die Rücklauftemperatur der Fußbodenheizung $\vartheta_{RL,FBH}$ und die Vorlauftemperatur des Verteilers $\vartheta_{VL,Vert}$ häufig nah beieinander. Hierdurch kann der Messfehler der Temperatursensoren einen großen Einfluss auf die Berechnung des aktuellen Massestromanteils des Verteilers am Gesamtmassestrom der Fußbodenheizung $\dot{m}_{vert}(t)$ haben. Eine Berechnung von $\dot{m}_{vert}(t)$ erfolgt daher nur wenn sich $\vartheta_{VL,Vert}$ und $\vartheta_{RL,FBH}$ um mehr als 2K unterscheiden. Ist die Differenz der beiden Temperaturen kleiner als 2K, ist $\dot{m}_{vert}(t)$ gleich dem aktuellen Referenzwert der Stellsignalklasse $\overline{\dot{m}_{vert,Ref}}(Y(t))$ – es tritt also eine Unschuldsvermutung in Kraft. Eine Prüfung des 3-Wege-Ventils erfolgt nur wenn die Pumpe des betreffenden Heizkreises eingeschaltet ist. Ist dies nicht der Fall, ist $\dot{m}_{vert}(t)$ ebenfalls gleich dem aktuellen Referenzwert der Stellsignalklasse $\overline{\dot{m}_{vert,Ref}}(Y(t))$.

3.6.4.5 Umsetzung und Erprobung

Das Vorgehen des Algorithmus zur Prüfung des 3-Wege-Ventils ist im Anhang A5-7 als Programmablaufplan und kommentierter Quelltext in VBScript zu finden.

Der Algorithmus wurde an Messdaten 3 verschiedener Fehlerszenarien erprobt.

Im ersten Szenario ist das Tor A des 3-Wege-Misch-Ventils komplett geschlossen (siehe Abbildung 3-14).

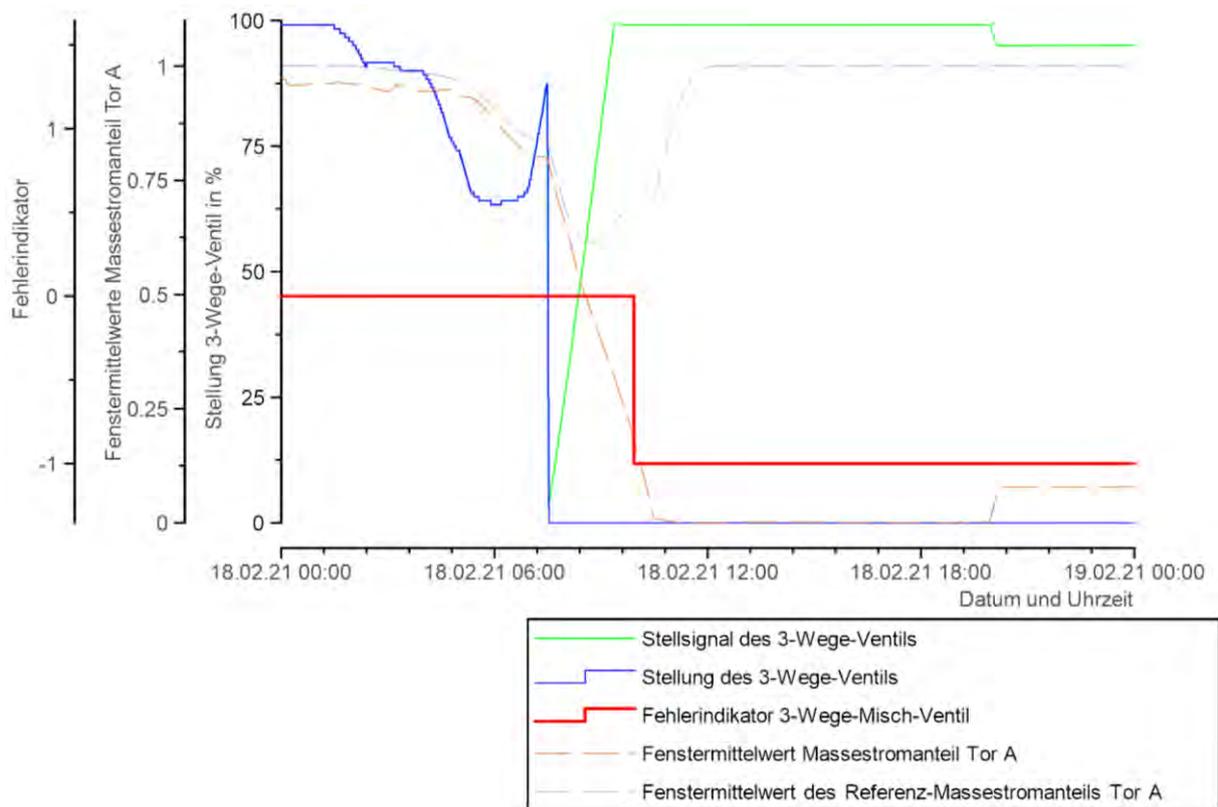


Abbildung 3-14: Anwendung der Regel zur Prüfung eines 3-Wege-Misch-Ventils: Tor A komplett geschlossen

Am 18.2. wurde um 7:31 Uhr das Stellsignal des 3-Wege-Ventils auf 0% gesetzt (im Diagramm grün) und damit der Fließweg durch das Tor A komplett geschlossen. Um die vorgegebene Soll-Vorlauftemperatur im Heizkreis einzuhalten, nimmt das Stellsignal im Anschluss stetig zu. Jedoch verharrt die tatsächliche Stellung des Ventils bei 0% (im Diagramm blau). Der in Abhängigkeit zum Stellsignal berechnete Fenstermittelwert der Referenzgröße des Massestromanteils des Tors A nähert sich über die Zeit seinem Maximum von EINS an, da das Tor A komplett geöffnet sein sollte (im Diagramm grau gestrichelt). Jedoch bewegt sich der, aus den Systemtemperaturen berechnete, Fenstermittelwert des Massestromanteils des Tors A in Richtung Null, da der Fließweg des Tors A komplett geschlossen ist (im Diagramm orange gestrichelt). Die im Hintergrund berechnete normierte Distanzfunktion nimmt ab 9:55 Uhr einen Wert von unter -3,2 an, womit dann der Fehlerindikator auf den Wert von MINUS EINS springt. Ein zu kleiner Massestromanteil durch Tor A wurde damit detektiert.

Im nächsten Szenario steht das Tor A des Ventils stabil bei einem Öffnungsgrad von 50% (Abbildung 3-15).

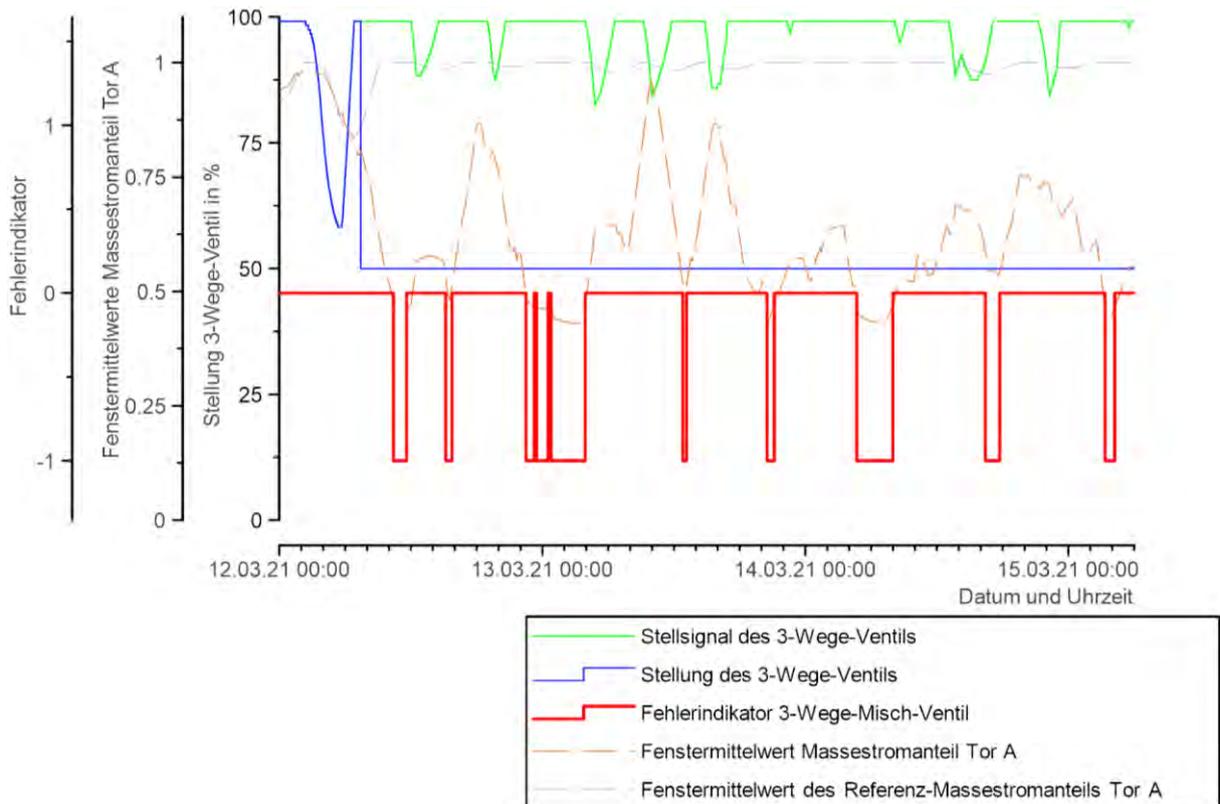


Abbildung 3-15: Anwendung der Regel zur Prüfung eines 3-Wege-Misch-Ventils: Tor A zu 50% geschlossen

Bis zum 12.3. 7:26 Uhr liegen die Fenstermittelwerte der beiden Massestromanteile (Referenz in grau und Ist in orange) nah beieinander. Danach wurde die Stellung des 3-Wege-Ventils auf 50% festgesetzt. Das Stellsignal wird weiterhin (nach der Anforderung der Soll-Vorlauftemperatur) vorgegeben, nimmt aber keinen Einfluss auf das Ventil. Über einen Zeitraum von 3 Tagen konnte zehnmals der Fehler, eines zu kleinen Massestromanteils durch das Tor A, festgestellt werden. Es ist zu beobachten, dass der aus den Systemtemperaturen berechnete Fenstermittelwert des Massestromanteils des Tors A (im Diagramm orange gestrichelt) sich immer wieder dem Fenstermittelwert der Referenzgrößen (im Diagramm grau gestrichelt) annähert. Dies hat zur Folge, dass, in diesen Perioden der Annäherung, kein Fehler erkannt wird. Die Ursache der Annäherung liegt bei der niedrigen Vorlauftemperatur der Wärmeerzeugerseite. Die niedrige Vorlauftemperatur der Wärmeerzeugerseite schlägt sich in einer niedrigen Vorlauftemperatur am Verteiler nieder, welche zu nah an der Rücklauftemperatur des Heizkreises liegt um einen sinnvollen Massestromanteil des Tors A zu berechnen (siehe auch Ende des Abschnitts 3.6.4.4). Ein Fehler wird nur erkannt, wenn die Vorlauftemperatur am Verteiler (Tor A) lang genug, um einen vorgegebenen Betrag, wärmer als die Rücklauftemperatur des Heizkreises ist.

Im letzten Szenario ist das Tor A des Ventils für einen Tag komplett geöffnet.

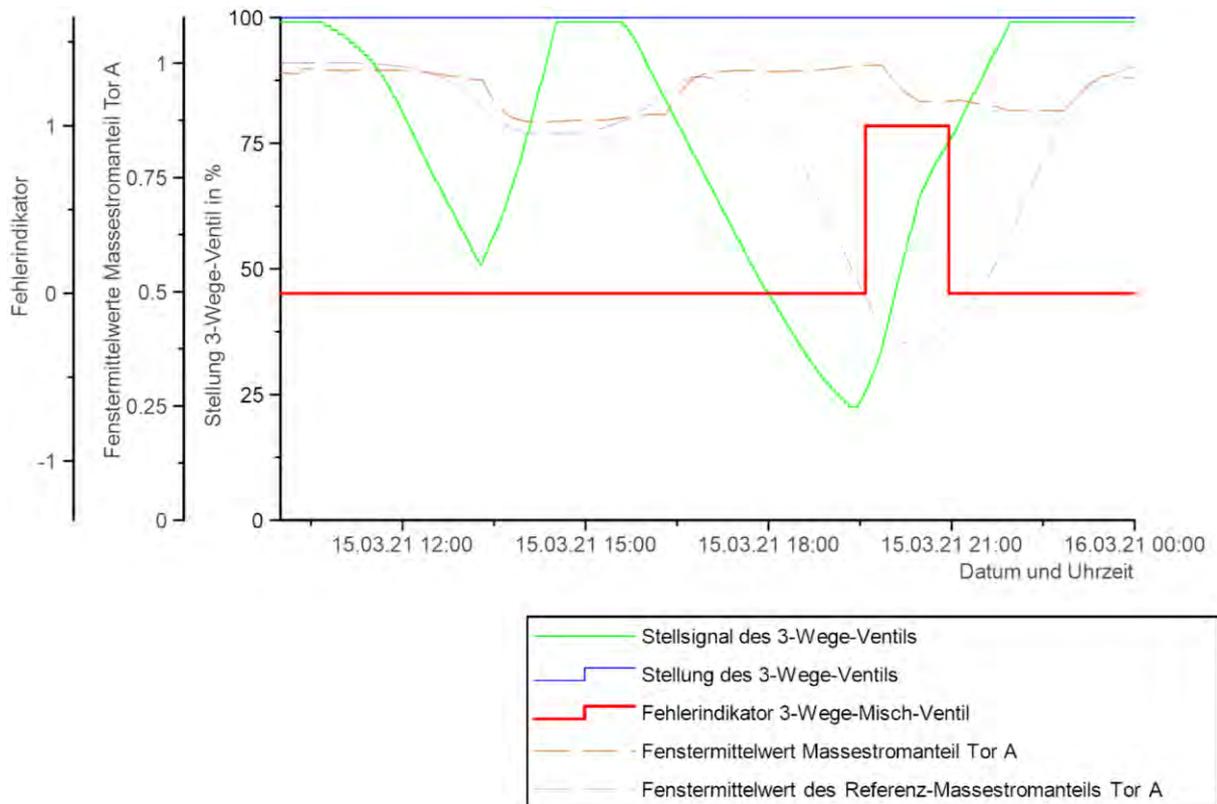


Abbildung 3-16: Anwendung der Regel zur Prüfung eines 3-Wege-Misch-Ventils: Tor komplett geöffnet

Zu Beginn beträgt das Stellsignal des Ventils knapp 100% und der Fließweg durch Tor A ist komplett geöffnet. Die Fenstermittelwerte in orange und grau liegen nah beieinander. Ab ca. 11:00 Uhr nimmt das Stellsignal zunächst langsam dann etwas schneller ab, jedoch verharrt die Stellung des Ventils bei 100%. Die beiden Fenstermittelwerte unterscheiden sich jedoch nicht stark genug, da die Verteilervorlauftemperatur nicht lange genug auf einem ausreichend hohen Niveau lag. 13:19 Uhr erreicht das Stellsignal sein vorläufiges Minimum von 51% und beginnt dann wieder bis auf knapp 100% anzusteigen (14:31 Uhr). In Folge einer steigenden Verteilervorlauftemperatur nimmt das Stellsignal ab 15:36 Uhr wieder ab und beginnt erst ab 19:28 Uhr anzusteigen. In diesem Zeitraum, mit relativ niedrigem vorgegebenem Stellsignal, unterscheiden sich die Fenstermittelwerte des berechneten Massestromanteils und des Referenz-Massestromanteils stark genug voneinander, dass die berechnete Distanzfunktion ab 19:35 einen Wert oberhalb des Grenzwertes von 3,2 annimmt. Der Fehlerindikator springt daraufhin vom Wert NULL auf EINS um. Der Fehler eines zu großen Massestromanteils des Tors A am Gesamtmassestrom des Tors AB wurde erkannt.

Der Algorithmus wurde an durchgängigen und minütlichen Messdaten der Versuchsanlage des Zeitraums vom 18.1.2021 bis zum 18.2.2021 und des Zeitraums vom 9.3.2021 bis zum 9.4.2021 erprobt. Es wurden in diesen Zeiträumen keine weiteren Fehler entdeckt oder Fehlalarme ausgelöst.

Weitere Tests erfolgten mit Messdaten vom 7.12.2021 bis zum 7.4.2022. Dabei wurde nur am 7.3.2022 ein zu kleiner Massestrom durch das Tor A des 3-Wege-Ventils detektiert. Die Ursache des Fehlers war jedoch die hydraulische Trennung des Pufferspeichers von der restlichen Heizungsanlage, da die obere Speichertemperatur in die Berechnung der Temperatur am Tor AB des Ventils $\vartheta_{VL,vert}(t)$ eingeht (siehe auch Fehler Pufferspeicher Seite 125).

3.6.5 Fehlererkennung am Speicher

3.6.5.1 Einleitung

Fehler der Speicherladung und -Entladung wurde mit einer mittleren bis hohen Aufgabenpriorität bewertet. Diese Fehler können grundsätzlich mit dem Algorithmus zur Fehlererkennung der Speichertemperatur und spezieller durch den Algorithmus in Abschnitt 3.6.5.3 erkannt werden.

Weiterhin wurden Fehler durch die Rücklaufeinschichtung hoch bewertet. Diese könnten durch die Prüfung der Temperaturschichtung erkannt werden (Abschnitt 2.7.4). Die Rücklaufeinschichtung in der Versuchsanlage ist nicht funktionsfähig. Der Algorithmus zur Prüfung der Temperaturschichtung konnte für diesen Fehlerfall nicht verifiziert werden.

3.6.5.2 Fehlererkennung durch Speichertemperatur

Es wird geprüft ob die Temperatur in der Entnahmeebene des Speichers – in diesem Fall oben – hoch genug ist um die geforderten Soll-Vorlauftemperaturen der Heizkreise bedienen zu können. Dazu wird auf folgende Regel geprüft:

$$\vartheta_{SP,oben,min}(t) - \Delta T_{SP,oben,GW} - \vartheta_{SP,oben}(t) \leq 0 \quad (3-22)$$

Ist die Ungleichung (3-22) erfüllt wird die Temperatur in der Entnahmeebene des Speichers als ausreichen warm gewertet.

Der Grenzwert $\Delta T_{SP,oben,GW}$ beträgt für die Versuchsanlage 3K. Dieser wurde bereits bei der Fehlererkennung durch die Vorlauftemperatur eines Heizkreises genutzt.

Anhand der Soll-Vorlauftemperaturen der aktiven Heizkreise $\vartheta_{VL,HK,soll}(t)$ wird eine Mindestspeichertemperatur der Entnahmeebene $\vartheta_{SP,oben,min}(t)$ definiert.

$$\vartheta_{SP,oben,min}(t) = \text{MAX} \left(\vartheta_{VL,HK,soll}(t) \right) \quad (3-23)$$

Ist kein Heizkreis aktiv beträgt $\vartheta_{SP,oben,min}(t)$ 25°C.

Wird die Regel (3-22) für einen fehlerfreien Zustand nicht erfüllt, wird zusätzlich nach (3-24) geprüft, ob die Temperatur der Entnahmeebene innerhalb der letzten viertel Stunde anstieg.

$$\vartheta_{SP,oben}(t) - \vartheta_{SP,oben}(t - 15min) + 0K \geq 0 \quad (3-24)$$

Werden für einen Zeitraum von über 180min die Ungleichungen (3-22) und (3-24) nicht erfüllt, wird die Temperatur in der Entnahmeebene des Speichers als fehlerhafter zu kalt bewertet. Der Fehlerindikator nimmt den Wert EINS an.

Auch soll eine maximale Speichertemperatur nicht überschritten werden. Die Prüfung erfolgt mit der Ungleichung (3-25) für die obere Speicherschicht:

$$\vartheta_{SP,oben,max} + \Delta T_{SP,oben,GW} - \vartheta_{SP,oben}(t) \geq 0 \quad (3-25)$$

Ist die Ungleichung (3-25) erfüllt wird die obere Temperatur Speichers als nicht zu heiß gewertet. Wird die Speichertemperatur $\vartheta_{SP,oben}(t)$ größer als die vorgegebene Maximaltemperatur $\vartheta_{SP,oben,max}$, wird das Ergebnis der Ungleich negativ und der Fehlerindikator nimmt den WERT MINUS EINS an. Die maximale Speichertemperatur $\vartheta_{SP,oben,max}$ soll 50°C betragen, da dies die maximale Vorlauftemperatur der Wärmepumpe ist.

3.6.5.3 Fehlererkennung im Lade- und Entladebetrieb

Der Test zur Entladung eines Speichers erfolgt, wenn die Heizungsanlage in einem Zustand ist, in dem der zu testende Speicher nicht durch eine Wärmequelle geladen werden soll, aber zeitgleich durch einen Verbraucher entladen wird. Zusätzlich muss der Speicher warm genug sein, um Wärme an die Wärmeverbraucher abgeben zu können. Am Beispiel des linken Pufferspeichers der Versuchsanlage erfolgt der Test der Speicherentladung, wenn entweder die Wärmepumpe deaktiviert ist oder die Warmwasserbereitung aktiv ist (Vorrangschaltung) und zeitgleich der Heizkreis Fußbodenheizung oder Lufterhitzer aktiv ist sowie die mittlere Speichertemperatur über 30°C liegt. In der Versuchsanlage sollte ein Heizkreis erst als aktiv angesehen werden, wenn das Stellsignal des zugehörigen 3-Wege-Ventils 40% oder mehr beträgt und die zugehörige Heizkreispumpe eingeschaltet ist.

Es kann mit dem entwickelten Vorgehen festgestellt werden, ob der Speicher eine hydraulische Verbindung zu den Heizkreisen besitzt und die Entladung des untersuchten Speichers wie von der Regelung vorgesehen erfolgt.

Entladung:

Ist der Speicher im reinen Entladezustand wird die Temperaturdifferenz der mittleren Speichertemperatur von vor einer Stunde zur aktuellen mittleren Speichertemperatur gebildet. Die mittlere Speichertemperatur muss sinken. Als Ungleichung lautet die Regel für den fehlerfreien Zustand:

$$\vartheta_{SP,mittel}(t - 60min) - \vartheta_{SP,mittel}(t) - \Delta T_{SP,Entladung,GW} \geq 0 \quad (3-26)$$

Durch eine Simulation nach [DIN EN 12977-3 (2018) Anhang D] wurde die Temperaturabnahme des Speichers durch den Aufstellort mit maximal 0,4K/h bei einer Umgebungstemperatur von 20°C abgeschätzt. Der Grenzwert der Temperaturdifferenzen beim Entladen $\Delta T_{SP,Entladung,GW}$ soll 0,5K betragen.

In der Versuchsanlage wird die mittlere Speichertemperatur $\vartheta_{SP,mittel}(t)$ nach Formel (3-27) geschätzt.

$$\vartheta_{SP,mittel}(t) = \frac{\vartheta_{SP,oben}(t) + \vartheta_{SP,oben-mitte}(t) + \vartheta_{SP,mitte-unten}(t) + \vartheta_{SP,unten}(t)}{4} \quad (3-27)$$

Wird die Regel (3-26) für einen Zeitraum von einer Stunde oder länger verletzt, nimmt der zugehörige Fehlerindikator den Wert EINS an.

Ladung:

Der Test des Ladezustands des Speichers erfolgt, wenn der Speicher durch die Wärmeerzeugerseite der Heizungsanlage geladen werden soll.

In der Versuchsanlage ist dies der Fall, wenn die Wärmepumpe aktiv ist und keine Warmwasserbereitung vorliegt.

Es kann mit dem entwickelten Vorgehen festgestellt werden, ob der Speicher von der Wärmeerzeugerseite durchströmt wird und der Wärmeerzeuger eine ausreichende Leistung bereitstellt.

Ist der Speicher im Ladezustand wird die Temperaturdifferenz der aktuellen mittleren Speichertemperatur zur mittleren Speichertemperatur von vor einer halben Stunde gebildet. Die mittlere Speichertemperatur muss steigen. Als Ungleichung lautet die Regel für den fehlerfreien Zustand:

$$\vartheta_{SP,mittel}(t) - \vartheta_{SP,mittel}(t - 30min) - \Delta T_{SP,Ladung,GW} \geq 0 \quad (3-28)$$

Der Grenzwert der Temperaturdifferenzen beim Laden $\Delta T_{SP,Ladung,GW}$ soll 0K betragen, um festzustellen, ob die Speichertemperatur ansteigt.

Wird die Regel (3-28) für einen Zeitraum von einer Stunde oder länger verletzt, nimmt der zugehörige Fehlerindikator den Wert MINUS EINS an.

3.6.5.4 Fehlererkennung durch Temperaturschichtung

Mit dieser Regel wird geprüft, ob die Schichtung des Pufferspeichers fehlerfrei ist. Der Speicher ist oben wärmer als unten. Wäre das nicht der Fall würde dies für eine Fehlzirkulation im Speicher oder einen Fehler der Rücklaufeinschichtung sprechen. Der Speicher verfügt über die 4 Temperaturdatenpunkte $\vartheta_{SP,oben}$, $\vartheta_{SP,oben-mitte}$, $\vartheta_{SP,mitte-unten}$ und $\vartheta_{SP,unten}$, welche mit der Regel (3-29) geprüft werden. Die Regel besteht aus 3 und-

verknüpften Bedingungen, in denen eine Temperatur des Speichers mit der darunterliegenden Speichertemperatur verglichen wird.

Für den fehlerfreien Zustand der Temperaturschichtung soll

$$\begin{aligned} \vartheta_{SP,oben}(t) + \Delta T_{SP,Schichtung,GW} - \vartheta_{SP,oben-mitte}(t) &\geq 0 \wedge \\ \vartheta_{SP,oben-mitte}(t) + \Delta T_{SP,Schichtung,GW} - \vartheta_{SP,mitte-unten}(t) &\geq 0 \wedge \\ \vartheta_{SP,mitte-unten}(t) + \Delta T_{SP,Schichtung,GW} - \vartheta_{SP,unten}(t) &\geq 0 \end{aligned} \quad (3-29)$$

gelten. Durch $\Delta T_{SP,Schichtung,GW}$ werden Messfehlern der Temperatursensoren berücksichtigt. $\Delta T_{SP,Schichtung,GW}$ beträgt 1,4K.

Wird die Regel (3-29) länger als 15min nicht erfüllt nimmt der zugehörige Fehlerindikator den Wert EINS an.

3.6.5.5 Umsetzung und Erprobung

Der Programmablaufplan des entwickelten Algorithmus sowie der zugehörige kommentierte Quelltext sind im Anhang A5-8 zu finden.

Der Algorithmus zur Erkennung von zu kalten oder zu warmen Speichertemperaturen in der Entnahmeebene entdeckte einige fehlerhaft Zustände, bei denen die Speichertemperaturen zu kalt waren. In Abbildung 3-17 ist ein solcher Zustand dargestellt.

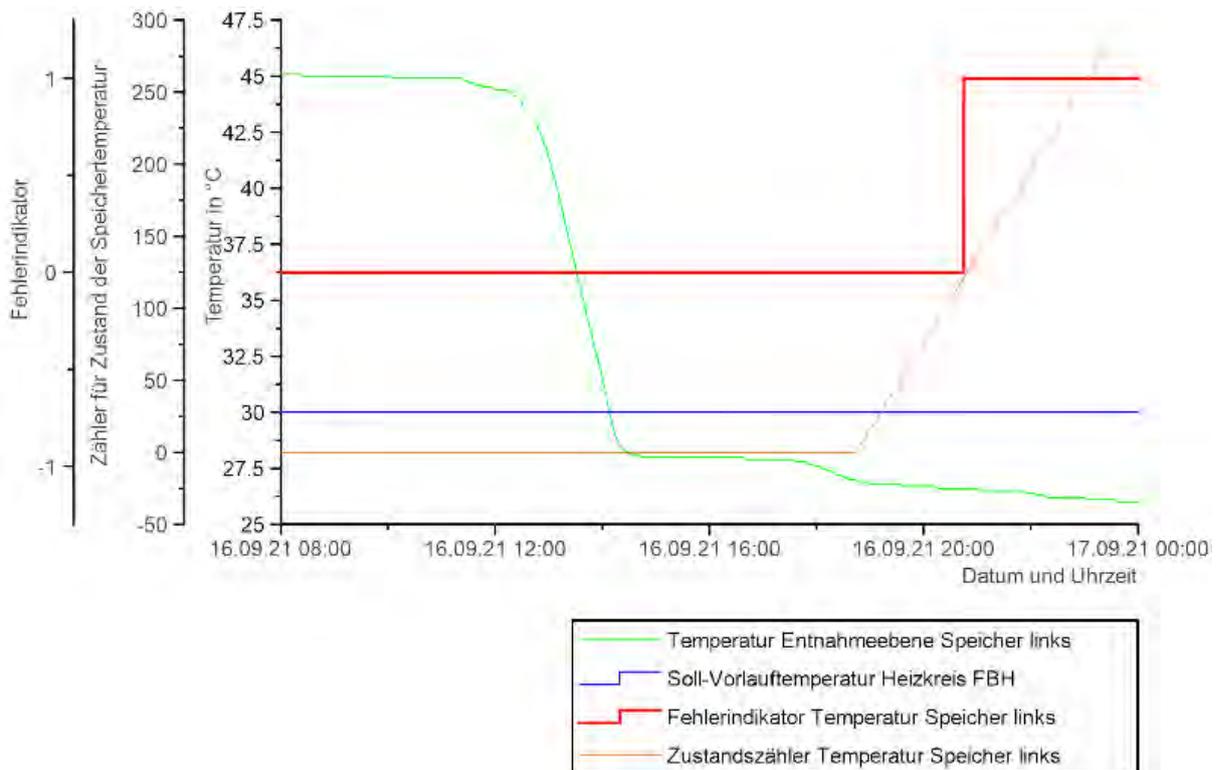


Abbildung 3-17: Anwendung der Regel zur Prüfung der Speichertemperatur: Temperatur in Entnahmeebene zu kalt

Ab 11:20 ist der Heizkreis der FBH aktiv. Die Soll-Vorlauftemperatur der FBH beträgt konstant 30°C. Ab 18:45 werden fehlerhafte Zustände vermerkt da, die Regel (3-22) verletzt wird und durch Regel (3-24) kein Temperaturanstieg verzeichnet werden kann. Dieser Zustand hält bis 20:45 an woraufhin der Fehlerindikator den Wert EINS annimmt. Die Ursache war eine dauerhafte Inaktivität der Wärmepumpe.

Bei der vorangegangenen Prüfung der Vorlauftemperatur der Heizkreise fiel bereits auf, dass häufig die geforderten Soll-Vorlauftemperaturen nicht eingehalten werden können. Die Ursache dieses Fehlers bewirkt auch ein Unterschreiten der ermittelten Mindesttemperatur in der Entnahmeebene des Speichers.

Der Algorithmus zur Erkennung fehlerhafter Lade- und Entladezustände des Pufferspeichers konnte am 21.09.2021 einen Fehler der Speicherladung erkennen (Abbildung 3-18).

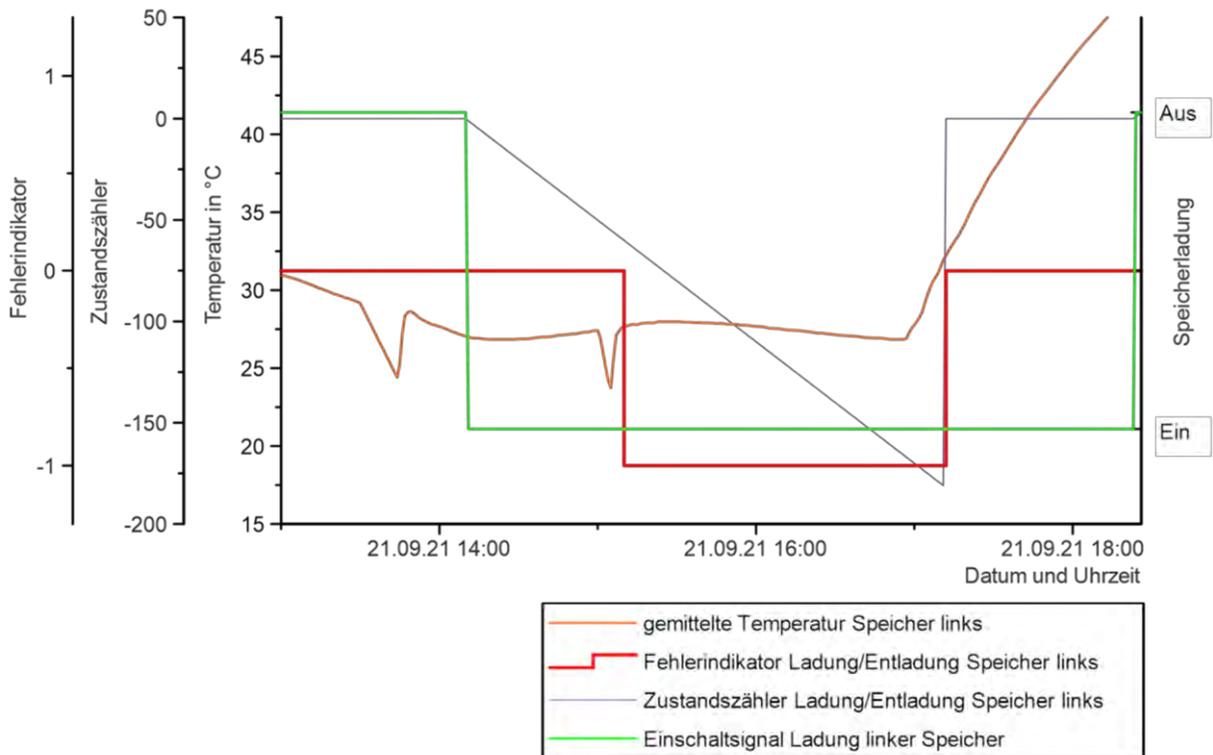


Abbildung 3-18: Anwendung der Regel zur Prüfung der Speicherladung und Entladung: Fehler der Speicherladung

Ab 14:11 soll der Speicher geladen werden (Einschaltsignal in grün). Jedoch nimmt die Speichertemperatur (orange) nicht zu und verletzt damit die Regel (3-28). Es werden fehlerhafte zustände vermerkt. Ab 15:11 nimmt der zugehörige Fehlerindikator den Wert MINUS EINS an.

Eine Fehlerursache ist bei der Wärmepumpe zu suchen. Es wurden in diesem Zeitraum sehr hohe Temperaturspreizungen der WP vermerkt, die auf einen drastisch verringerten Massestrom der Wärmesenkenseite der WP schließen lassen (nicht im Diagramm). Zusätzlich wurde 15:03 durch einen regelungstechnischen Fehler die WWB zeitgleich zur Ladung des Pufferspeichers aktiviert (nicht im Diagramm). 16:56 normalisierte sich die Temperaturspreizung der WP und die WWB wurde beendet. Der Pufferspeicher wurde nun geladen. Ab 17:12 lag kein Fehler der Speicherladung mehr vor.

Am 07.03.2022 8:30Uhr wurde der linke Pufferspeicher hydraulisch vom Rest der Heizungsanlage getrennt. Dadurch konnte der Pufferspeicher weder be- noch entladen werden.

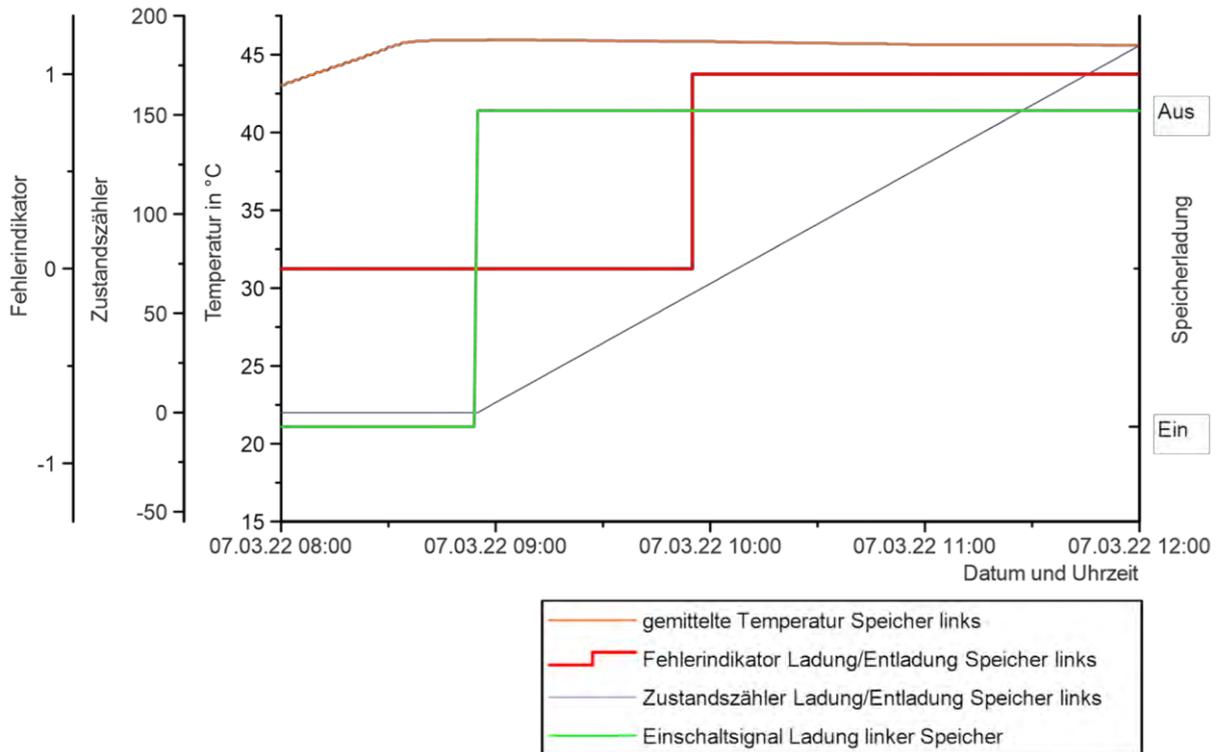


Abbildung 3-19: Anwendung der Regel zur Prüfung der Speicherladung und Entladung: Fehler der Speicherladung

Ab 8:55 müsste der Pufferspeicher entladen werden, da der Heizkreis der Fußbodenheizung aktiv ist (nicht im Diagramm). Jedoch sinkt die mittlere Speichertemperatur (orange im Diagramm) nur sehr langsam ab. Damit wird gegen die Regel (3-26) verstoßen und es werden fehlerhafte Zustände vermerkt. Ab 9:55 zeigt der Fehlerindikator einen fehlerhaften Entladezustand des Pufferspeichers an.

Der Algorithmus zur Prüfung der Temperaturschichtung konnte keinen Fehler in der Versuchsanlage entdecken.

3.6.6 Fehlererkennung anhand der Wärmepumpenspreizung

3.6.6.1 Einleitung

Die Fehler an einer Wärmepumpe weisen eine mittlere bis hohe Aufgabenpriorität auf. Kondensator und Verdampfer werden üblicherweise von einem konstanten sekundären Volumenstrom durchflossen. Durch die Betrachtung der Spreizung über den Wärmeübertrager auf der Wärmesenken- und Wärmequellenseite lassen sich eine Reihe von Fehlern erkennen. Die erkennbaren Fehler können die Leistung der Wärmepumpe an sich betreffen, oder auf eine fehlerhafte Beeinflussung des Volumenstroms der angeschlossenen Hydraulik hindeuten. Nach der Fehlererkennung durch die

Temperaturspreizung sollte durch eine weiterführende Diagnose die Ursache ergründet werden. Eine weiterführende Diagnose konnte jedoch nicht in MFGeb entwickelt werden.

3.6.6.2 Fehlererkennung

Ist die Wärmepumpe länger als 5 min in Betrieb wird folgende Regel geprüft:

$$\Delta T_{WP,soll} \pm \Delta T_{WP,GW} - \Delta T_{WP}(t) = 0 \quad (3-30)$$

Diese Regel kann sowohl auf die Wärmesenken- also auch Wärmequellenseite angewendet werden. Die aktuelle Spreizung $\Delta T_{WP}(t)$ berechnet sich nach Formel (3-31) als exponentiell gleitender Durchschnitt.

$$\Delta T_{WP}(t) = f_{EGD} \left(\vartheta_{WP,VL}(t) - \vartheta_{WP,RL}(t) \right) + (1 - f_{EGD}) \Delta T_{WP}(t - 1) \quad (3-31)$$

Für f_{EGD} hat sich in diesem Anwendungsfall 0,05 bewährt.

Der Grenzwert $\Delta T_{WP,GW}$, um den die berechnete Spreizung über die Wärmepumpe $\Delta T_{WP}(t)$ vom Sollwert der Spreizung $\Delta T_{WP,soll}$ abweichen darf, ist so gewählt, dass der sekundäre Massestrom bzw. die Leistung der Wärmepumpe um maximal 25% von der vorgesehenen Leistung bzw. Massestrom abweichen darf.

Der Sollwert der Spreizung $\Delta T_{WP,soll}$ wurde empirisch aus den Messdaten abgeleitet (Median, wenn Wärmepumpe aktiv und fehlerfrei). Die für $\Delta T_{WP,soll}$ und $\Delta T_{WP,GW}$ genutzten Werte sind in Tabelle 3-7 zu sehen. Die Wärmepumpe in der Versuchsanlage besitzt nur eine Leistungsstufe. Soll mit diesem Vorgehen eine mehrstufige Wärmepumpe geprüft werden, muss für jede Leistungsstufe eigene Soll- und Grenzwerte bestimmt werden.

Tabelle 3-7: Sollwerte und Grenzwerte der Spreizung über die Wärmepumpe

	Wärmesenkenseite (Sekundärseite Kondensator)	Wärmequellenseite (Sekundärseite Verdampfer)
$\Delta T_{WP,soll}$	5,20K	3,70K
$\Delta T_{WP,GW}$	1,30K	0,93K

Wird $\Delta T_{WP}(t)$ um $\Delta T_{WP,GW}$ größer als $\Delta T_{WP,soll}$ ist das Ergebnis der Regel (3-30) negativ. Wird dieser Zustand über einen Zeitraum von einer halben Stunde festgestellt, nimmt ein Fehlerindikator den Wert MINUS EINS an. Mögliche Ursachen sind ein verringerter sekundärer Massestrom über Wärmesenken- oder Wärmequellenseite (je nachdem welche Seite untersucht wird), oder eine gestiegene Leistung der Wärmepumpe.

Wird $\Delta T_{WP}(t)$ um $-\Delta T_{WP,GW}$ kleiner als $\Delta T_{WP,soll}$ ist das Ergebnis der Regel (3-30) positiv. Wird dieser Zustand über einen Zeitraum von einer halben Stunde festgestellt, nimmt ein Fehlerindikator den Wert EINS an. Mögliche Ursachen sind ein gestiegener sekundärer

Massestrom über Wärmesenken- oder Wärmequellenseite, oder eine verringerte Leistung der Wärmepumpe.

3.6.6.3 Umsetzung und Erprobung

Im Anhang A5-9 ist der Programmablaufplan sowie der zugehörige kommentierte Quelltext des entwickelten Algorithmus zur Prüfung der Temperaturspreizung auf Wärmesenken- und Wärmequellenseite zu finden.

Zur Prüfung des vorgestellten Algorithmus wurden mehrere Fehlerszenarien in die Heizungsanlage implementiert.

Auf der Wärmequellenseite wurde am 05.04.2022 die Förderleistung der Solepumpe reduziert.

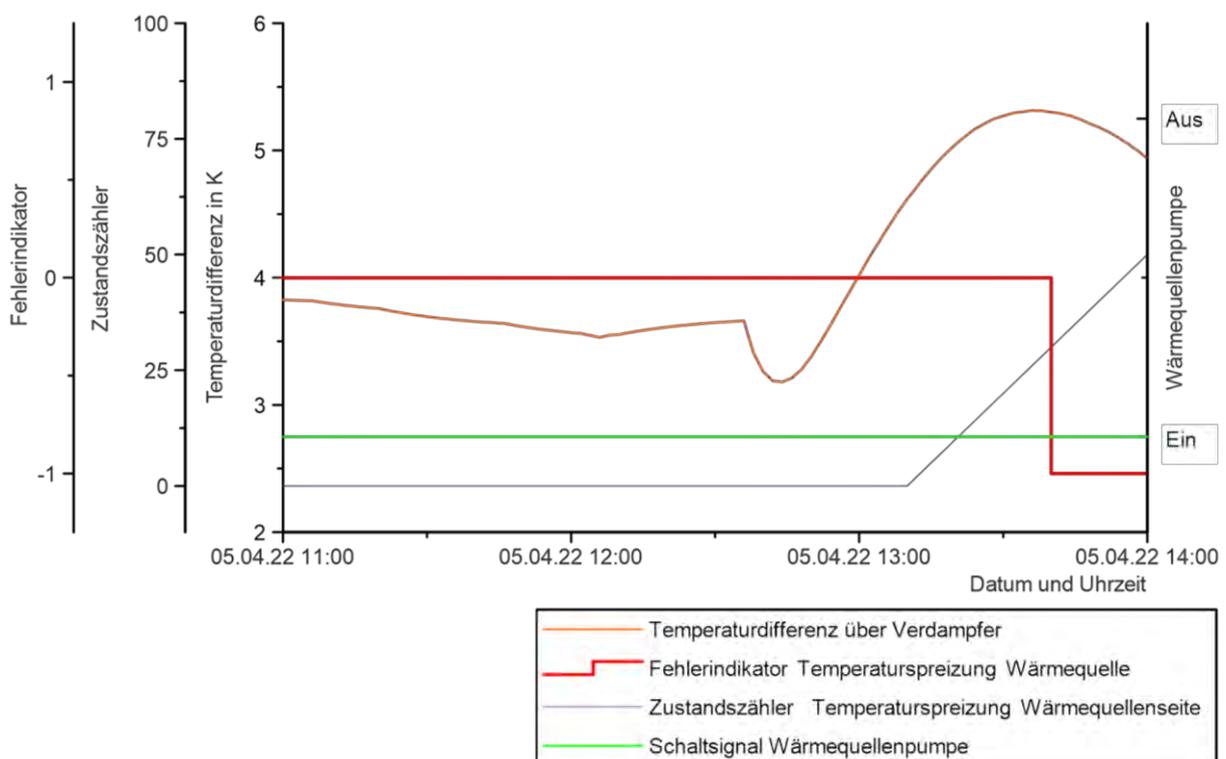


Abbildung 3-20: Anwendung der Regel zur Prüfung der Temperaturspreizung auf Wärmequellenseite: Förderleistung der Solepumpe zu klein

Auf Grund eines zu kleinen Sole-Massestroms auf der Wärmequellenseite, steigt die soleseitige Temperaturdifferenz über den Verdampfer an. Ab 13:10 werden fehlerhaft zu hohe Temperaturspreizungen verzeichnet. 13:40 nimmt der Fehlerindikator den Wert MINUS EINS an.

Am 06.04.2022 wurde die Förderleistung der Umwälzpumpe auf der Wärmesenkenseite erhöht (Abbildung 3-21).

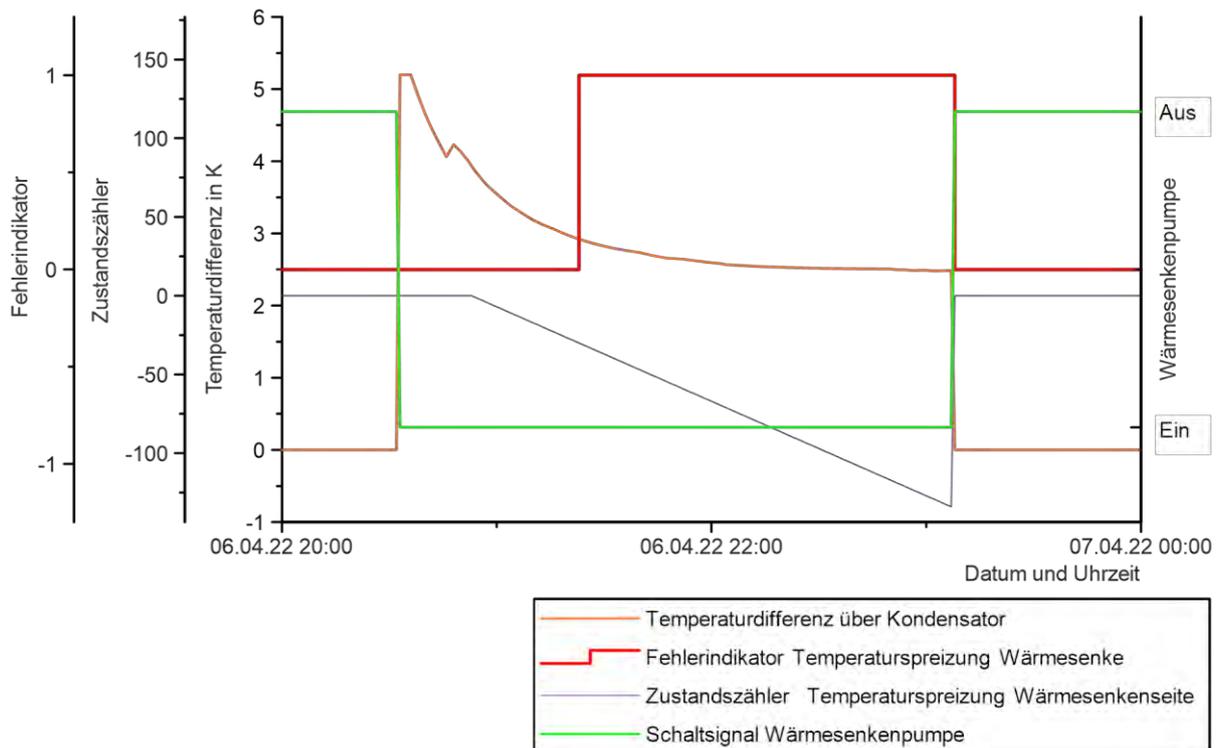


Abbildung 3-21: Anwendung der Regel zur Prüfung der Temperaturspreizung auf Wärmesenkenseite: Förderleistung der Wärmesenken-Pumpe zu groß

Ab 20:33 ist die Wärmepumpe aktiv. Die Temperaturdifferenz (orange) hat zu Beginn des Wärmepumpenbetriebs den hinterlegten Startwert von 5,2K ($\Delta T_{WP,soll}$). Die Temperaturdifferenz (als gleitender exponentieller Durchschnitt) sinkt jedoch ab und es werden ab 20:54 fehlerhafte Zustände festgestellt. 21:23 wird die heizungsseitige Temperaturspreizung am Kondensator als zu klein bewertet. Der zugehörige Fehlerindikator nimmt den Wert EINS an. Mit Ausschalten der Wärmepumpe 23:08 nimmt der Fehlerindikator wieder den Wert NULL an.

Im letzten vorgestellten Fehlerszenario wurde die Förderleistung der Umwälzpumpe auf der Wärmesenkenseite kurzzeitig vermindert (Abbildung 3-22).

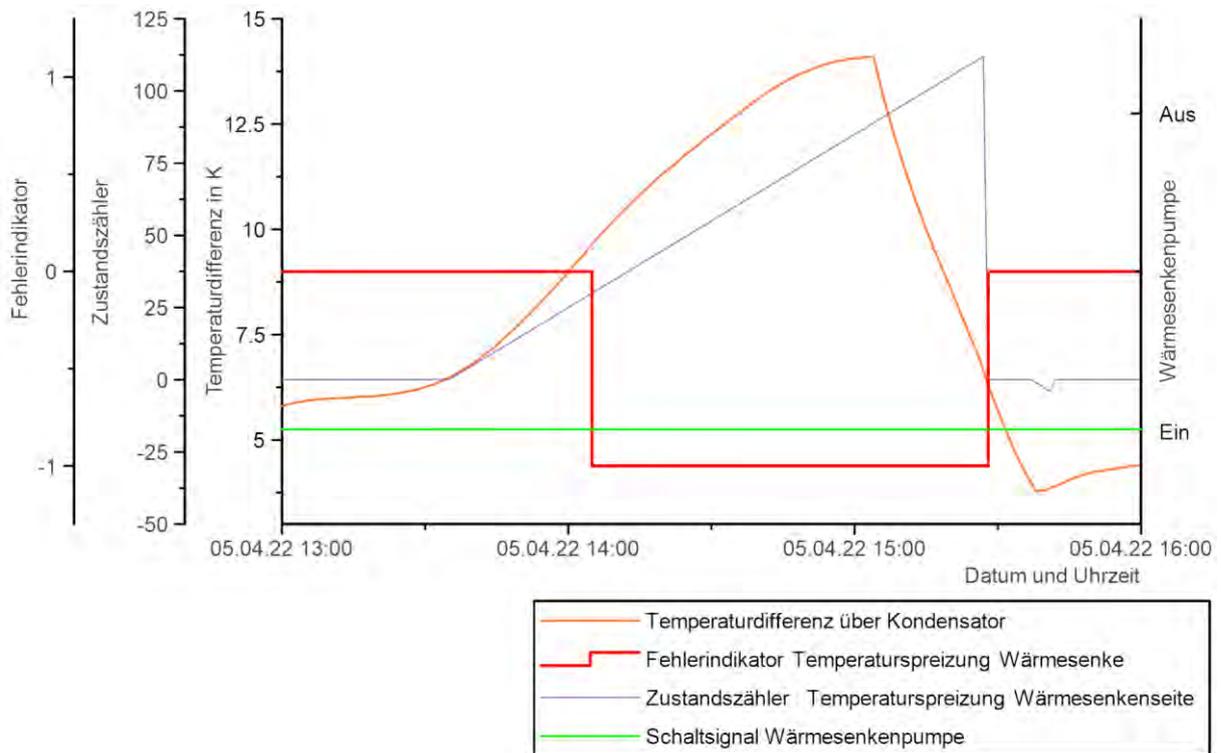


Abbildung 3-22: Anwendung der Regel zur Prüfung der Temperaturspreizung auf Wärmesenkenseite: Förderleistung der Wärmesenken-Pumpe zu klein

Die Wärmepumpe ist aktiv, jedoch wurde im Betrieb die Förderleistung der Wärmesenkenpumpe reduziert. Daher steigt die heizungsseitige Temperaturdifferenz über den Kondensator (als gleitender exponentieller Durchschnitt) an. Ab 13:36 werden fehlerhafte Zustände verzeichnet und ab 14:05 wird die Temperaturspreizung als fehlerhaft zu hoch bewertet (Fehlerindikator gleich MINUS EINS).

3.7 Fehlererkennungsalgorithmen Raumluftechnik

3.7.1 Einleitung

Die nachfolgende Tabelle 3-8 zeigt Fehlerarten in der Versuchsanlage für die Regeln zur Fehlererkennung entwickelt wurden. In der rechten Spalte ist die Bewertung der FMEA-Aufgabenpriorität (AP) angegeben. Für die zu entwickelnden Fehlererkennung wurden zunächst die Fehlerszenarien mit einer hohen und mittleren Bewertung gewählt.

Es wurden für folgende Fehler der Versuchsanlage Regeln mit Algorithmen entwickelt:

Tabelle 3-8: Erprobte Regeln und erkennbare Fehler in der Raumluftechnik

FED	Fehlerart	Ursache	AP
Fehlererkennung durch Wechsel der Regelungssequenzen	Diverse Fehler die zu häufigen Wechseln der Regelungssequenzen führen	In Komponenten und Regelung	N-H
Fehlererkennung durch Abgleich Betriebszustand Ventilator mit Luftförderungszustand	Ventilator: Luftvolumenstrom zu klein	Defekt	H
	Ventilator: Luftvolumenstrom zu groß	nicht intermittierender Betrieb	H
Fehlererkennung durch Prüfung des statischen Drucks in der Luftleitung	Ventilator: Luftvolumenstrom zu klein	Defekt Drehzahlregelung oder erhöhter Druckverlust auf Saugseite des Ventilators	H
	Ventilator: Luftvolumenstrom zu groß	Fehler Drehzahlregelung	H
Prüfung Zu- und Abluftklappen	Volumenstromregler: Luftvolumenstrom zu klein	Stellsignal wird nicht richtig in Änderung Klappenstellung umgesetzt	M
	Volumenstromregler: Luftvolumenstrom zu groß	Stellsignal wird nicht richtig in Änderung Klappenstellung umgesetzt	H
	Ventilator: Luftvolumenstrom zu groß	Leckagen auf Druckseite des Ventilators	H
Prüfung Betriebszustand Lufterwärmungskomponente mit Regelsequenz der Lufterwärmung	Kreuzstrom-WRG, Lufterhitzer und Mischluftkammer: Leistung zu groß (nicht intermittierend)	Stellsignal wird nicht richtig in Änderung Klappenstellung umgesetzt	H
	Kreuzstrom-WRG, Lufterhitzer und Mischluftkammer: Leistung zu klein (komplett deaktiviert)		H
Prüfung der Zulufttemperatur in der Luftleitung	Nutzerkreis: zu warm	Ursachen in Lufterwärmungskomponenten	H
	Nutzerkreis: zu kalt	Ursachen in Lufterwärmungskomponenten	M-H

In MFGeb konnten nicht für alle Fehlerszenarien mit einer mittleren bis hohen Aufgabenpriorität Fehlererkennungs- und Diagnosealgorithmen entwickelt werden. Nachfolgende Fehler sind nach der FMEA-Risikobewertung relevant und sollten in zukünftigen Forschungsprojekten betrachtet werden:

- Ineffizienz durch nicht voll ausgeschöpftes Potential und Fehlerträge der Kreuzstrom-WRG
- Ineffizienz durch nicht voll ausgeschöpftes Potential oder Fehlerträge von Erd-Wärme-Übertragern
- Ineffizienz durch nicht voll ausgeschöpftes Potential und Fehlerträge bzw. fehlerhafte Mischung der Luftvolumenströme in Mischluftkammer
- Ineffizienz Lufterhitzer und Kühler durch degenerative Fehler
- Druckverlust von Filtern mit vom Luftvolumenstrom abhängigen Grenzwerten
- Fehler im Frostschutzbetrieb
- Ineffizienz der Luftförderung durch Prüfung der Raumlasten zur Fehlererkennung

3.7.2 Klassifizierung des Betriebszustands

Mit wechselndem Wetter oder sich ändernden Nutzeranforderung müssen RLT-Anlagen verschiedene Forderungen erfüllen. Hierzu kann die Anlage in verschiedenen Betriebszustände und Regelsequenzen betrieben werden. Dabei muss die Anlage, in Abhängigkeit vom jeweiligen Zustand, an verschiedenen Komponenten abweichende Sollwerte einhalten. Daher sollte, bevor eine Regel zur Fehlererkennung und Diagnose angewendet werden kann, bestimmt werden in welcher Betriebsart und Regelungssequenz sich die RLT-Anlage befindet. So muss bspw. eine Regel, die den Ventilator im Lüftungsbetrieb kontrolliert andere Parameter besitzen, als eine die den Ventilator im nicht Lüftungsbetrieb prüft. Es muss vor der Regelanwendung der aktuelle Zustand der RLT-Anlage klassifiziert werden. Hierzu werden verschiedene Schaltbefehle und Stellsignale der RLT genutzt.

Der Lüftungsbetrieb wird klassifiziert, indem die Stellsignale der Zuluftklappen ausgewertet werden. Ist ein Stellsignal einer Zuluftklappen größer als 0% befindet sich die Anlage im Lüftungsbetrieb und die Variable RS_LFTG wird gleich EINS gesetzt. Sind alle Zuluftklappen geschlossen ist RS_LFTG gleich NULL.

Die Luftheizung umfasst mehrere Regelungssequenzen. Mit steigendem Wärmebedarf der RLT-Anlage wird zuerst die Wärmerückgewinnung, dann die Umluftbeimischung und als letztes der Luftheizer aktiviert (Abbildung 3-23). Der Wärmebedarf wird aus der Differenz der Soll-Zulufttemperatur zur gemessenen Zulufttemperatur abgeleitet. Für andere RLT-Anlagen muss dieses Vorgehen ggf. angepasst werden.

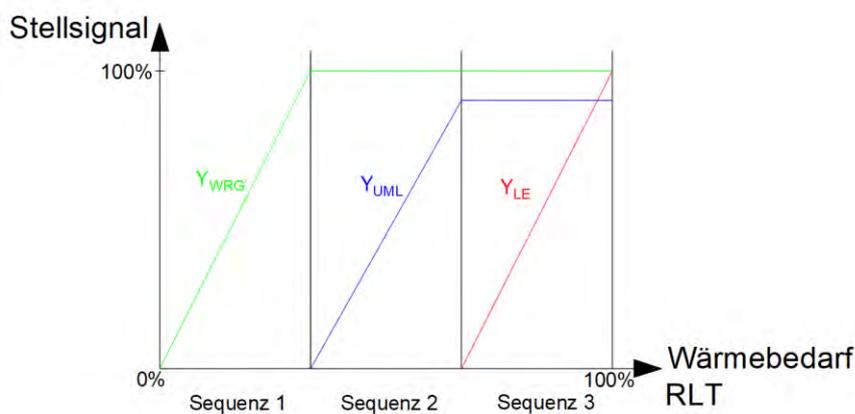


Abbildung 3-23: Regelungssequenzen der Luftheizung

Um die aktuelle Regelungssequenz der Luftheizung RS_{HZG} zu bestimmen werden die Stellsignale der Lüftungsregelung der Mischluftkammer, WRG und des Luftheizers in Prozent verwendet. Der minimale Außenluftanteil nach der Mischluftkammer wird in der Versuchsanlage durch die Abluftqualität (VOC) berechnet. Die Zuordnung der Kombinationen zur jeweiligen Regelungssequenz der Luftheizung ist in Tabelle 3-9 dargestellt.

Tabelle 3-9: Zuordnung Stellsignale zur Regelungssequenz der Luftheizung

WRG	Umluft	Lufferhitzer	Regelungssequenz
Y_{WRG}	Y_{UML}	$Y_{LE,3WV}$	RS_{HZG}
0%	0%	0%	0
>0%	0%	0%	1
100%	>0%	0%	2
100%	>80% bzw. nach Abluftqualität	>0%	3
weitere Kombinationen			4

Unbekannte nicht der Abbildung 3-23 entsprechende Kombinationen der Schaltsignale werden der Regelungssequenz 4 zugeordnet. Für diese Sequenz werden keine Regeln zur Fehlererkennung und Diagnose aufgestellt (bspw. Frostschutzregelungen oder Regelungstechnische Fehler der Luftheizsequenzen).

Der Quellcode der Klassifizierung der Messdaten ist unter Anhang A6-5 zu finden.

3.7.3 Fehlererkennung durch Wechsel der Regelungssequenzen

Nach [House (2001)] deuten zu viele Wechsel der ablaufenden Regelungssequenzen innerhalb einer bestimmten Zeit in einer RLT-Anlage auf Defizite der Regelung oder Defekt an Komponenten hin. Die erste Regel soll auf diesen Umstand prüfen.

Um die Regel Nutzen zu können muss bekannt sein in welchen Betriebszuständen und Sequenzen sich die Anlage in der vorangegangenen Stunde befand (siehe auch Kapitel 2). Die Regel kann angewendet werden bevor regelungssequenzspezifische Regeln genutzt werden.

In [House (2001)] werden maximal 6 Wechsel der Regelungssequenzen innerhalb einer Stunde empfohlen. Ein Fehler wird erst aufgedeckt, wenn Daten einer Stunde zur Verfügung stehen. Zu jedem diskreten Zeitpunkt werden die Sequenz- und Zustandswechsel der letzten Stunde gezählt. Übersteigen diese den Maximalwert (6 pro Stunde), wird durch den Algorithmus der Fehlerindikator der Regel gleich EINS gesetzt. Die Regel wurde in VBScript für eine offline-Auswertung programmiert. Ein Umgesetzter Programmablaufplan und Quelltext ist in Anhang A6-6 zu finden.

Die Regel wurde an Messdaten der Versuchsanlage getestet und konnte eine Überschreitung der 6 Regelungssequenzwechsel am 10.3.2021 12:11 feststellen. Der Fehler wurde durch manuelle Eingriffe in die Anlage provoziert.

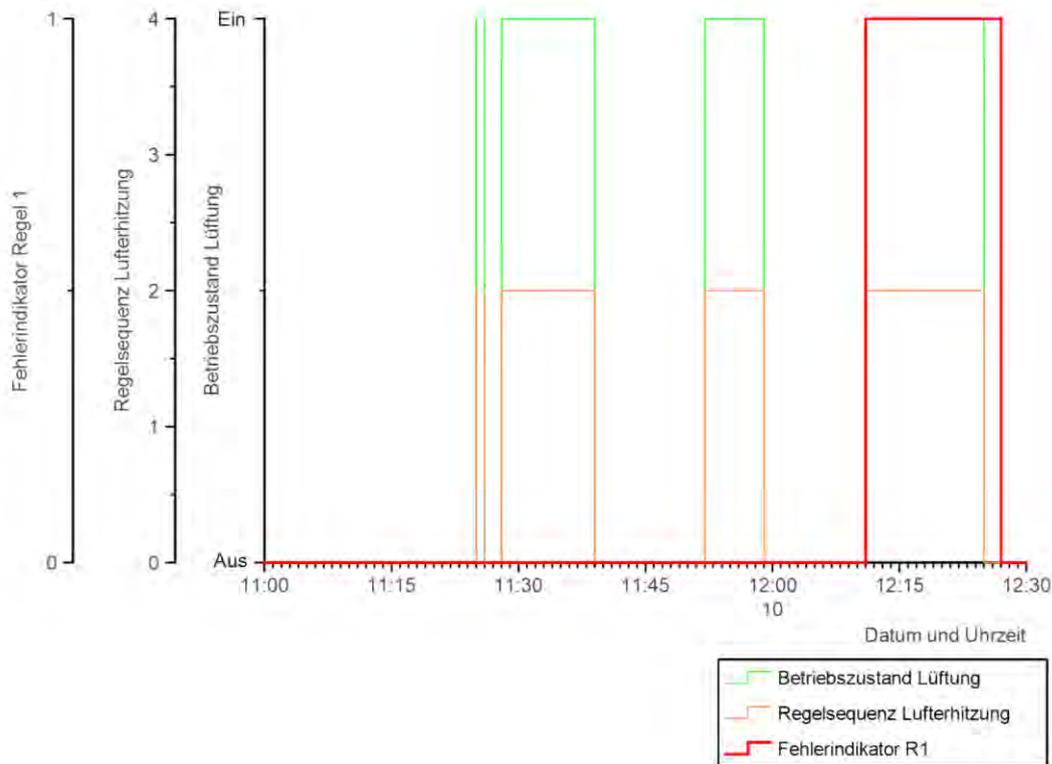


Abbildung 3-24: Regelungssequenzen der Luftheizung

11:25 erfolgte der erste Wechsel durch das Aktivieren des Lüftungsbetriebs (Regelungssequenz Luftförderung = 1). Kurz darauf wurde die Lüftung wieder deaktiviert. Darauf war der Lüftungsbetrieb weiterhin von 11:28 bis 11:38 und später noch einmal von 11:52 bis 11:58 aktiv. Mit einer weiteren Aktivierung des Lüftungsbetriebs 12:11 erfolgte der 7. Sequenzwechsel und der Fehlerindikator der Regel 1 nimmt den Wert EINS an.

3.7.4 Fehlererkennung durch Abgleich Betriebszustand Ventilator mit Luftförderungszustand

Mit der zweiten Regel wird geprüft ob die Ventilatoren, in Abhängigkeit vom geforderten Luftförderungszustand, ein- oder ausgeschaltet sind. Dazu wird der gemessene Differenzdruck über den Ventilator Δp_{Vent} genutzt, um festzustellen, ob dieser eingeschaltet ist.

Die Regel im Lüftungsbetrieb lautet als Ungleichung:

$$\Delta p_{GW} - \Delta p_{Vent}(t) \leq 0 \quad (3-32)$$

Ist die Ungleichung erfüllt, wird der Ventilatorbetrieb durch Regel 2 als fehlerfrei bewertet. Der zugehörige Fehlerindikator soll den Wert NULL annehmen. Unterschreitet der gemessene Differenzdruck des Ventilators Δp_{Vent} im Lüftungsbetrieb einen festgelegten

Grenzwert Δp_{GW} , wird die Ungleichung nicht erfüllt. Dies wird als fehlerhafter Zustand gewertet.

Ist die Anlage nicht im Lüftungsbetrieb, lautet die Regel:

$$\Delta p_{GW} - \Delta p_{vent}(t) \geq 0 \quad (3-33)$$

Überschreitet Δp_{vent} des Grenzwertes wird dies als fehlerhafter Zustand. Um den Anforderungen an die Sensitivität und Spezifität der Fehlererkennung gerecht zu werden, mussten für unterschiedliche Betriebszustände verschiedene Grenzwerte Δp_{GW} empirisch ermittelt werden (siehe Tabelle 3-10).

Tabelle 3-10: Grenzwerte zur Fehlererkennung mit Regel 2

Betriebszustand	Grenzwerte Differenzdruck	
	Zuluftventilator	Abluftventilator
Lüften	5 Pa	5 Pa
nicht Lüften	2 Pa	2 Pa

Weiterhin können hochfrequente Variationen der Messwerte die Anzahl der Fehlalarme erhöhen. Zur Verringerung der hochfrequenten Anteile werden die Messwerte durch einen Tiefenpassfilter – als exponentiell gleitender Durchschnitt (siehe Formel (3-34)) – auf die Verwendung im Algorithmus vorbereitet.

$$\Delta p_{vent,EGD}(t) = f_{EGD} \cdot \Delta p_{vent}(t) + (1 - f_{EGD}) \cdot \Delta p_{vent,EGD}(t - 1) \quad (3-34)$$

f_{EGD} ist für diesen Anwendungsfall mit 0,65 festgelegt. t steht für den aktuellen Zeitpunkt. In den Formeln (3-32) und (3-33) wird $\Delta p_{vent,EGD}(t)$ als $\Delta p_{vent}(t)$ genutzt. Die Fehlererkennung und die Berechnung von $\Delta p_{vent,EGD}(t)$ wird im Algorithmus aktiv, wenn der aktuelle Betriebszustand länger als 2 Minuten wirksam ist.

Ein Fehler wird durch den Algorithmus bemerkt, wenn $\Delta p_{vent,EGD}(t)$ mehr als zweimal nacheinander den aktuellen Grenzwert verletzt.

Tritt ein Fehler im Lüftungsbetrieb auf, nimmt der Fehlerindikator der Regel 2 den Wert EINS an. Tritt ein Fehler nicht im Lüftungsbetrieb auf, soll der Indikator den Wert MINUS EINS annehmen.

Die Umsetzung der zweiten Regel als Programmablaufplan und Quelltext in VBScript ist Anhang A6-7 zu sehen.

Der vorgestellte Algorithmus für die Regel 2 wird anhand von Messdaten mit 4 Fehlerszenarien erprobt. In den Szenarien wurden Fehler in die Anlage implementiert und messtechnisch aufgezeichnet.

Im ersten Test der Regel 2 soll ein Ausfall des ZUL-Ventilators im Lüftungsbetrieb erkannt werden. Das zugehörige Diagramm ist in Abbildung 3-25 zu sehen.

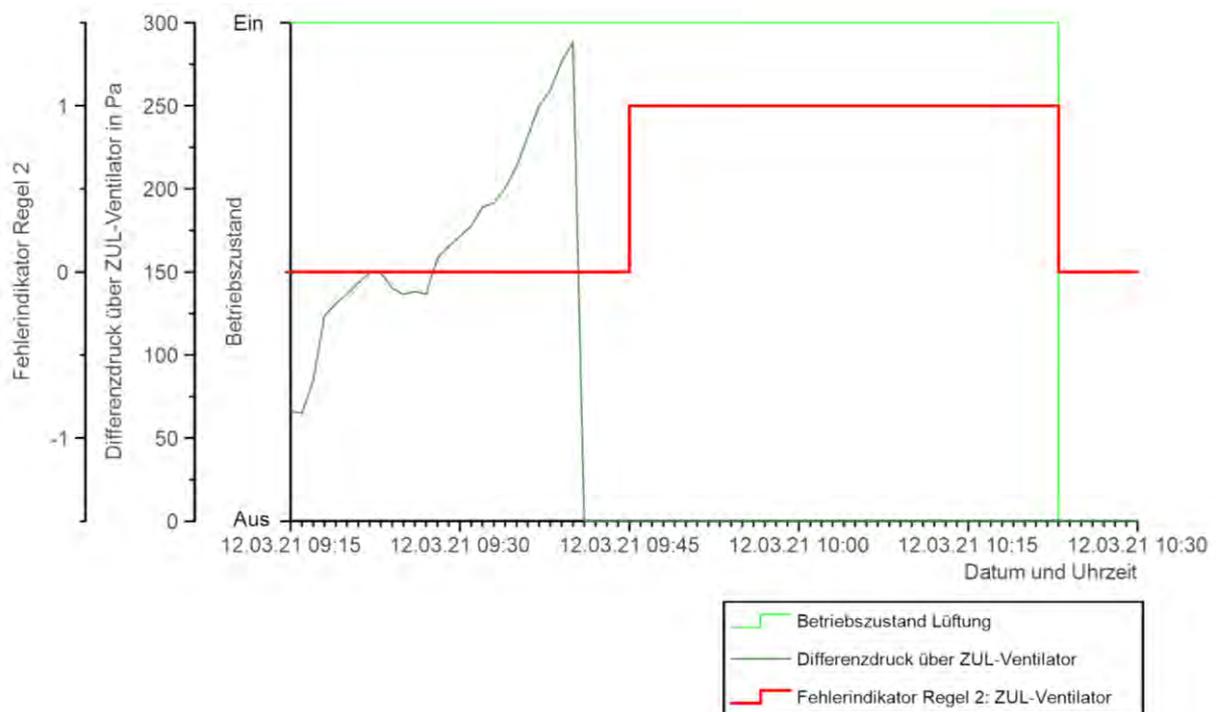


Abbildung 3-25: Anwendung Regel 2: Ausfall des ZUL-Ventilators im Lüftungsbetrieb

Die Anlage befindet sich im Lüftungsbetrieb. Um 9:41 fällt der ZUL-Ventilator aus und der Differenzdruck sinkt auf 0Pa ab. Ab 9:45 wird der Fehler durch den Algorithmus erkannt (Fehlerindikator der Regel 2 für ZUL-Ventilator gleich EINS). Ab 10:23 befindet sich die Anlage nicht mehr im Lüftungsbetrieb und der Fehlerindikator nimmt den Wert für einen fehlerfreien Zustand an (NULL). Der Algorithmus konnte den Fehlerzustand feststellen.

Im zweiten Test der Regel soll ein eingeschalteter ZUL-Ventilator im nicht Lüftungsbetrieb erkannt werden. In Abbildung 3-26 ist das zugehörige Diagramm zu sehen.

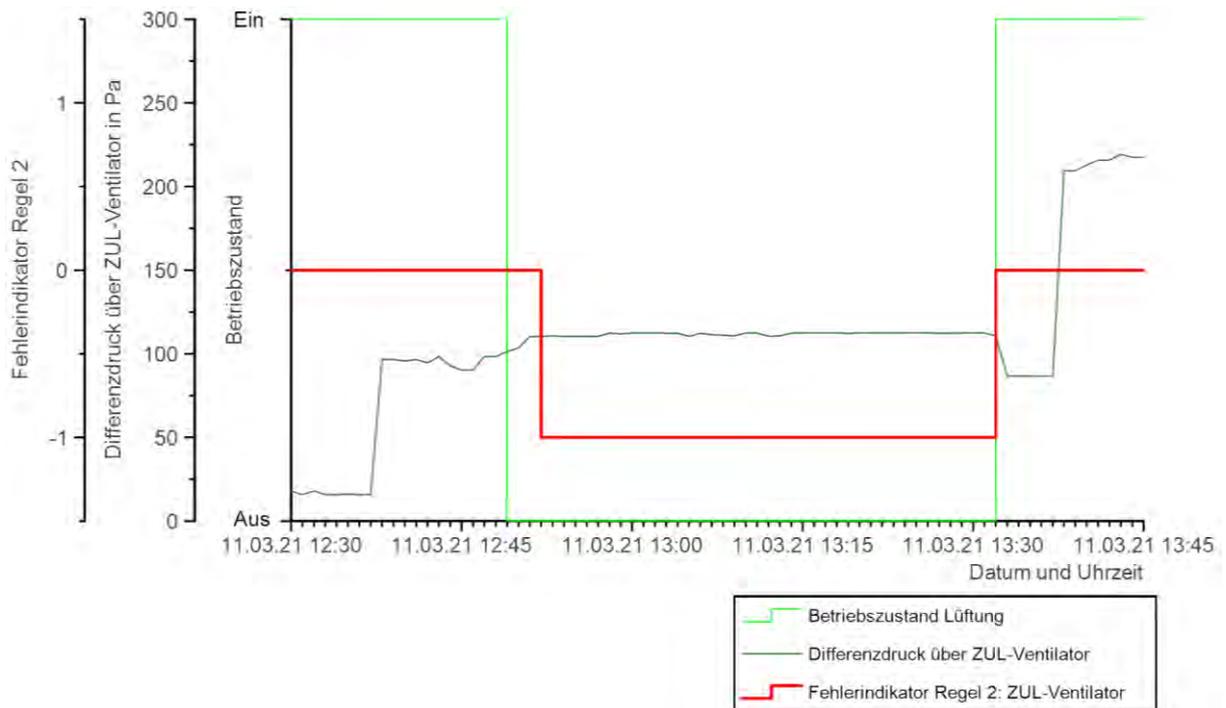


Abbildung 3-26: Anwendung Regel 2: Eingeschalteter ZUL-Ventilator im nicht Lüftungsbetrieb

Die RLT-Anlage soll ab 12:49 keine Luft fördern, jedoch schaltet der ZUL-Ventilator nicht aus. Der Algorithmus der Regel 2 detektiert den Fehler ab 12:52 und der zugehörige Indikator nimmt den Wert MINUS EINS an. Ab 13:32 wird der Lüftungsbetrieb der RLT-Anlage wieder aufgenommen und der Fehlerindikator nimmt den Wert NULL an – die Anlage befindet sich in einem fehlerfreien Zustand.

Im nächsten Test der Regel 2 soll ein Ausfall des ABL-Ventilators im Lüftungsbetrieb erkannt werden (siehe Abbildung 3-27).

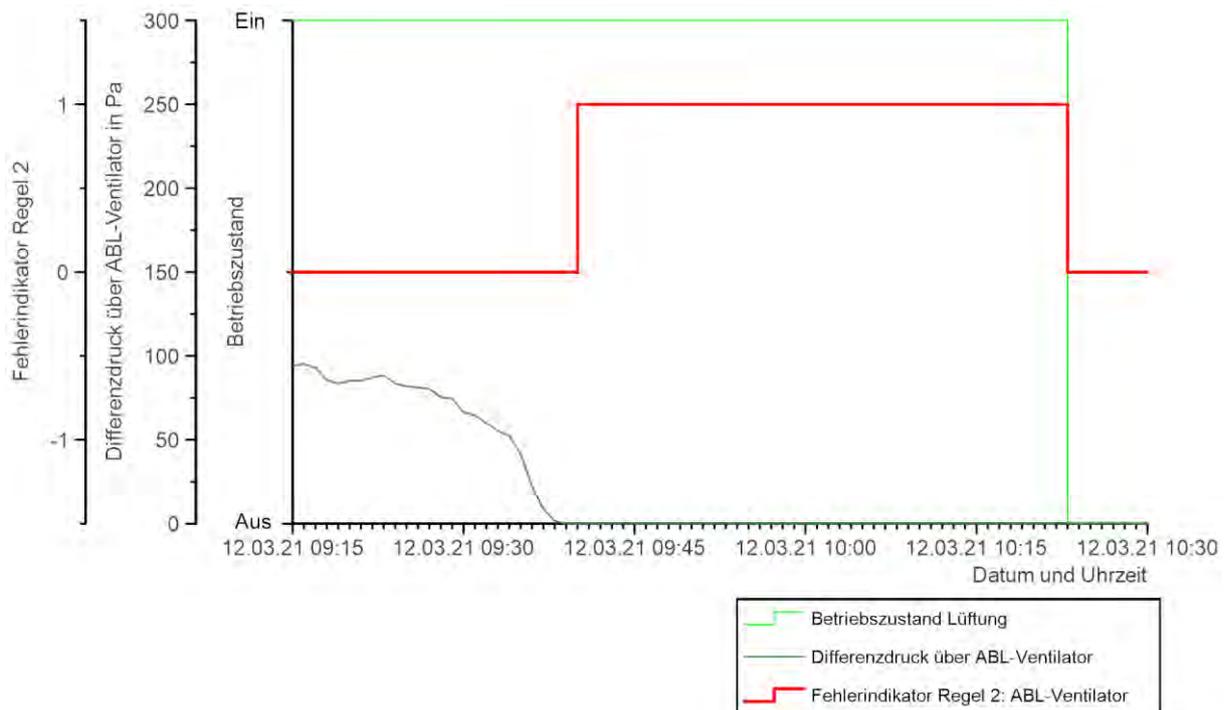


Abbildung 3-27: Anwendung Regel 2: Ausfall des ABL-Ventilators im Lüftungsbetrieb

Die RLT-Anlage befindet sich im Lüftungsbetrieb und 9:39 fällt der Abluftventilator aus. Der gemessene Differenzdruck über den ausgefallenen Ventilator sinkt gegen 0Pa. Der Fehler wird 9:40 durch den Algorithmus erkannt (Indikator gleich EINS) und bleibt bis zum Einstellen den Lüftungsbetriebs um 10:23 bestehen.

Im letzten von der Regel 2 abzudeckenden Fehlerszenario soll ein eingeschalteter ABL-Ventilator im nicht Lüftungsbetrieb entdeckt werden (Abbildung 4 4).

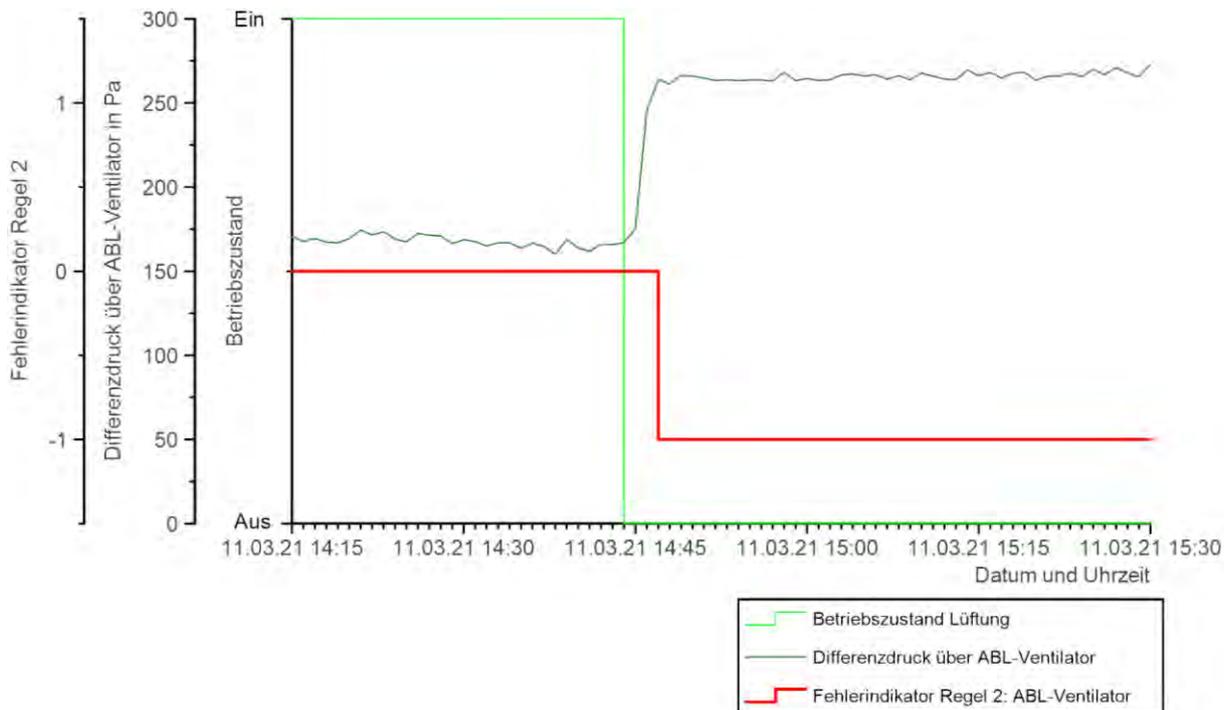


Abbildung 3-28: Anwendung Regel 2: Eingeschalteter ABL-Ventilator im nicht Lüftungsbetrieb

Die RLT-Anlage befindet sich ab 14:44 nicht mehr im Lüftungsbetrieb, jedoch wird der ABL-Ventilator durch einen Fehler nicht deaktiviert. Der Fehler wird ab 14:47 entdeckt (Indikator Regel 2 des ABL-Ventilators gleich MINUS EINS) und bleibt bis zur Aufnahme des Lüftungsbetriebs am nächsten Morgen bestehen.

Der Algorithmus wurde zusätzlich auf Messdaten des Zeitraums vom 3.07.2020 bis zum 31.08.2020 angewendet. Außer in Szenarien mit implementierten Fehlern konnten weitere Fehler detektiert werden. Diese traten jedoch nur auf, wenn die Wartungstüren der RLT-Anlage geöffnet waren. Sind die Wartungstüren geschlossen wurden keine Alarme durch den Algorithmus ausgegeben.

In einer weiteren Messreihe mit Daten vom 13.01.2022 bis zum 11.03.2022 und implementierten Fehlerszenarien lieferte der Algorithmus der zweiten Regel die zu erwartenden Ergebnissen.

3.7.5 Fehlererkennung durch Prüfung des statischen Drucks in der Luftleitung

Die folgende Regel wird im Lüftungsbetrieb angewendet, wenn kein potenzieller Fehler durch die zweite Regel erkannt wird.

In [Ebel et. al. (2003) S.172] wurden Differenzdrücke des Ventilators mit Referenzwerten verglichen, um Fehler an diesem festzustellen. Die dabei getestete Anlage war jedoch für einen konstanten Luftvolumenstrom und konstante Differenzdrücke über den Ventilator ausgelegt. In der RLT-Versuchsanlage sind die Luftvolumenströme jedoch variabel.

Daher ist auch der Differenzdruck über den Ventilator nicht konstant. In der Versuchsanlage wird der statische Druck in der Luftleitung, bei aktiver Drehzahlregelung des Ventilators, konstant gehalten. Dieser kann durch die dritte Lüftungstechnische Regel geprüft werden. Das Vorgehen kann nur bei aktiver Drehzahlregelung sinnvoll angewendet werden. Die Regel kann als Gleichung

$$p_{stat,soll} - p_{stat,ist}(t) = \pm p_{stat,GW} \quad (3-35)$$

für einen fehlerfreien Zustand ausgedrückt werden. Der Grenzwert $p_{stat,GW}$ ist für die Versuchsanlage, als relative Abweichung des Soll- zum Ist-Drucks, empirisch mit 10% festgelegt. Der gemessene statische Druck in der Luftleitung $p_{stat,ist}$ wird nach Gleichung (3-34) mit dem Faktor $f_{EGD} = 0,4$ exponentiell geglättet.

Ist die Gleichung (3-35) erfüllt, wird der statische Druck als fehlerfrei bewertet. Der Fehlerindikator der Regel 3 soll den Wert NULL annehmen. Werden durch die Regel 3 über eine Dauer von 25 min fehlerhafte Zustände festgestellt, wird der Soll-Druck im betrachteten Anlagenbereich als fehlerhaft bewertet. Der Fehlerindikator nimmt den entsprechenden Wert an.

Ist $p_{stat,ist}$ zu klein, wird das Ergebnis der Gleichung positiv und der Fehlerindikator der Regel nimmt den Wert EINS an.

Ist $p_{stat,ist}$ zu groß, wird das Ergebnis der Gleichung negativ und der Fehlerindikator nimmt den Wert MINUS EINS an.

Weiterhin wird das Stellsignal des betreffenden Ventilators zur Fehlererkennung genutzt. Wenn der gemessene statische Druck $p_{stat,ist}$ zu klein ist und das Stellsignal des Ventilators 100% beträgt, soll der Fehlerindikator den Wert ZWEI annehmen. Tritt dieser Fall ein, kommen ein defekter Ventilator oder ein geschlossener Strömungsweg als Fehlerursache in Betracht.

Zur Vollständigkeit soll, wenn der gemessene statische Druck $p_{stat,ist}$ zu groß ist und das Stellsignal des Ventilators 0% beträgt, der Fehlerindikator den Wert MINUS ZWEI annehmen. Mögliche Fehlerursachen könnten eine unterbliebene Umsetzung des Stellsignals durch den Ventilator oder eine Beeinflussung durch andere Ventilatoren in der Anlage sein. Ein Fall, in dem der Indikator den Wert MINUS ZWEI annimmt konnte in der Versuchsanlage jedoch nicht beobachtet werden.

In der Versuchsanlage werden folgende Fehler mit dieser Regel entdeckt:

- Zu hoch eingestellte Druck-Sollwerte
- Deaktivierte Drehzahlregelungen der Ventilatoren
- Geschlossene Außenluft- oder Fortluftklappen

Das Vorgehen des Algorithmus ist als Programmablaufplan und kommentierter Quelltext in VBScript in Anhang A6-8 dargestellt.

Der vorgestellte Algorithmus wird nun an einigen Fehlerszenarien erprobt.

Im ersten Testszenario wurde die Drehzahlregelung des ZUL-Ventilators verspätet aktiviert (siehe Abbildung 3-29).

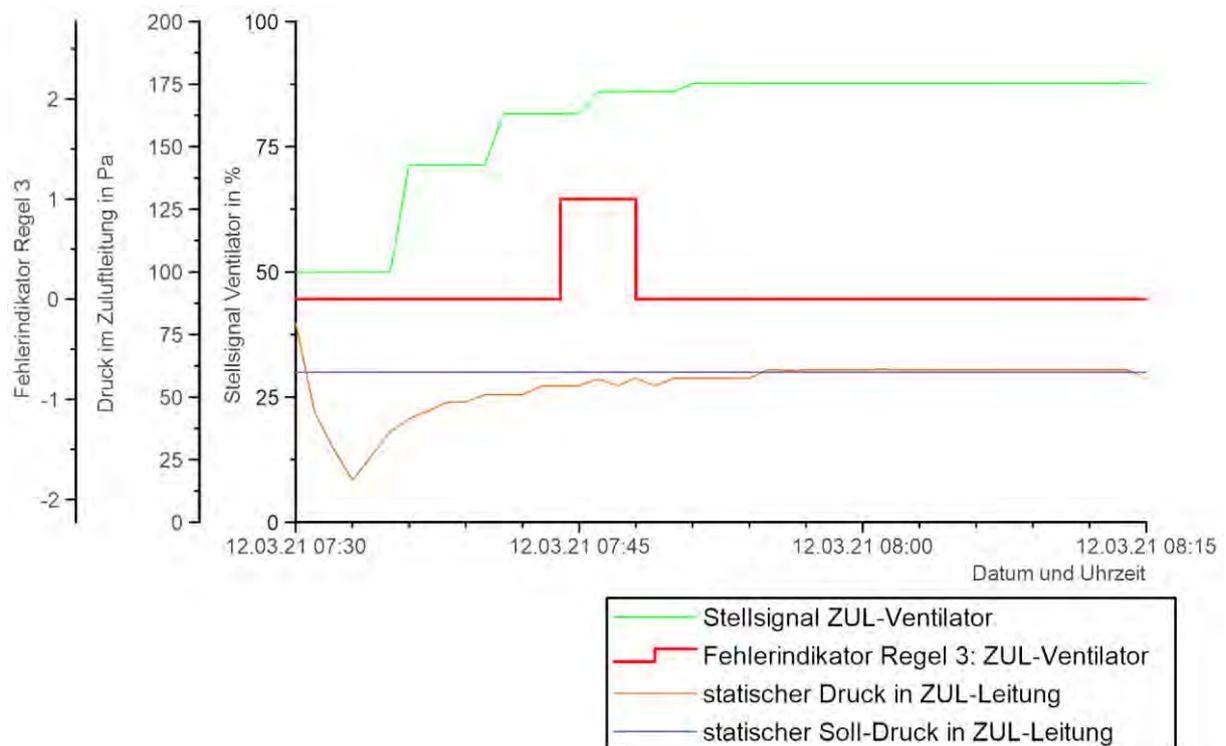


Abbildung 3-29: Anwendung Regel 3: Stellsignal ZUL-Ventilator im Lüftungsbetrieb zu klein

Die Testanlage befindet sich ab 7:30 im Lüftungsbetrieb. In den ersten 5 Minuten war das Stellsignal des Ventilators manuell mit 50% vorgegeben. Danach wurde die Drehzahlregelung aktiviert. Innerhalb der vorgegebenen Zeit schaffte es der Ventilator nicht den vorgegebenen statischen Druck zu erreichen worauf hin ab 7:44 der Fehlerindikator gleich EINS ausgegeben wurde. Ab 7:48 wurde der statische Druck in der Zuluftleitung erreicht und der Indikator nahm den Wert NULL an (kein Fehler).

Im nächsten Szenario wurde im Lüftungsbetrieb die Außenluftklappe komplett geschlossen (siehe Abbildung 3-30).

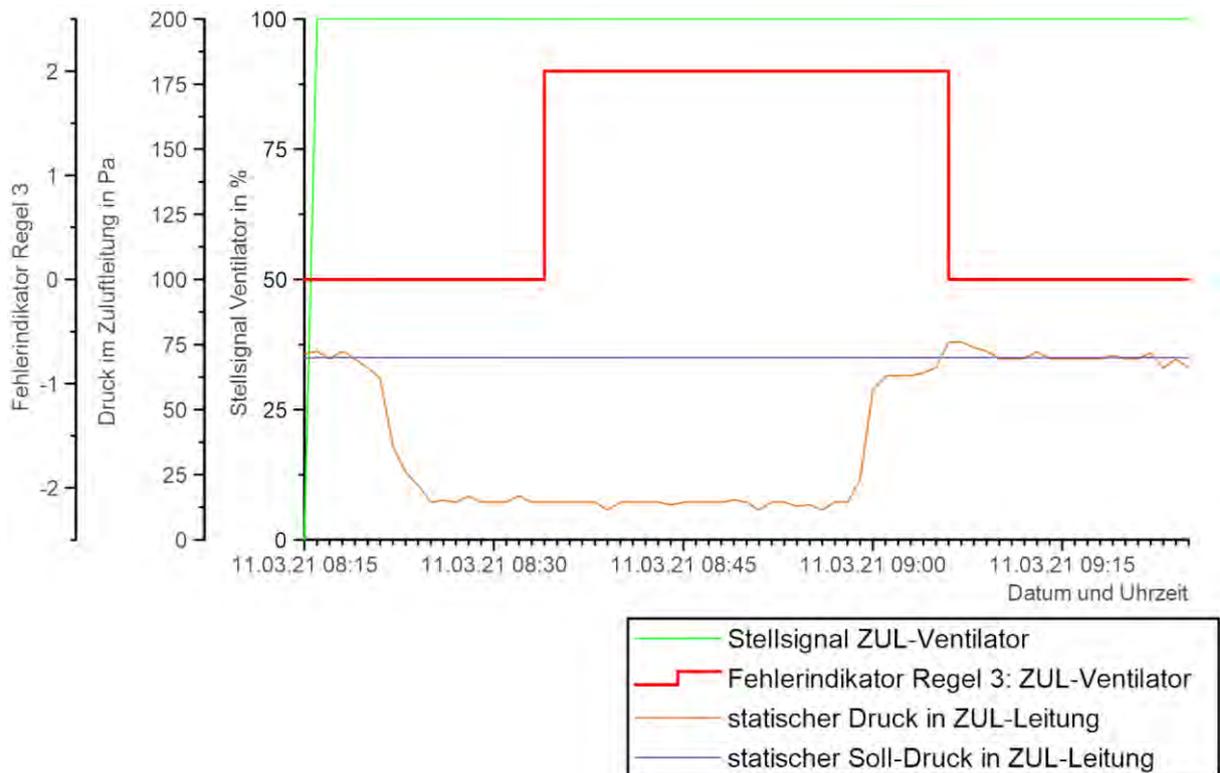


Abbildung 3-30: Anwendung Regel 3: Stellsignal ZUL-Ventilator im Lüftungsbetrieb Außenluftklappe ist geschlossen

Die Versuchsanlage befindet sich im Lüftungsbetrieb mit aktiver Drehzahlregelung der Ventilatoren. Das Stellsignal des Zuluftventilators beträgt 100%, um den vorgegebenen statischen Druck in der Luftleitung bei 70Pa zu halten.

Ab 8:34 wird der Fehlerindikator gleich ZWEI gesetzt, da das Ventilatorstellsignal 100% beträgt und der Sollwert unterschritten wird. Mögliche Fehlerursachen sind ein Defekt des Ventilators, eine zu hohe Sollwertvorgabe für den statischen Druck oder eine Beeinträchtigung des Strömungswegs vor der statischen Druckmessung. Im betrachteten Fall war ab 8:21 die Außenluftklappe geschlossen. Die Klappe wurde 8:59 wieder geöffnet. Ab 9:06 befindet sich die Anlage nach dem Algorithmus wieder in einem fehlerfreien Zustand.

In diesem Testszenario wird das Stellsignal des ABL-Ventilators manuell erhöht (siehe Abbildung 3-31).

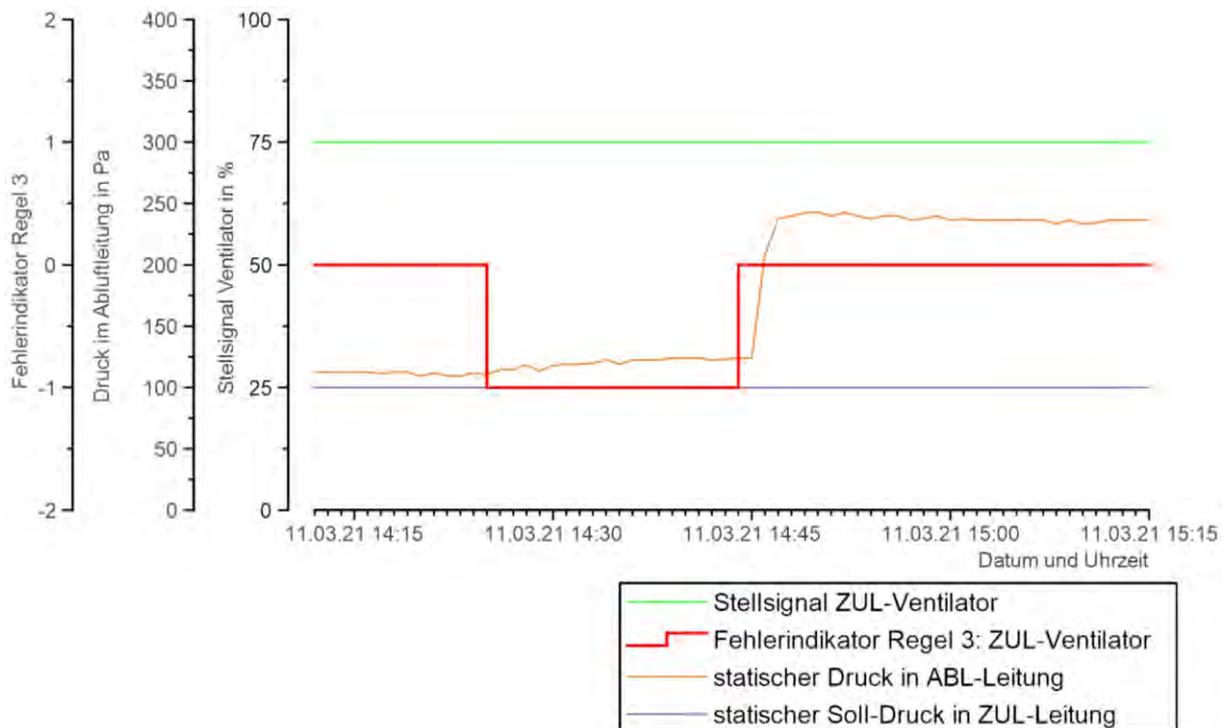


Abbildung 3-31: Anwendung Regel 3: Stellsignal ABL-Ventilator im Lüftungsbetrieb zu groß

Wieder befindet sich die Anlage im Lüftungsbetrieb und die Drehzahlregelung ist deaktiviert. Das Stellsignal des Abluftventilators ist mit 75% vorgegeben. Bei dieser Drehzahl wird zu Beginn der statische Druck in den Abluftleitung hinreichend genau erreicht (Soll-Druck gleich 100Pa). Ab 14:20 wird die Umluftklappe geschlossen. Der Ventilator reagiert nicht auf die sich geänderten Strömungsverhältnisse und überschreitet dadurch den statischen Soll-Druck in der Abluftleitung. Ab 14:25 nimmt der Fehlerindikator der Regel 3 den Wert EINS an und bleibt bis 14:43 erhalten. Ab 14:44 war der Lüftungsbetrieb deaktiviert, jedoch lief durch die manuelle Vorgabe des Stellsignals der Ventilator weiter. In diesem Anlagenzustand wird, durch das Vorgehen der Regel 3, kein Fehler entdeckt. Jedoch wird der sich nun ergebende Anlagenfehler durch die Regel 2 detektiert (siehe Seite 138 und Abbildung 3-28).

Im letzten vorgestellten Fehlerszenario ist die Drehzahl des Abluftventilators zu gering.

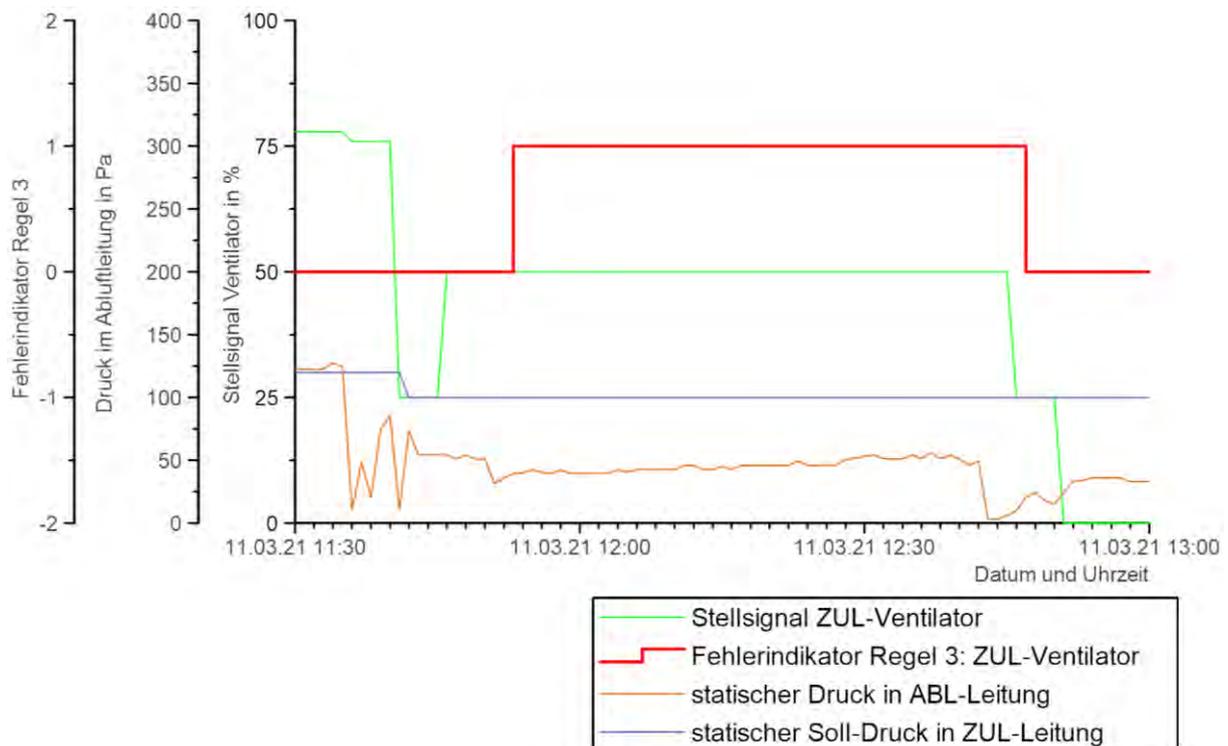


Abbildung 3-32: Anwendung Regel 3: Stellsignal ABL-Ventilator im Lüftungsbetrieb zu klein

Die Versuchsanlage befindet sich im Lüftungsbetrieb. Ab 11:41 wurde die Drehzahlregelung des Abluftventilators deaktiviert. Das Stellsignal wurde zunächst mit 25% und später mit 50% vorgegeben. Der statische Unterdruck in der Abluftleitung fiel daraufhin unter den Sollwert ab. 11:53 nimmt der Fehlerindikator der Regel 3 für den Abluftventilator den Wert EINS an und bleibt bis zur Beendigung des Lüftungsbetriebs 12:47 bestehen. Der statische Druck in der Abluftleitung fällt nach deaktivieren des Lüftungsbetriebs nicht komplett ab, da der Zuluftventilator auf Grund eines Fehlers weiterbetrieben wurde. Dieser Fehler wird durch die Regel 2 auf Seite 136 erkannt.

Durch den Algorithmus der Regel 3 konnten im betrachteten Messzeitraum vereinzelt weitere Fehler detektiert werden, die ihre Ursache in unüblich hohen Sollwertvorgaben des statischen Drucks hatten.

In einer weiteren Messreihe mit Daten vom 13.01.2022 bis zum 11.03.2022 lieferte der Algorithmus der Regel 3 die erwarteten Ergebnisse – implementierte Fehler wurde gefunden und Fehlalarme blieben aus.

3.7.6 Fehlererkennung an Zu- und Abluftklappen

3.7.6.1 Grundlagen

Mit der vierten Regel soll erkannt werden, ob es auf der Druck- oder Saugseite des Ventilators nicht gewünschte Veränderungen der Luftleitung, durch bspw. falsche Klappenstellungen oder Leckagen, vorliegen. Die in der Versuchsanlage verbauten Ventilatoren regeln einen konstanten statischen Druck in der Luftleitung aus (wenn Drehzahlregelung aktiv, sonst manuelle Drehzahlvorgabe). Aus der Recherche zu vorhanden FED Methoden wird bei dieser Art von Anlage häufig ein Soll-Ist-Vergleich der Luftvolumenströme, ggf. mit Berücksichtigung der gemessenen Drücke, durchgeführt ([Birnbaum et. al. (2007) S.208], [Jagnow & Gebhardt (2018) S.69], [Ebel et. al. (2003) S.172], [Görres et. al. (2007) S. 93] sowie [Großklos et. al. (2008) S.86]).

Die einzuhaltende Regel kann vereinfacht

$$\dot{V}_{soll} - \dot{V}_{ist} = \pm \dot{V}_{GW} \quad (3-36)$$

lauten. \dot{V}_{GW} ist für die Versuchsanlage, als relative Abweichung des Soll- zum Ist-Volumenstroms, mit 15% festgelegt. Ist die Gleichung erfüllt wird kein Fehler durch Regel 4 entdeckt. Dieses Vorgehen sollte, unter Nutzung einer Volumenstrommessung und geeigneter Soll- und Grenzwerte, in jeder RLT-Anlage anwendbar sein.

In der Versuchsanlage liegen jedoch keine Soll- oder Ist-Luftvolumenströme als Datenpunkt vor. Daher muss ein alternatives Verfahren entwickelt werden.

Anhand der Kontinuitätsgleichung ergibt sich der Volumenstrom nach Formel (3-37).

$$\dot{V} = A \cdot w \quad (3-37)$$

Der Strömungsquerschnitt A ist im Zweifelsfall bei einer Anlage nicht bekannt und auch die Strömungsgeschwindigkeit w wird meist nicht ermittelt. Jedoch sollte der Strömungsquerschnitt bei verbauten Lüftungsklappen oder Volumenstromreglern proportional zu Stellsignal der Luftklappen Y_{LK} sein.

$$A \propto Y_{LK} \quad (3-38)$$

Ist in einem Abschnitt der Lüftungsanlage keine Klappe verbaut, kann der Strömungsquerschnitt als konstant angesehen werden.

Der dynamische Druck p_{dyn} verändert sich quadratisch zur Strömungsgeschwindigkeit. Daher kann die Proportionalität (3-39) angenommen werden.

$$w \propto \sqrt{p_{dyn}} \quad (3-39)$$

Zur Schätzung des dynamischen Druckes müssen die RLT-Anlage und ihr Druckverhältnisse analysiert werden.

In der Testanlage wird an mehreren Stellen in der Luftleitung der statische Über- bzw. Unterdruck in der Luftleitung sowie die Differenzdrücke über die Ventilatoren gemessen.

Zuluftseite

In Abbildung 3-33 ist ein vereinfachtes Schema der Zuluftseite der Versuchsanlage sowie ein qualitativer Druckverlustverlauf zu sehen.

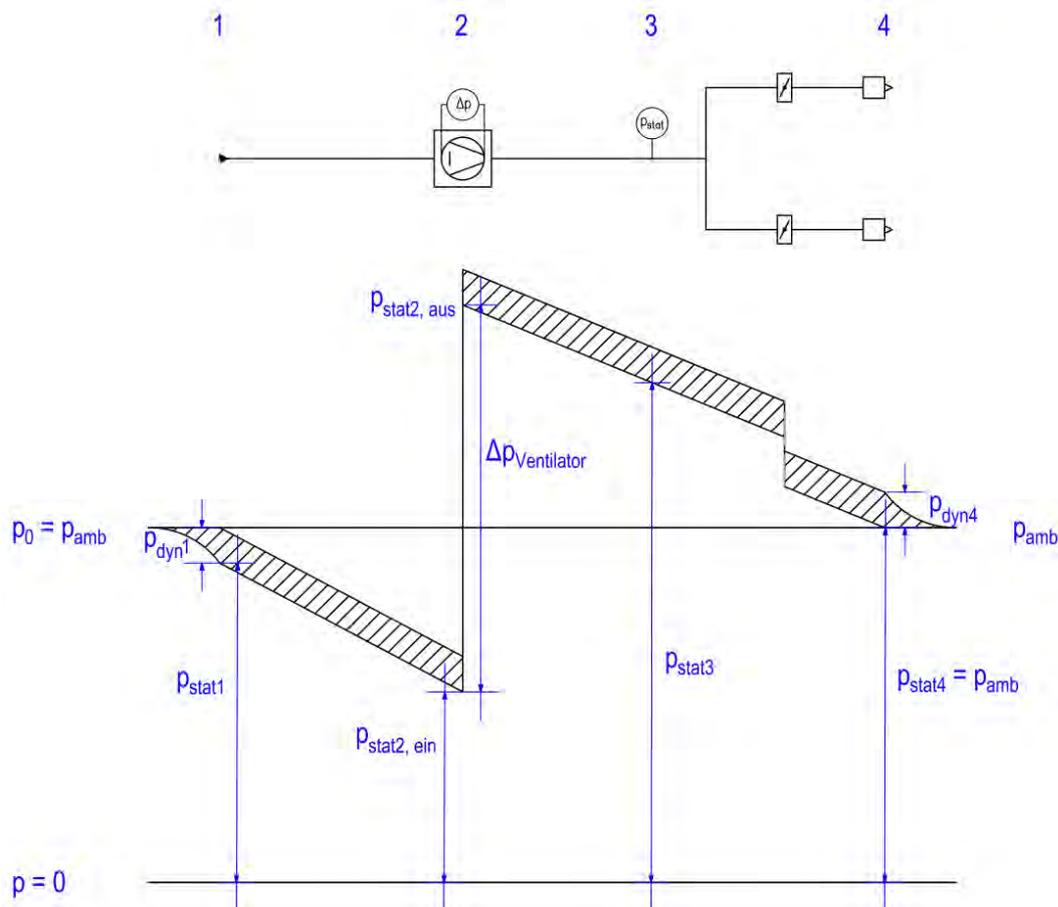


Abbildung 3-33: Übersicht Druckverhältnisse Zuluftseite

Als Messgrößen sind der Differenzdruck $\Delta p_{Ventilator}$ und der statische Überdruck $p_{stat 3}$ vorhanden.

Nach Abbildung 3-33 ist der Druckverlust der Luftleitung zwischen den Punkten 3 und 4 $\Delta p_{Leitung 3...4}$ gleich dem gemessenen statischen Überdruck $p_{stat 3}$.

$$\Delta p_{Leitung 3...4} = p_{stat 3} \quad (3-40)$$

Der Druckverlust der Leitung $\Delta p_{Leitung 3...4}$ wird nach (3-41) berechnet.

$$\Delta p_{Leitung\ 3...4} = \sum_{i=0}^n \lambda_i \cdot \frac{l_i}{d_i} \cdot p_{dyn,i} + \sum_{j=0}^m \zeta_j \cdot p_{dyn,j} \quad (3-41)$$

Für ähnliche Betriebszustände ist folgende Vereinfachung getroffen worden:

$$\Delta p_{Leitung\ 3...4} = \left(\bar{\lambda} \cdot \frac{l_{3...4}}{\bar{d}} + \sum \zeta \right) \cdot \overline{p_{dyn,3...4}} \quad (3-42)$$

Der Term mit Einzelwiderständen und Rohrreibungszahl sollte bei ähnlichen Betriebszuständen ungefähr gleichbleiben. Somit kann ein gemittelter dynamischer Druck $\overline{p_{dyn,3...4}}$ von der statischen Druckmessung bis zum Luftauslass:

$$\overline{p_{dyn,3...4}} = \frac{p_{stat\ 3}}{\left(\bar{\lambda} \cdot \frac{l_{3...4}}{\bar{d}_{3...4}} + \sum \zeta \right)} \quad (3-43)$$

Der Term $\left(\bar{\lambda} \cdot \frac{l_{3...4}}{\bar{d}_{3...4}} + \sum \zeta \right)$ ist stark von der Stellung der Zuluftklappen Y_{LK} abhängig. Er wird im Folgenden als $Z_{3...4}(Y_{LK})$ bezeichnet und muss anhand von Messdaten für verschiedene repräsentative Betriebszustände bestimmt werden.

Eine Größe $\dot{V}_{3...4,Äquivalent}$ die sich ähnlich zum Volumenstrom der Luftklappen verhält kann nach (3-44) berechnet werden (siehe auch Formeln (3-37) bis (3-39)).

$$\dot{V}_{3...4,Äquivalent} = Y_{LK}' \cdot \sqrt{\overline{p_{dyn,3...4}}} = Y_{LK}' \cdot \sqrt{\frac{p_{stat\ 3}}{Z_{3...4}(Y_{LK})}} \quad (3-44)$$

Es ist möglich für einen bekannten fehlerfreien Betriebszustand $\dot{V}_{3...4,Äquivalent}$ als Referenzwert $\dot{V}_{Vent,Äquivalent,Ref.}$ in die Proportionalitätsgesetze des Ventilators (3-45) einzusetzen um auf $\dot{V}_{Vent,Äquivalent}$ anderer Zustände bei anderen Drehzahlen und Differenzdrücken zu schließen.

$$\frac{P_2}{P_1} = \frac{\dot{V}_2 \cdot \Delta p_2}{\dot{V}_1 \cdot \Delta p_1} = \left(\frac{n_2}{n_1} \right)^3 \quad (3-45)$$

Die Drehzahl der Ventilatoren ist nicht bekannt. Statt dieser wird das, sich zur Drehzahl proportional verhaltende, Stellsignal Y_{Vent} genutzt. Der Differenzdruck über den Ventilator $\Delta p_{Ventilator}$ wird gemessen. Das zum genutzten $\dot{V}_{Vent,Äquivalent,Ref.}$ gehörende Stellsignal und der dazu gemessene Differenzdruck müssen bekannt sein und werden als $Y_{Vent,Ref.}$ und $\Delta p_{Vent,Ref.}$ weiterverwendet. Mit diesen Größen lässt sich mit Gleichung (3-46) eine

weitere, sich dem Luftvolumenstrom ähnlich verhaltende, Größe $\dot{V}_{Vent,\ddot{A}quivalent}$ bestimmen.

$$\dot{V}_{Vent,\ddot{A}quivalent} = \frac{\dot{V}_{Vent,\ddot{A}quivalent,Ref.} \cdot \Delta p_{Vent,Ref.} \cdot \left(\frac{Y_{Vent}}{Y_{Vent,Ref.}}\right)^3}{\Delta p_{Vent}} \quad (3-46)$$

$\dot{V}_{Vent,\ddot{A}quivalent}$ nach Formel (3-46) wird in Formel (3-36) als \dot{V}_{ist} und $\dot{V}_{3...4,\ddot{A}quivalent}$ nach Formel (3-44) als \dot{V}_{soll} genutzt.

Abluftseite

In Abbildung 3-34 ist ein vereinfachtes Schema der Abluftseite der Versuchsanlage sowie der zugehörige qualitative Druckverlustverlauf zu sehen.

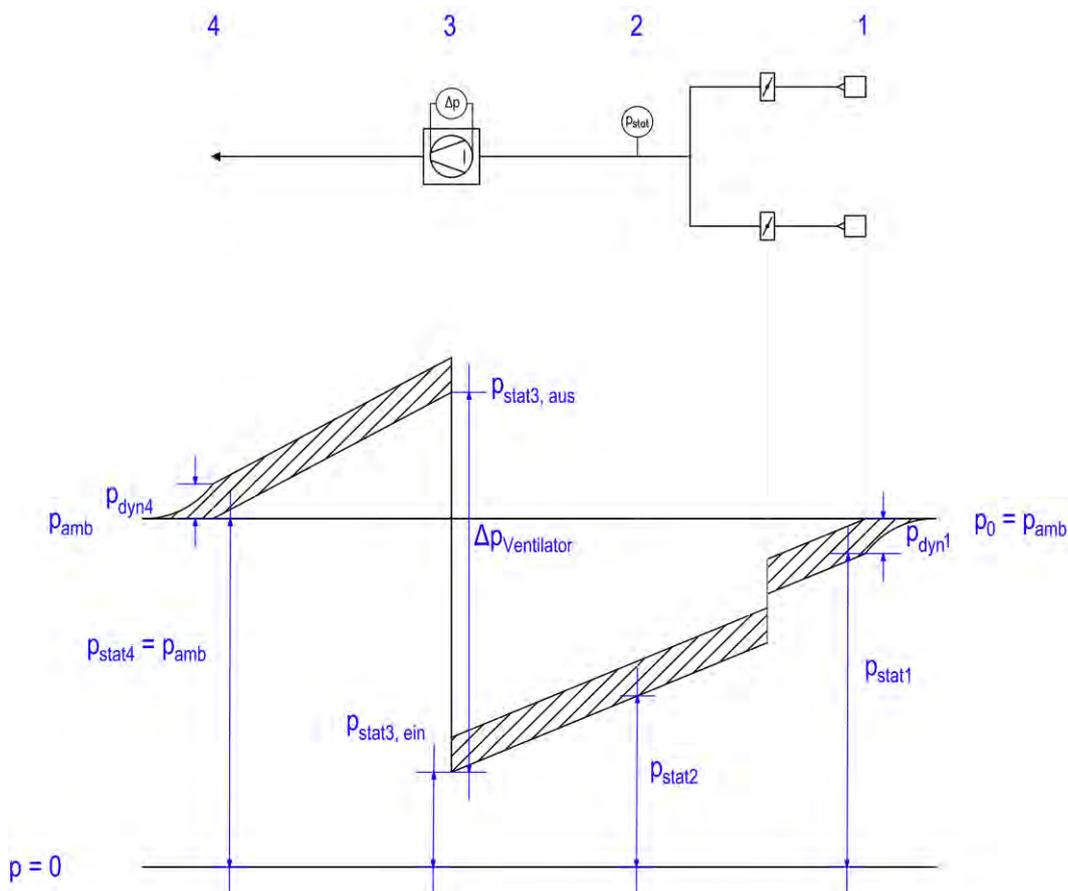


Abbildung 3-34: Übersicht Druckverhältnisse Abluftseite

Der statische Unterdruck $p_{stat\ 2}$ wird auf der Saugseite zwischen Ventilator und den Abluftklappen gemessen.

Die Berechnung des Volumenstromäquivalents zwischen den Punkten 0 und 2 $\dot{V}_{0...2,\ddot{A}quivalent}$ erfolgt analog dem Vorgehen der Zuluftseite zwischen den Punkten 3 und 4 nach Gleichung (3-47).

$$\dot{V}_{0...2,\ddot{A}qivalent} = Y_{LK}' \cdot \sqrt{p_{dyn,0...2}} = Y_{LK}' \cdot \sqrt{\frac{|p_{stat 2}|}{Z_{0...2}(Y_{LK})}} \quad (3-47)$$

Mit Hilfe des Volumenstromäquivalents $\dot{V}_{0...2,\ddot{A}qivalent}$ sowie des Stellsignals $Y_{Vent,Ref.}$ und Differenzdrucks über den Ventilatoren $\Delta p_{Vent,Ref.}$ eines fehlerfreien Zustands, kann mit Gleichung (3-46) auf Volumenstromäquivalente des Ventilators bei anderen Differenzdrücken und Drehzahlen geschlossen werden.

Am Anschluss kann die Gleichung (3-36) für den Anlagenabschnitt angewendet werden.

3.7.6.2 Anwendung in Versuchsanlage

Für die Versuchsanlage genutzten Referenzwerte sind in Tabelle 3-11 aufgelistet.

Tabelle 3-11: Referenzgrößen der Ventilatoren zur Fehlererkennung mit Regel 4

	Zuluftventilator	Abluftventilator
$\dot{V}_{Vent,\ddot{A}qivalent,Ref.}$	7.74	10.92
$\Delta p_{Vent,Ref.}$	229.89Pa	167,69 Pa
$Y_{Vent,Ref.}$	78.03%	75 %

Für die Fehlererkennung werden die Volumenstromäquivalente exponentiell gleitend, mit dem Faktor $f_{EGD} = 0,2$, geglättet (Siehe auch Formel (3-34)).

Für den Term $Z_{3...4}(Y_{LK})$ aus Formel (3-44) wurde in der Versuchsanlage die Formel (3-48) experimentell bestimmt.

$$Z_{3...4}(Y_{LK}) = 0,55 \cdot \frac{Y_{LK1}}{100\%} - 0,0071 + 0,45 \cdot \frac{Y_{LK2}}{100\%} - 0,0059 \quad (3-48)$$

Die flächengemittelte Summe der Stellsignal Y_{LK}' aus Formel (3-44) wird in der Versuchsanlage nach Formel (4 18) berechnet.

$$Y_{LK}' = 0,55 \cdot \frac{Y_{LK1}}{100\%} + 0,45 \cdot \frac{Y_{LK2}}{100\%} \quad (3-49)$$

Durch den Vergleich der volumenstromähnlichen Größen, aus Daten der Klappe und des Ventilators für den aktuellen Zustand der Anlage, kann auf Veränderungen im Luftleitungsnetz geschlossen werden. Ist Bspw. auf der ZUL-Seite einer RLT $\dot{V}_{LK,\ddot{A}qivalent}$ größer als $\dot{V}_{Vent,\ddot{A}qivalent}$ liegt eine Verengung des Strömungswegs auf der Druckseite des ZUL-Ventilators vor. Ist hingegen auf der ZUL-Seite $\dot{V}_{LK,\ddot{A}qivalent}$ kleiner als $\dot{V}_{Vent,\ddot{A}qivalent}$

kann dies auf zu weit geöffnete Klappen oder Leckagen auf der Druckseite des ZUL-Ventilators hinweisen.

Da der Volumenstrom in der Versuchsanlage nicht gemessen wird und stattdessen aus den aktuellen Ventilatorwerten abgeleitet wird, ist bei jedem durch die Regel 4 gefundenen Fehler, der Ventilator eine potenzielle Fehlerursache (Stellsignal kann nicht in Drehzahl umgesetzt werden oder Veränderung Radgeometrie).

Ein Fehler wird durch den Algorithmus erkannt, wenn sich die Volumenstromäquivalente länger als 20 min um mehr als 15% unterscheiden.

Überschreitet der Ist-Luftvolumenstrom $\dot{V}_{Vent,Äquivalent}$ den Sollwert $\dot{V}_{LK,Äquivalent}$, wird das Ergebnis der Gleichung (3-36) negativ und der Fehlerindikator der Regel soll den Wert MINUS EINS annehmen.

Unterschreitet der Ist-Luftvolumenstrom seinen Sollwert, ist das Ergebnis der Gleichung größer als NULL und der Indikator soll EINS betragen. Im fehlerfreien Fall soll der Indikator gleich NULL sein.

Das Verfahren ist in der Versuchsanlage für den Drehzahlbereich von 40% bis 90% der maximalen Ventilatorleistung geeignet. Die Kennlinie folgt außerhalb dieses Bereichs scheinbar nur schlecht dem Proportionalitätsgesetz des Ventilators.

Die Regel 4 soll angewendet werden, wenn kein potenzieller Fehler durch den Algorithmus der Regel 2 erkannt wird.

In Anhang A6-9 ist der Programmablaufplan und der kommentierte Quelltext in VBScript für den entwickelten Algorithmus der Regel 4 für die ZUL-Seite der RLT-Versuchsanlage zu finden.

Der vorgestellte Algorithmus für die Regel 4 wird anhand von Messdaten einiger Fehlerszenarien erprobt. In den Szenarien wurden Fehler in die Anlage implementiert und messtechnisch aufgezeichnet.

Im ersten Test soll eine Verengung des freien Strömungsquerschnitts auf der Druckseite des ZUL-Ventilators entdeckt werden. Der zu kleine freie Strömungsquerschnitt wird durch eine teilweise zugefahrene ZUL-Klappe hervorgerufen (Siehe Abbildung 3-35).

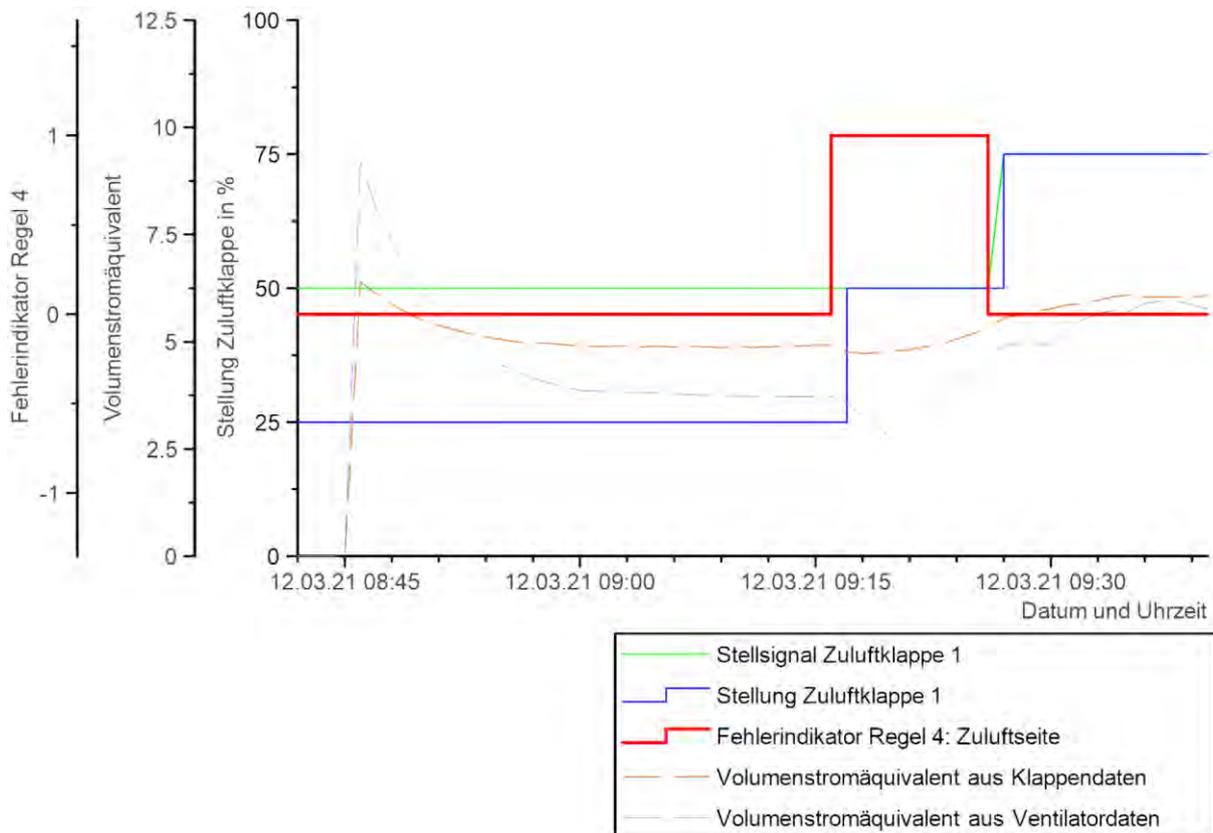


Abbildung 3-35: Anwendung Regel 4: ZUL-Klappe teilweise geschlossen

Die Anlage befindet sich im Lüftungsbetrieb und das Stellsignal der ZUL-Klappe 1 ist 50%. Jedoch ist die ZUL-Klappe durch einen Fehler nur zu 25% geöffnet. Da das Stellsignal der ZUL-Klappe konstant ist und der Druck vor der ZUL-Klappe annähernd konstant bleibt, ist auch das Volumenstromäquivalent aus diesen Daten nahezu konstant. Jedoch ist das Volumenstromäquivalent aus den ZUL-Ventilatoraten, auf einem kleineren Niveau. 09:16 wird der Fehler durch den Algorithmus entdeckt (Fehlerindikator gleich EINS), da das Volumenstromäquivalent aus den Klappendaten dann für 20min um 15% größer war, als das Volumenstromäquivalent aus den Ventilatoraten. 9:17 wird der Fehler behoben und ab 9:26 nimmt der Fehlerindikator den Wert NULL an.

Im nächsten Test der vierten Regel soll ein zu großer freier Strömungsquerschnitts auf der Druckseite des ZUL-Ventilators entdeckt werden. Der freie Strömungsquerschnitt wird durch eine zu weit aufgefahrene ZUL-Klappe hervorgerufen (Siehe Abbildung 3-36).

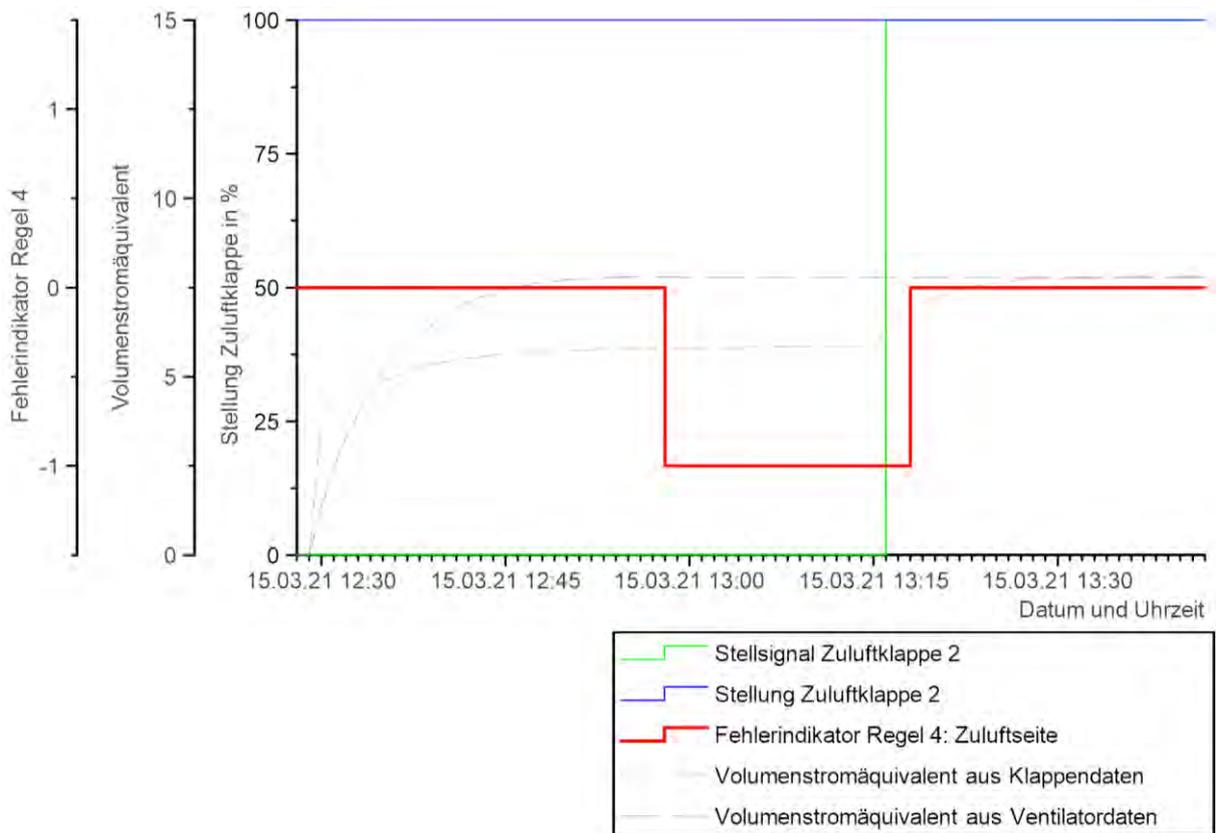


Abbildung 3-36: Anwendung Regel 4: ZUL-Klappe zu weit geöffnet

Die Anlage befindet sich ab 12:26 im Lüftungsbetrieb und das Stellsignal der ZUL-Klappe 2 beträgt 0%, jedoch ist diese Klappe durch einen Fehler komplett geöffnet. Das aus dem Klappenstellsignal und dem statischen Druck in der ZUL-Leistung berechnete Volumenstromäquivalent ist kleiner als das Äquivalent aus den Daten des Ventilators. Der Fehlerindikator nimmt ab 12:58 den Wert MINUS EINS an. Ab 13:16 befindet sich die Anlage in einem fehlerfreien Zustand, da das Stellsignal der Klappe 2 dann 100% beträgt. Der Algorithmus erkennt ab 13:18 keinen Fehler mehr.

Es folgen nun ein Test des Algorithmus auf der Abluftseite der RLT-Anlage, bei dem im Lüftungsbetrieb die Abluftklappe auf der Saugseite des Ventilators zu weit geöffnet ist (Abbildung 3-37).

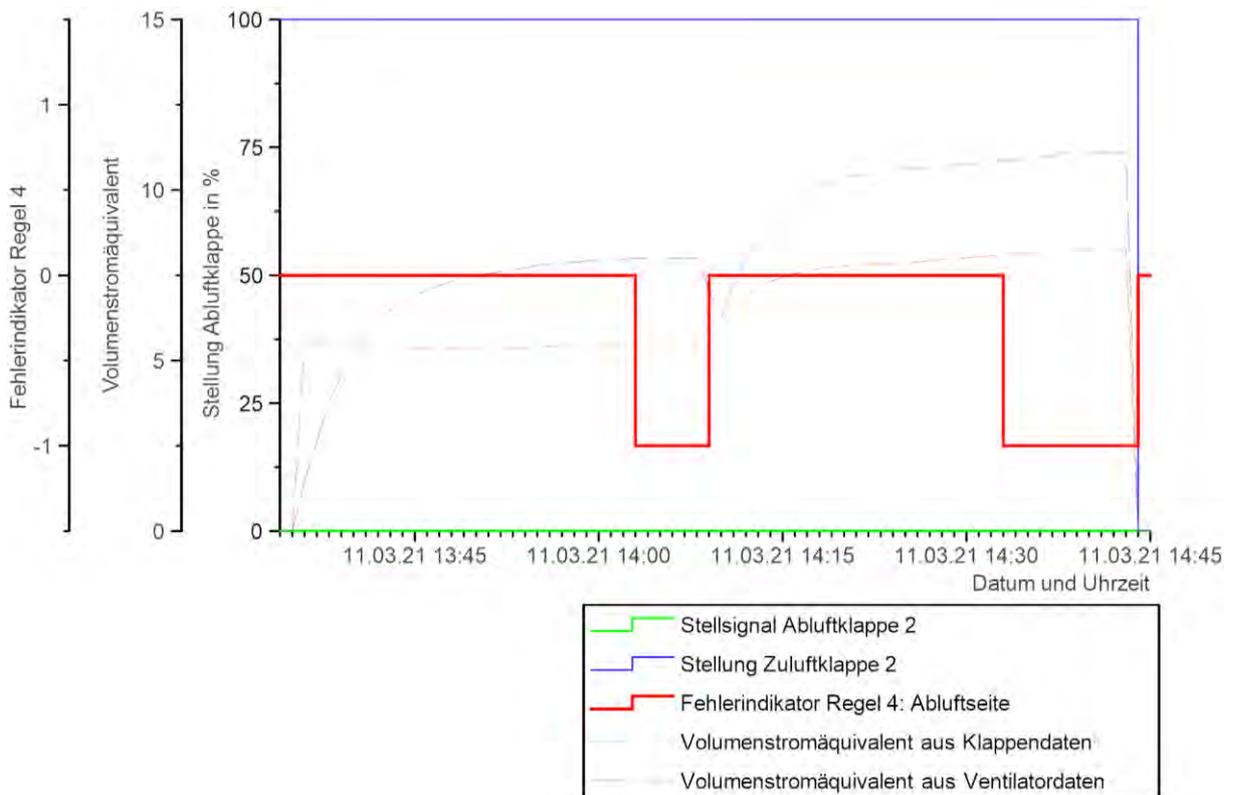


Abbildung 3-37: Anwendung Regel 4: ABL-Klappe im Lüftungsbetrieb zu weit geöffnet

Die Lüftungsanlage ist ab 13:32 im Lüftungsbetrieb. Das Stellsignal der Abluftklappe 2 beträgt 0% jedoch ist die Klappe zu 100% geöffnet. Das Volumenstromäquivalent aus den Klappendaten ist größer als das aus den Ventilator-daten. Der Fehler wird zuerst 14:03 durch den Algorithmus erkannt. 14:09 wurde in der Versuchsanlage das Stellsignal des Abluftventilators manuell von 50 auf 75% erhöht. Durch die Änderung der Druckverhältnisse näherten sich die Volumenstromäquivalente für kurze Zeit an, wodurch den Fehlerindikator wieder den Wert NULL annahm. Jedoch bleibt der Fehler der zu weit geöffneten Abluftklappe bestehen und die berechneten Volumenstromäquivalente unterscheiden sich, mit stabilisierten Druckverhältnissen, stärker voneinander. Daher nimmt ab 14:25 der Fehlerindikator ein weiteres Mal den Wert MINUS EINS an.

Der Algorithmus wurde ebenfalls an den Messdaten vom 13.01.2022 bis zum 11.03.2022 getestet. Immer wenn die RLT-Anlage aktiv war, wurde ein zu großer Luftvolumenstrom über die Ventilatoren detektiert, was bspw. für zu weit geöffnete Lüftungsklappen oder eine Luftleckage im System sprechen würde. Im Fall der angesprochenen Messreihe ist jedoch von einem Messfehler auszugehen, da der gemessene statische Druck in der Luftleitung höher als der Differenzdruck über den Ventilator ist. Eine abschließende Klärung fand bis Projektende nicht statt. Das vorgestellte Verfahren scheint funktionsfähig zu sein, sollte jedoch von künftigen Forschungsvorhaben weiter evaluiert werden.

3.7.7 Fehlererkennung durch Abgleich Betriebszustand der Luftherwärmungskomponente mit Luftherwärmungssequenz

Befindet sich die Versuchsanlage in einer Luftheizsequenz, in der die Außenluft durch eine Komponente nicht erwärmt werden soll, werden mit der fünften vorgestellten Regel die betreffenden Komponenten auf ihre Aktivität bzw. Inaktivität getestet. Dabei soll auf mehrere Bedingungen geprüft werden.

Prüfung deaktivierter Komponenten:

Die erste Bedingung (3-50) soll für einen fehlerfreien Anlagenzustand

$$T_{Komp.,Aus}(t) - T_{Komp.,Ein}(t) \leq \Delta T_{Komp.,GW} \quad (3-50)$$

lauten. Es sollte keine Temperaturerhöhung an einer deaktivierten Komponente stattfinden. Überschreitet die Differenz aus Austrittstemperatur $T_{Komp.,Aus}$ und Eintrittstemperatur $T_{Komp.,Ein}$ einen komponentenspezifischen Grenzwert $\Delta T_{Komp.,GW}$ soll auf zwei weitere Bedingungen geprüft werden.

Mit der Bedingung (3-51) wird geprüft, ob die Temperaturdifferenz vom aktuellen Zeitpunkt kleiner ist als die Differenz des vorherigen Zeitpunktes:

$$\begin{aligned} & (T_{Komp.,Aus}(t) - T_{Komp.,Ein}(t)) \\ & - (T_{Komp.,Aus}(t-1) - T_{Komp.,Ein}(t-1)) < \Delta \dot{T}_{Komp.,GW} \end{aligned} \quad (3-51)$$

Für die Prüfung muss die Mindeststeigung eines fehlerfreien Temperaturabfalls $\Delta \dot{T}_{Komp.,GW}$, über einen äquidistanten Zeitschritt, für die betrachteten Komponenten bestimmt werden.

Mit dieser zusätzlichen Bedingung wird berücksichtigt, dass zu Beginn der Prüfung einer Luftherwärmungskomponenten, die betrachtete Komponente noch eine Restwärme enthalten kann und dadurch die Luft erwärmt. Der Grad der Erwärmung muss jedoch über die Zeit abnehmen.

Werden gegen die Bedingungen aus (3-50) und (3-51) verstoßen soll von einem fehlerhaften Zustand ausgegangen werden.

Weiterhin soll mit der Bedingung (3-52) geprüft werden ob der komponentenspezifische Grenzwert $\Delta T_{Komp.,GW}$ um 50% überschritten wird:

$$T_{Komp.,Aus} - T_{Komp.,Ein} \leq 1,5 \cdot \Delta T_{Komp.,Grenz} \quad (3-52)$$

Wird die Bedingung (3-52) verletzt, soll von einem fehlerhaften Zustand ausgegangen werden.

Werden über einen Zeitraum von 15min (empirisch ermittelt) die Bedingungen für einen fehlerfreien Zustand der Komponenten verletzt, soll ein Fehlerindikator den Wert MINUS

EINS annehmen (Komponente aktiv, obwohl sie ausgeschaltet sein sollte). Eine Diagnose kann erst durch weitere komponentenspezifische Regeln erfolgen.

Prüfung aktivierter Komponenten:

Die vorgestellten Bedingungen (3-50) bis (3-52) werden nun so angepasst, dass geprüft werden kann, ob eine Lufterwärmungskomponente aktiv ist, wenn dies die Luftheizsequenz erfordert.

Mit der Bedingung (3-53) wird geprüft, ob die Temperaturdifferenz zwischen Aus- und Eintrittstemperatur der untersuchten Komponente größer ist als ihr komponentenspezifischer Grenzwert der Temperaturdifferenz.

$$T_{Komp.,Aus}(t) - T_{Komp.,Ein}(t) \geq \Delta T_{Komp.,GW} \quad (3-53)$$

Wird gegen Bedingung (3-53) verstoßen, kann mit Bedingung (3-54) geprüft werden, ob die Temperaturdifferenz über die Zeit ansteigt:

$$\begin{aligned} & \left(T_{Komp.,Aus}(t) - T_{Komp.,Ein}(t) \right) \\ & - \left(T_{Komp.,Aus}(t-1) - T_{Komp.,Ein}(t-1) \right) > \Delta \dot{T}_{Komp.,GW} \end{aligned} \quad (3-54)$$

Wird gegen die Bedingungen (3-53) und (3-54) verstoßen, wird von einem fehlerhaften Zustand ausgegangen.

Weiterhin soll mit der Bedingung (3-55) geprüft werden, ob der komponentenspezifische Grenzwert $\Delta T_{Komp.,GW}$ um 50% unterschritten wird:

$$T_{Komp.,Aus} - T_{Komp.,Ein} \leq 0,5 \cdot \Delta T_{Komp.,GW} \quad (3-55)$$

Wird die Bedingung (3-55) verletzt, soll von einem fehlerhaften Zustand ausgegangen werden.

Kann, über einen Zeitraum von 15min, mit den Bedingungen (3-53) bis (3-55) von einem fehlerhaften Zustand ausgegangen werden, soll der Fehlerindikator der Regel 5 den Wert EINS annehmen (Komponente aus, obwohl sie eingeschaltet sein sollte).

In Tabelle 3-12 wird aufgeführt, in welcher Luftheizsequenz welche Komponente durch welche Bedingungen getestet werden soll. Die untersuchten Komponenten sind die Kreuzstrom-WRG, Mischluftkammer und der Luftherhitzer.

Tabelle 3-12: Anwendung Bedingungen der Regel 5 in Abhängigkeit von Regelsequenz und Komponente

RS_{HZG}	Kreuzstrom-WRG	Mischluftkammer	Luftherhitzer
0	(3-50) (3-51) (3-52)	(3-50) (3-51) (3-52)	(3-50) (3-51) (3-52)
1	(3-53) (3-54) (3-55)	(3-50) (3-51) (3-52)	(3-50) (3-51) (3-52)
2	(3-53) (3-54) (3-55)	(3-53) (3-54) (3-55)	(3-50) (3-51) (3-52)
3	(3-53) (3-54) (3-55)	(3-53) (3-54) (3-55)	(3-53) (3-54) (3-55)

Die genutzten komponentenspezifischen Grenzwerte der Temperaturdifferenz $\Delta T_{Komp.,GW}$ und der Temperaturänderung über die Zeit $\Delta \dot{T}_{Komp.,GW}$ sind in Tabelle 3-13 festgelegt.

Tabelle 3-13: Komponentenspezifische Grenzwerte zu Fehlererkennung mit Regel 5

	Kreuzstrom-WRG	Mischluftkammer	Luftherhitzer
$\Delta T_{Komp.,GW}$	1,7K	1,7K	2,8K
$\Delta \dot{T}_{Komp.,GW}$	0K	0K	0K

Die Grenzwerte für die Temperaturdifferenz, zwischen Aus- und Eintrittstemperatur der Komponente, $\Delta T_{Komp.,GW}$ wurden aus [House 2001] genutzt. Der Grenzwert für die Kreuzstrom-WRG und Mischluftkammer berücksichtigt dabei lediglich Fehler der Temperaturmessung. Im Grenzwert für den Luftherhitzer muss anlagenbedingt eine Temperaturerhöhung durch den Ventilator berücksichtigt werden. In [House 2001] werden für die Temperaturerhöhung über einen Ventilator 1,1K genutzt. Weitere Richtwerte für die Temperaturerhöhungen über Ventilatoren können bspw. nach [Recknagel, Kapitel 3.3-1.4] abgeleitet werden.

Als Grenzwert für die Temperaturänderung der Temperaturdifferenz $\Delta \dot{T}_{Komp.,GW}$ wurde 0K gewählt, da lediglich sichergestellt werden soll, dass, nach Verletzung der Bedingung (3-50) oder (3-53), die Temperaturdifferenz abfällt bzw. steigt.

In Anhang A6-10 ist der Programmablaufplan und kommentierte Quelltext des zur Regel 5 entworfenen Algorithmus zu finden.

Der Algorithmus wurde an RLT-Messdaten des Monats März 2021 erprobt. Die WRG funktioniert fehlerfrei.

An der Mischluftkammer wird häufig ein Temperaturhub zwischen Außenluftseitigen Ein- und Auslass verzeichnet, obwohl die Umluftklappe geschlossen sein soll. Ein Beispiel hierfür ist in Abbildung 3-38 zu sehen.

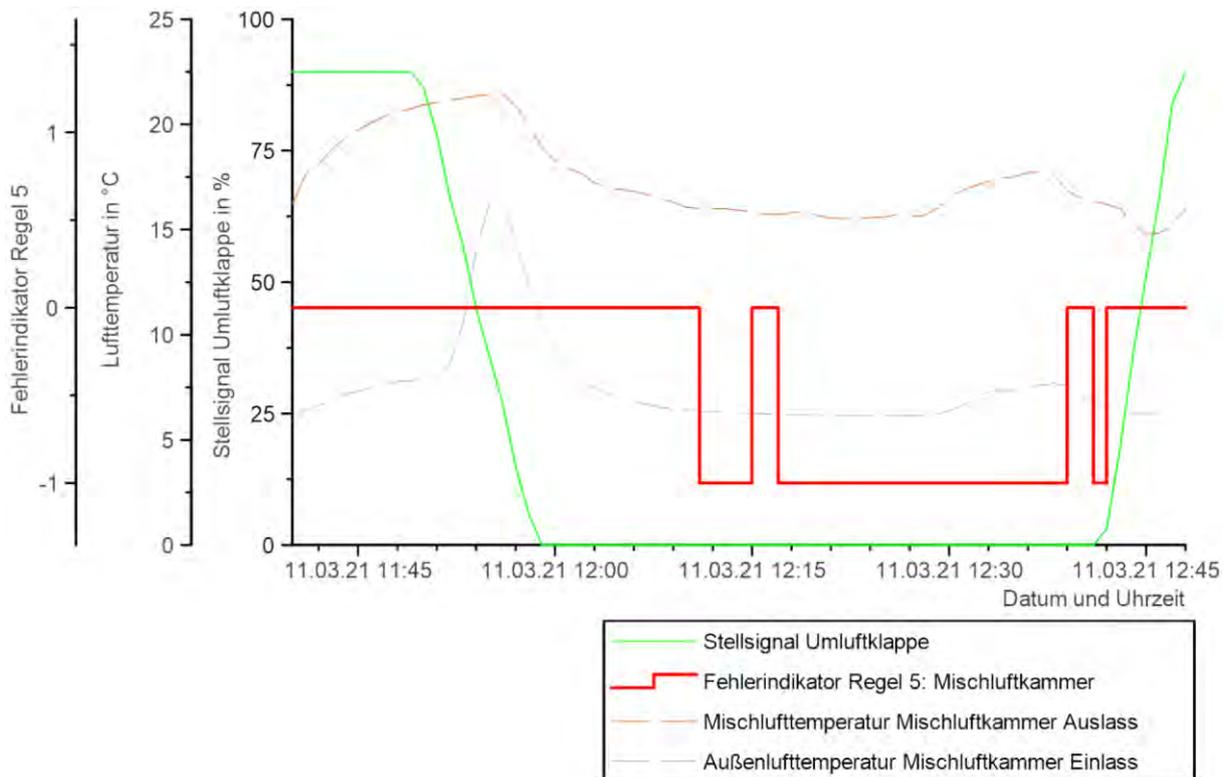


Abbildung 3-38: Anwendung Regel 5: Mischluftkammer ist nicht deaktiviert

Bis 11:59 befindet sich die Versuchsanlage in der Lufterwärmungssequenz 3 und 2 (Umluftklappe geöffnet). Bis 11:52 beträgt die außenluftseitige Temperaturerhöhung ca. 12K. Danach soll sich die Umluftklappe schließen und ab 11:59 beträgt das zugehörige Stellsignal 0%. Während des Zufahrens der Umluftklappe steigt die Außenlufteinlasstemperatur kurzzeitig um bis zu 8K – die Ursache ist unklar. In der Versuchsanlage liegt nun die Lufterwärmungssequenz 1 (nur WRG) vor. Jedoch wird weiterhin ein außenluftseitige Temperaturhub von ca. 10K gemessen. Von 12:11 bis 12:14 wird dieser Fehler erkannt (Fehlerindikator gleich EINS). 12:15 wurde die Lufterwärmung der Versuchsanlage komplett deaktiviert (Lufterwärmungssequenz NULL), was eine 2-minütige Deaktivierung der Fehlererkennung bewirkte. Ab 12:17 wird der Fehler der Mischluftkammer jedoch erneut erkannt. 12:39 wird die Lufterwärmung wieder aktiviert. Ab 12:42 steigt das Stellsignal der Umluftklappe an (Lufterwärmungssequenz 2), worauf durch die Regel 5 kein Fehler an der Mischluftkammer erkannt wird, da sie für diese Regelsequenz, im Sinne der Regel 5, fehlerfrei funktioniert. Als Fehlerursache wurden nicht kalibrierte Temperatursensoren vermutet.

Ein weiterer in der Versuchsanlage gefundener Fehler betrifft den Lufterhitzer (Abbildung 3-39).

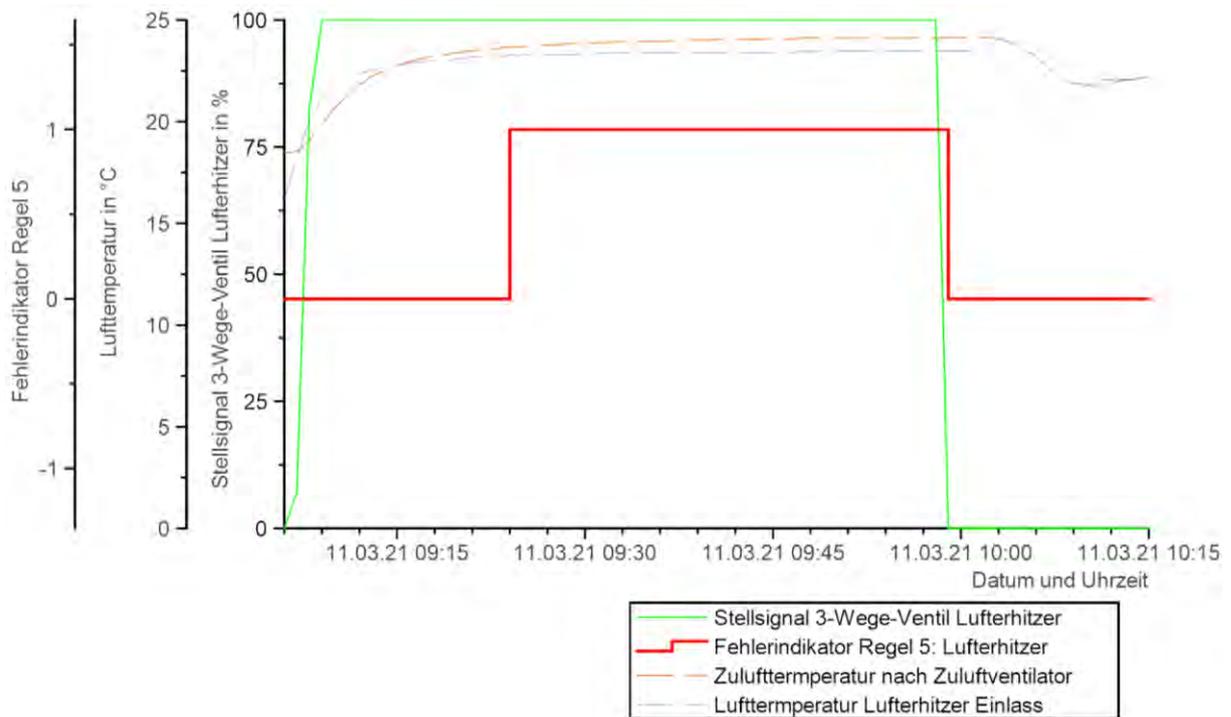


Abbildung 3-39: Anwendung Regel 5: Lufterhitzer ist nicht aktiviert

Ab 9:06 wird in der RLT-Versuchsanlage die Lufterwärmungssequenz 3 aktiv (Lufterwärmung mit Lufterhitzer). Das 3-Wege-Ventil-Stellsignal des Lufterhitzerheizkreises steigt daraufhin bis 09:06 bis auf 100% an. Jedoch konnte im Anschluss bis 9:24 keine nennenswerte Lufttemperaturdifferenz, zwischen Einlass des Lufterhitzers und Druckseite des Zuluftventilators, festgestellt werden. Die gemessene Temperaturdifferenz von ca. 1,4K kann dem Zuluftventilator und Messfehlern zugeschrieben werden. Der Fehlerindikator nimmt daher den Wert EINS an. Ab 9:59 wurde die Lufterwärmungssequenz 3 deaktiviert und das Stellsignal des 3-Wege-Ventils nimmt den Wert 0% an. Die Fehlererkennung durch Regel 5 erkennt nun keinen Fehler am Lufterhitzer mehr.

Nach dem Test an Messdaten vom März 2021 wurden die Temperatursensoren der RLT-Anlage kalibriert. Es erfolgte ein weiterer Test des Algorithmus an Messdaten vom 13.01.2022 bis 11.03.2022.

An allen Komponenten der Lufterwärmung konnten Fehler festgestellt werden. Es sollten die Grenzwerte und Betrachtungszeiten des Algorithmus überprüft werden. Es besteht weiterer Forschungsbedarf.

Jedoch muss auch die RLT-Anlage auch auf Defizite untersucht werden. So steigt bspw. die gemessene außenluftseitige Eintrittstemperatur der Mischluftkammer stark an sobald die Umluftbeimischung aktiv wird. Daher ist die berechnete Temperaturdifferenz zwischen außenluftseitigen Ein- und Austritt der Mischluftkammer sehr gering, was dann

zur Anzeige eines Fehlers führt. Die Position des Temperatursensors sollte geprüft werden.

3.7.8 Fehlererkennung durch Prüfung der Zulufttemperatur

Mit der sechsten vorgestellten Regel wird geprüft, ob der Sollwert der Zulufttemperatur in der Zuluftleitung nach dem Zuluftventilator eingehalten wird. Ist die Bedingung (3-56) erfüllt soll von einem fehlerfreien Zustand der Zulufttemperatur ausgegangen werden.

$$T_{ZUL,soll} - T_{ZUL} = \pm e_{ZUL,GW} \quad (3-56)$$

Die zulässige Regeldifferenz $e_{ZUL,GW}$, der gemessenen Zulufttemperatur zum Sollwert der Zulufttemperatur, soll 1K betragen.

Zuluft zu warm:

Unterschreitet sich die berechnete Regeldifferenz um mehr als 50% von $e_{ZUL,GW}$, soll von einem fehlerhaften Anlagenzustand ausgegangen werden (Zuluft zu warm). Dies ist der Fall, wenn die Bedingung (3-57) erfüllt wird.

$$T_{ZUL,soll} - T_{ZUL} < -1,5 \cdot e_{ZUL,GW} \quad (3-57)$$

Ist die Differenz, aus gemessener Zulufttemperatur und deren Sollwert, im Bereich von $(-1,5 \dots -1) \cdot e_{ZUL,GW}$ soll die Änderung der Zulufttemperatur untersucht werden. Diese sollte im betrachteten Bereich über die Zeit kälter werden und sich so dem Sollwert annähern. Dieses Verhalten kann durch die Bedingung (3-58) beschrieben werden, welche einen fehlerfreien Anlagenzustand (im Bereich von $(-1,5 \dots -1) \cdot e_{ZUL,GW}$) darstellt.

$$(T_{ZUL,soll}(t) - T_{ZUL}(t)) - (T_{ZUL,soll}(t-1) - T_{ZUL}(t-1)) > \Delta\dot{T}_{ZUL,GW} \quad (3-58)$$

Um festzustellen, ob die Zulufttemperatur mit der Zeit sinkt ist die Änderung der Zulufttemperatur mit $\Delta\dot{T}_{Komp.,GW} = 0K/min$ festgelegt.

Zuluft zu kalt:

Überschreitet die berechnete Regeldifferenz um mehr als 50% $e_{ZUL,GW}$, soll von einem fehlerhaft zu kalten Zulufttemperaturzustand ausgegangen werden. Dies ist der Fall, wenn die Bedingung (3-59) erfüllt wird.

$$T_{ZUL,soll} - T_{ZUL} > 1,5 \cdot e_{ZUL,GW} \quad (3-59)$$

Liegt die Regeldifferenz im Bereich von $(1 \dots 1,5) \cdot e_{ZUL,GW}$ soll wieder die Temperaturänderung der Zuluft untersucht werden. Ist die Bedingung (3-60) (im

betrachteten Bereich von $(1 \dots 1,5) \cdot e_{ZUL,GW}$ erfüllt, wird die Zuluft wärmer und es soll von einem fehlerfreien Zustand ausgegangen werden.

$$\begin{aligned} & (T_{ZUL,soll}(t) - T_{ZUL}(t)) - (T_{ZUL,soll}(t-1) - T_{ZUL}(t-1)) \\ & < \Delta \dot{T}_{Komp.,GW} \end{aligned} \quad (3-60)$$

In der Regelsequenzen 1 bis 3 der Luftheizung werden die Bedingungen (3-56) bis (3-60) angewendet. Diese Bedingungen werden in Abbildung 3-40 zur Illustration auf beispielhafte Temperaturverläufe angewendet.

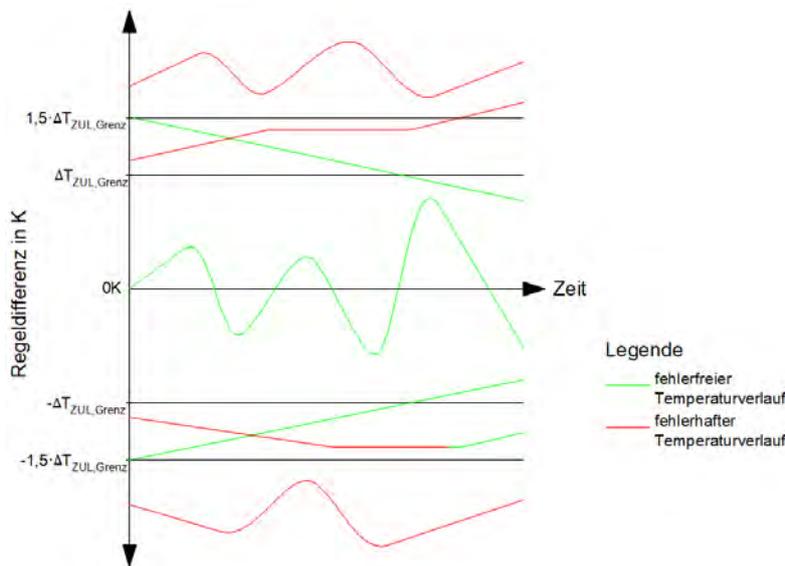


Abbildung 3-40: Anwendungen Bedingungen zur Prüfung der Zulufttemperatur auf Beispielhafte Temperaturverläufe

In der Regelsequenz 0 der Luftheizung wird lediglich überprüft, ob die Soll-Zulufttemperatur durch die gemessene Zulufttemperatur unterschritten wird.

Werden durch die, in der jeweiligen Regelsequenz zur Anwendung kommenden, Bedingungen für eine Dauer von 25min (empirische Festlegung) fehlerhafte Anlagenzustände erkannt, soll ein Fehler durch einen Indikator kenntlich gemacht werden. Erfolgt ein Wechsel der Luftheiz-Regelsequenzen wird die Bestimmung der Dauer eines fehlerhaften Zustands von neuem begonnen, um die aktuell ablaufende Sequenz bewerten zu können.

Bei einer Temperaturüberschreitung, in den Luftheiz-Regelsequenzen 1 bis 3, nimmt der Fehlerindikator den Wert MINUS EINS an ($T_{ZUL,soll} - T_{ZUL}$ hat ein negatives Ergebnis).

Bei einer Temperaturunterschreitung ($T_{ZUL,soll} - T_{ZUL}$ hat ein positives Ergebnis) nimmt der Fehlerindikator, in den Luftheiz-Regelsequenzen 1 bis 3, den Wert EINS an. Tritt die Unterschreitung in der Luftheiz-Regelsequenzen 0 – keine Lufteerwärmung – auf, soll der Fehlerindikator den Wert ZWEI annehmen. Dieser letzte Fall würde einen

regelungstechnischen Fehler entsprechen, da eine Luftheizsequenz (1 bis 3) angefordert werden müsste.

Das Vorgehen des Algorithmus der sechsten Regel ist als Programmablaufplan und kommentierter Quelltext in VBScript in Anhang A6-11 zu finden.

Der Algorithmus der Regel 6 wurde an Messdaten der Versuchsanlage des Monats März 2021 getestet.

Im ersten Fall wird eine Unterschreitung der Soll-Zulufttemperatur erkannt (siehe Abbildung 3-41).

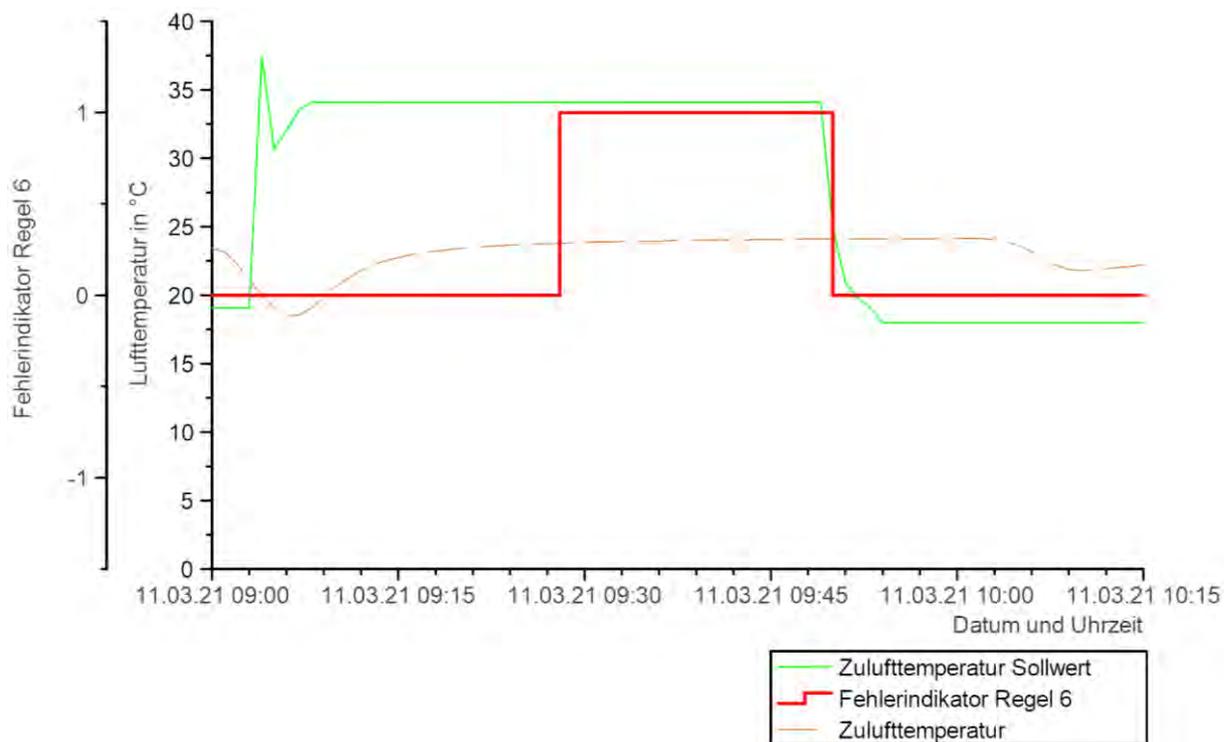


Abbildung 3-41: Anwendung Regel 6: Zulufttemperatur zu kalt

Kurz nach 9:00 Uhr wurde die Soll-Zulufttemperatur auf 34°C erhöht. In der Versuchsanlage wurde daraufhin die Lufterwärmungssequenz 3 aktiviert. Jedoch konnte mit Unterstützung des Lufterhitzers die angestrebte Soll-Temperatur nicht erreicht werden. Der Fehler wird ab 9:28 durch den Algorithmus der Regel 6 erkannt (Fehlerindikator gleich EINS). In diesem Zeitraum fällt auch der Fehler des Lufterhitzers aus Abbildung 3-39 auf Seite 157. Ab 9:50 nimmt der Fehlerindikator den Wert NULL an, da der Sollwert der Zulufttemperatur auf 18°C abgesenkt wird und kurz darauf die RLT ausgeschaltet wurde.

Im nächsten vorgestellten Fehlerfall wird die Soll-Zulufttemperatur überschritten (siehe Abbildung 3-42).

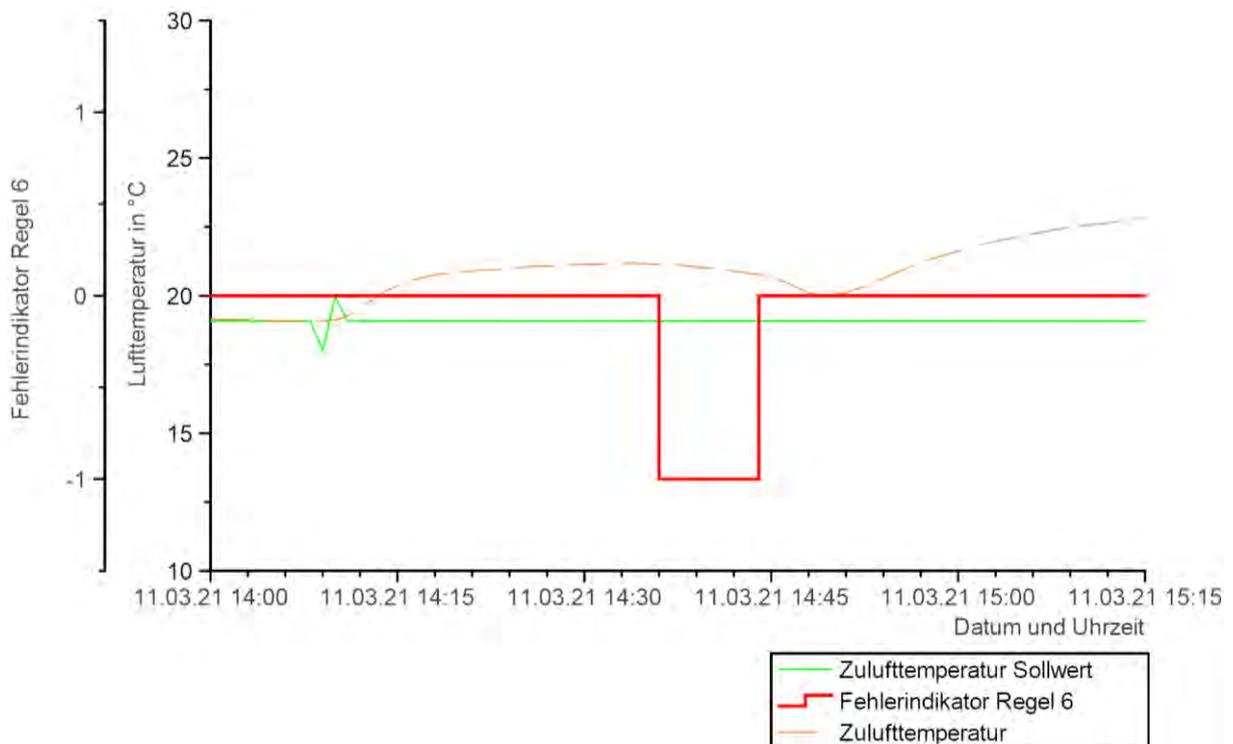


Abbildung 3-42: Anwendung Regel 6: Zulufttemperatur zu warm

Die Soll-Zulufttemperatur beträgt ca. 19°C. Im Zeitraum von 14:08 bis 14:20 fährt die Umluftklappe der Mischluftkammer zu, jedoch erhöht sich dabei die Zulufttemperatur von 19 auf 21°C. Die zu hohe Zulufttemperatur wird 14:36 durch den Algorithmus erkannt (Fehlerindikator gleich MINUS EINS). Zeitgleich wird in der Anlage auch eine Lufterwärmung durch die Mischluftkammer registriert, obwohl diese deaktiviert sein sollte (nicht in Abbildung 3-42 dargestellt). Mit Beendigung des Lüftungsbetriebs 14:44 nimmt der Fehlerindikator den Wert NULL an.

Weiterhin wurde der Algorithmus zur Prüfung der Zulufttemperatur an den Messdaten vom 13.01.2022 bis zum 11.03.2022 getestet. Dabei konnten einige Anlagenfehler entdeckt werden.

In der Regelsequenz 1 der Luftheizung (nur WRG) wurde manchmal eine zu warme Zulufttemperatur festgestellt. Das Stellsignal der WRG betrug zur Zeit des Fehlers 100%. Es hätte jedoch verringert werden müssen, um die Soll-Zulufttemperatur einhalten zu können. Der Fehler ist regelungstechnischer Natur.

4 Implementierung und Evaluierung der FED-Algorithmen

4.1 Versuchsreihen und FED für Kältetechnik

Die automatisierte Fehlererkennung auf FMEA-Basis sollte im Bereich der gebäudetechnischen Kälteerzeugung an einem bestehenden Kältesystem angewendet werden. Derzeit sind im Gebäudeenergiebereich viele Anlagensysteme für die Kältemittel R410A und R407C ausgelegt. Durch die in der F-Gase Verordnung (EU-Verordnung 517/2014) vorgeschriebenen Rahmenbedingungen sind diese Kältemittel mit einem GWP > 750 ab 2025 nicht mehr zulässig. Um zukunftsfähige Aussagen bezüglich des Betriebsverhaltens und des Fehlerverhaltens treffen zu können, war es notwendig ein zukunftsorientiertes System auszuwählen. Im Wohngebäudebereich hat vor allem bei Wärmepumpen das natürliche Kältemittel R 290 (Propan) aktuell eine sehr hohe Marktdurchdringung. Daher wurde als zukunftsorientiertes Kältemittel R 290 für die Untersuchungen ausgewählt und speziell für die Untersuchungen in dem Forschungsprojekt angeschafft. Aus der Brennbarkeit von R 290 ergeben sich jedoch aus dem Arbeitsschutzgesetz (§5, ArbSchG) erhöhte Anforderungen, sodass eine Aufstellung der Außeneinheit der Anlage im Klimalabor nicht zulässig ist. Aus diesem Grund wurde für die Untersuchungen ein temporärer Aufbau geschaffen, bei dem die Außeneinheit im Außenbereich und die Inneneinheit im Laborgebäude installiert wird.

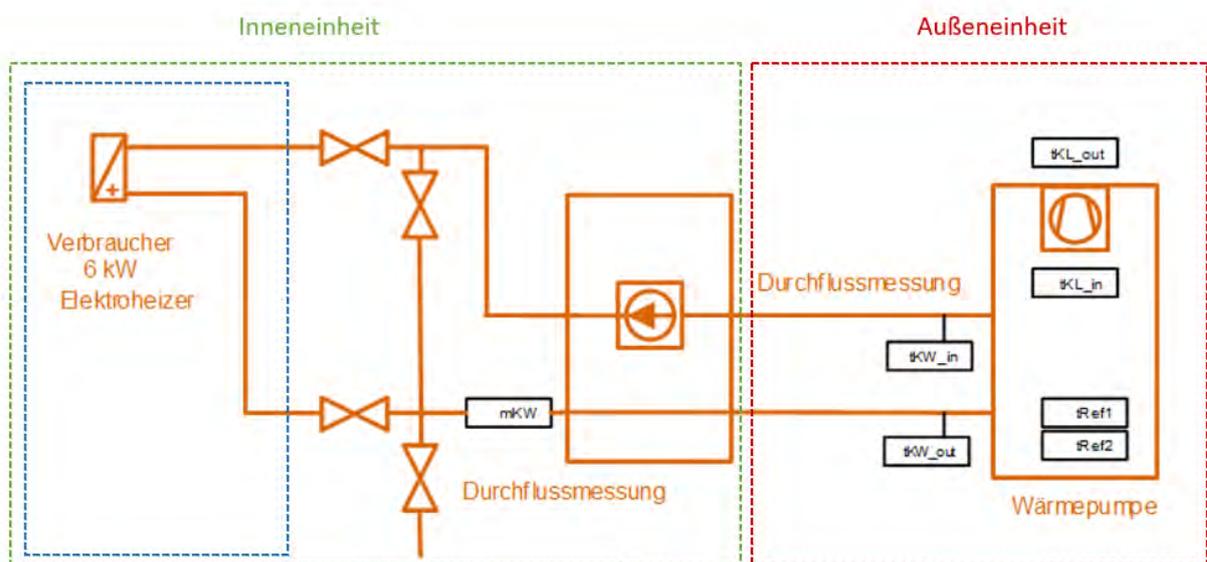


Abbildung 4-1: Schematische Darstellung des Aufbaus des Kältesystems

Dabei wird für die durchzuführenden Versuche die Kühllast durch einen elektronisch geregelten Elektroheizer simuliert. Der Vorteil für die Untersuchungen liegt darin, dass Lastprofile durch die Software vorgegeben werden können und so ein effizienter Versuchsbetrieb möglich ist. Die eingekoppelte Kühlleistung entspricht der gemessenen elektrischen Leistungsaufnahme. Dadurch wird die Bilanzierung der Energieströme

möglich und es kann eine Validierung der Messdaten und der Zustandswerte auf Basis des thermodynamischen Prozessverlauf erfolgen.

Tabelle 4-1: Technische Daten des verwendeten Systems

Hersteller	WOLF GmbH - Mainburg
Typenbezeichnung	CHA-Monoblock-07/400V
COP (A2/W35)	bis 4,65
Thermische Leistung	6 kW
Schalldruckpegel	< 35 dB(A) 5 m
Kältemittel	R290 (Propan)



Abbildung 4-2: Foto der Inneneinheit des Kältesystems mit Messtechnikausstattung



Abbildung 4-3: Foto der Außeneinheit des Kältesystems mit Sensorik

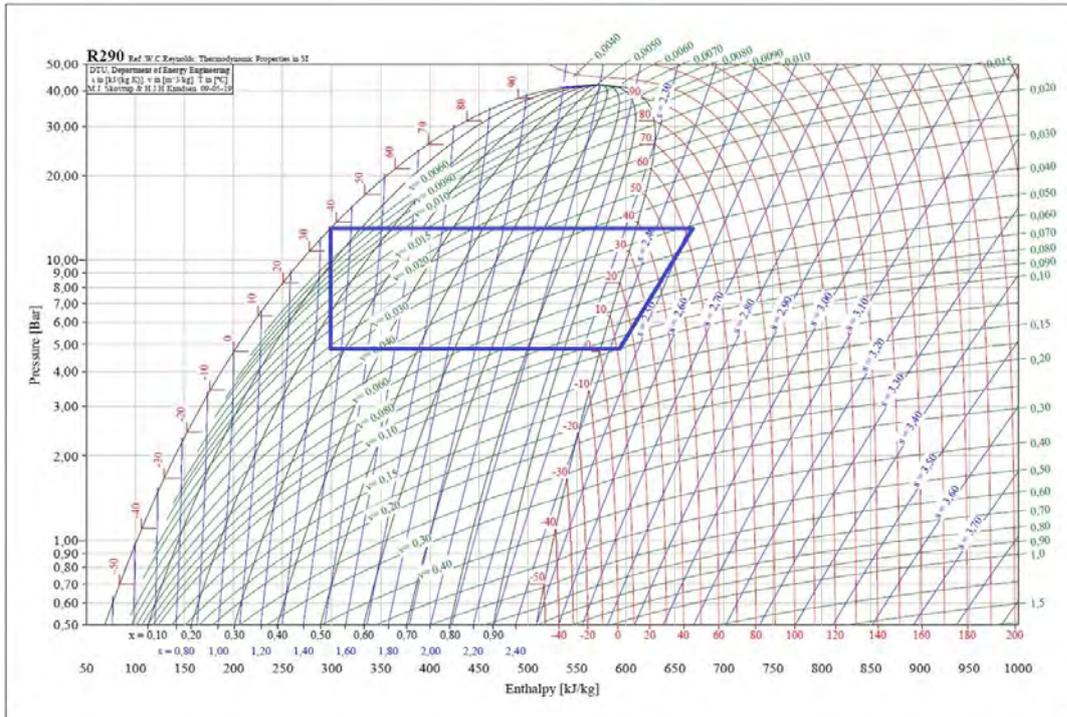
Primäres Ziel ist es, Anlagenfehler mit einer geringen Entdeckungswahrscheinlichkeit mit einem möglichst geringen Aufwand festzustellen. Erfahrungen aus dem Monitoring von Kälteanlagen zeigen, dass die Fehlererkennung oft eine sehr hohe messtechnische Ausstattung erfordert. Der Lösungsansatz hier ist daher, thermodynamische Plausibilitätskriterien für die Bewertung der Messgrößen zu benutzen, um somit den Kälteprozess nachzubilden und dadurch mit wenigen Messdaten Aussagen zu treffen. In der Tabelle 4-2 ist die Sensorausstattung der Modellanlagen für verschiedene Konfigurationen aufgeführt. Es hat sich gezeigt, dass die prozessgestützte Fehleranalyse des Kälteprozess mit der in Prio. A aufgeführten Sensorausstattung gut möglich ist.

Tabelle 4-2: Sensorausstattung der Modellanlage Kältetechnik

Nr.	Beschreibung	Sensortyp	Anbindung	Prio. A	Prio. B	Prio. C	DAQ
1.	Ansaugtemperatur	Pt100	4-Leiter	x	x	x	KL3222
2.	Rel. Luftfeuchte Ansaugung	Vaisala	0..5 V			x	
3.	Kühlluft Austritt 1	Pt100	4-Leiter	x	x	x	KL3222
4.	Kühlluft Austritt 2	Pt100	4-Leiter		x	x	
5.	Kühlluft Austritt 3	Pt100	4-Leiter		x	x	
6.	Kühlluft Austritt 4	Pt100	4-Leiter		x	x	
7.	Verdampfungstemperatur	Pt100	4-Leiter	x	x	x	KL3222
8.	Verdampfungsdruck	Keller	4..20 mA		x	x	
9.	Austritt Verflüssiger	Pt100	4-Leiter	x	x	x	KL3222
10.	Elektrische Leistungsaufnahme Außeneinheit	MZ	0..10 V		x	x	
11.	Eintrittstemperatur Kühlwasser	Pt100	4-Leiter	x	x	x	KL3152
12.	Austrittstemperatur Kühlwasser	Pt100	4-Leiter	x	x	x	KL3222
13.	Volumenstrom Kühlwasser	MID	4..20 mA	x	x	x	KL3152
14.	Leistung Elektroheizer	MZ	4..20 mA	-	-	-	
15.	Systemdruck	Keller	4..20 mA	x	x	x	KL3152
16.	Druckdifferenz Ventilator	Ashcroft	4..20 mA		x	x	
17.	Drehzahl Ventilator	Ashcroft	4..20 mA		x	x	
18.	Barometrischer Luftdruck	Vaisala	0..5 V			x	

(x Sensor ist installiert)

Tabelle 4-3: Kälteprozess der Anlage im Log p-h Diagramm für einen Betriebszustand



4.2 Implementierung in LabView

Zur Erprobung wurde, wie bereits im Musterhaus, ein Beckhoff-Messsystem mit der Software ViciOne des Projektpartners ifm installiert. Mit dem die Messdaten zur Erstellung der Algorithmen gesammelt wurden. Erwartungsgemäß zeigte sich, dass die Implementierung und Erprobung der Algorithmen eine sehr enge Verzahnung zwischen Versuchsbetrieb und Softwareanpassung erfordert. Als eine besondere Herausforderung erwies sich bei der praktischen Erprobung die Fehleranalyse bei mehreren gleichzeitig auftretenden Fehlerzuständen. Dieser Zustand ist gegeben, wenn Fehler mit einer niedrigen Priorität (die noch zu keiner Alarmierung führen) von einem Fehler mit hoher Priorität überlagert werden. Vor allem durch die pandemiebedingten Einschränkungen im Jahr 2020 war diesbezüglich ein gemeinsamer Versuchsbetrieb mit einer empirischen Softwareadaption nur bedingt bzw. mit höherem Aufwand möglich. Eine höhere Flexibilität zur Erprobung verschiedenster Lösungsansätze der Algorithmen war aus Sicht der Bearbeiter durch eine parallele Erstellung einer Softwareumgebung in LabView gegeben. Aus diesem Grund wurde zusätzlich eine Erprobungssoftware erstellt, mit der durch den Bearbeiter eine äußerst effiziente Anpassung und Erprobung der Algorithmen sowie eine zusätzliche Integration von Abhängigkeitsbedingungen möglich wurde.

Erwartungsgemäß zeigte sich, dass die Wärmepumpe im normalen Anlagenbetrieb im Betrachtungszeitraum stabil lief. Eine effiziente Anpassung der Algorithmen und damit Erprobung des Systems war durch die Verwendung der Softwareumgebung in LabView

möglich um dann betriebstypische Fehler zu analysieren, mit der entsprechende Fehlerpriorität zu bewerten und dem Nutzer zu signalisieren.

Tabelle 4-4: Visualisierungsoberfläche der Erprobungssoftware in LabView

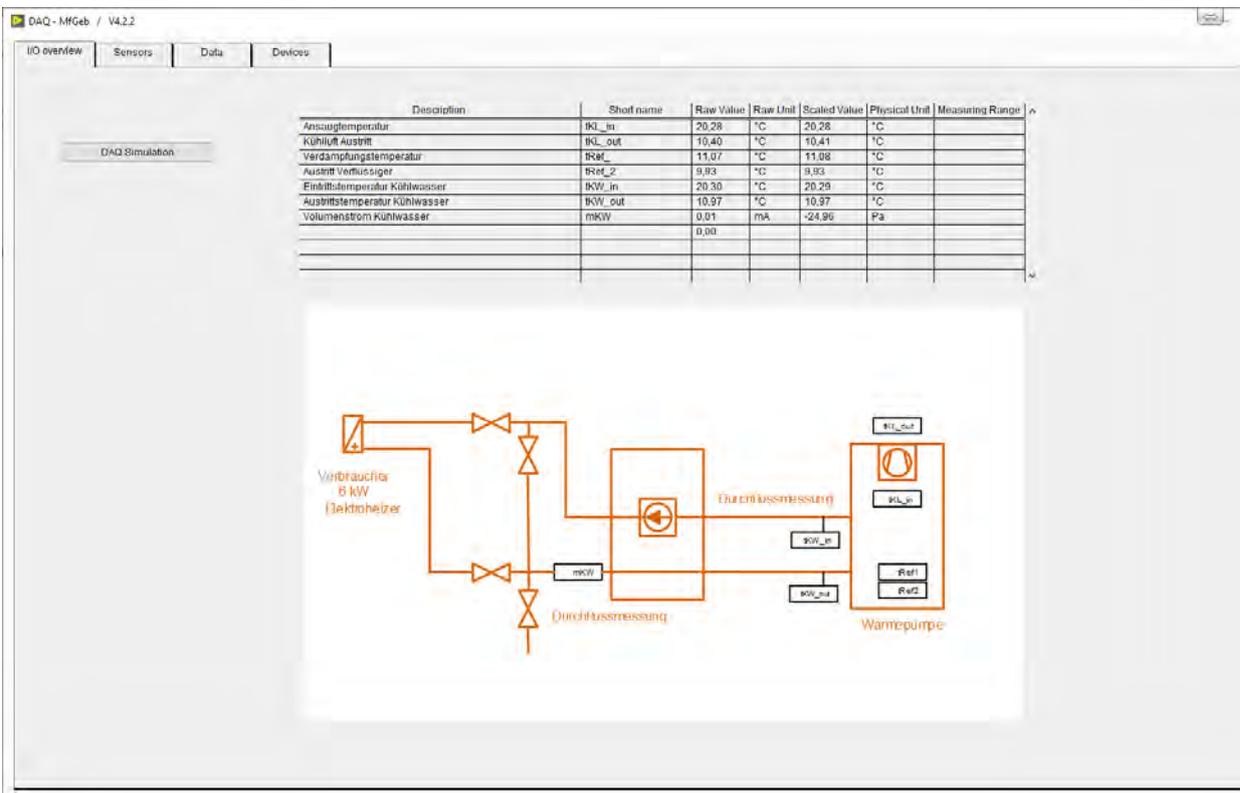


Tabelle 4-5: Meldungen aus der Software zur Erprobung der Algorithmen zur Fehlererkennung und Bewertung

Datum	Störungsbeschreibung	Handlung	Priorität
25.05.2021 08:36	Außeneinheit zu hohe Rückkühltemperatur	- Reinigung Außenlufteinheit / Funktions - Funktion Kühlluftventilator prüfen	5
25.05.2021 10:14	Inneneinheit geringe Temperaturspreizung	- Abnahme bzw. Notwendigkeit des Betriebs prüfen	5
25.05.2021 11:03	Außeneinheit Kritische Kühllüfttemperatur	- Prüfung auf wiederangesaugte Kühlluft - Aufstellungsort des Rückkühlers prüfen	8
25.05.2021 14:17	Inneneinheit Intermetierender Betrieb	- Funktion der Reglereinstellungen prüfen	8
26.05.2021 08:12	unidentifizierbare Störung	- Sicherheitsfunktionen des Gerätes prüfen	10
26.05.2021 09:26	unerwarteter Wechsel zwischen Kühl- und Heizbetrieb	- Reglerfunktionen der Raumklimageräte prüfen - Fenster schließen	2
26.05.2021 10:23	unplausibel hohe Lastanforderung	- Einstellung der Vorlauftemperatur prüfen - Temperatursensoren prüfen (Sonneneinstrahlung)	2
26.05.2021 15:28	Außeneinheit zu hohe Rückkühltemperatur	- Reinigung Außenlufteinheit / Funktions - Funktion Kühlluftventilator prüfen	5

Bedeutung der Fehlerpriorität:

- Kategorie 1 - 3 Fehler mit geringer Relevanz (beachtung bei der nächsten turnusmäßigen
- Kategorie 4 - 6 relevanter Fehler, eine Abnalyse wird empfohlen
- Kategorie 7 - 9 schwerer Fehler, Wartung / Servicetechniker wird benötigt
- Kategorie 10 Havearie - Anlage nicht funktionsbereit

Gefördert durch:
 Bundesministerium für Wirtschaft und Energie
 aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

Es erweist sich, dass die im Rahmen der Laborerprobung erstellten Softwarebausteine für die Verwendung in Regelungssystemen für Gebäude geeignet sind.

4.3 Automationsplattform ViciOne (IFM)

4.3.1 Vorgehen im Projekt

Zu Beginn des Projektes galt es, alle relevanten Datenübertragungswege aufzuführen und zu bewerten, um einen reibungslosen Datenaustausch zu gewährleisten.

Im Rahmen des Projektes wurden folgende etablierte Machine-to-Machine Interfaces näher betrachtet:

- SQL-Server: Structured Query Language
- OPC UA: Open Platform Communications Unified Architecture
- XML/SOAP: Simple Object Access Protocol

- JSON/ REST: JavaScript Object Notation/Representational State Transfer
- ViciOne Cluster Communication

Nach der Analyse der verschiedenen möglichen Schnittstellenarten wurden SQL-Server sowie ViciOne Cluster Comm. als Schnittstellen für MFGeb festgelegt.

Anschließend wurde die sensorische Ausstattung der RLT- und Heizungsanlage überprüft. Zusätzlich benötigte Sensorik wurde nachgerüstet. Somit wurde sichergestellt, dass die entwickelten Fehlererkennungsalgorithmen in einer Vielzahl von Anlagenkonfigurationen eingesetzt werden können.

Es wurde die RLT-Anlage mit zusätzlichen Sensoren erweitert, die bei der Bewertung des Ist-Zustandes als nötig eingestuft wurden. Dies soll eine genauere Betrachtung von Betriebszuständen ermöglichen, um evtl. darin auftretende Fehler zu erkennen.

Im Anschluss an diese Vorbereitungen wurden verschiedene, vom IBIT mit Hilfe der FMEA erarbeiteten, Fehlerszenarien in die Versuchsanlagen implementiert und messtechnisch aufgezeichnet.

Mit Beginn der Testphase befasste sich die ifm mit der Erfassung und Auswertung der Betriebsdaten der Heizungs- und Lüftungsanlage unter Vorgabe von Fehlerzuständen durch das IBIT.

In den Messreihen wurden manuell Stellsignale und Sollwerte vorgeben, um die Anlage in einen bestimmten Arbeitspunkt zu fahren und zu halten. Nach dieser Einlaufphase der Anlage werden Werte einzelner Feldgeräte, wie z.B. die Klappenstellungen, nach der Vorgabe laut Testreihe verändert und über einen begrenzten Zeitraum gehalten. Weiterhin wurden Messdaten, die den fehlerfreien Anlagenbetrieb wiedergeben aufgenommen.

Nach den ersten Durchläufen der Testreihen und der Übermittlung der damit verbunden Datensätzen, erarbeitet man eine Datenpunktbezeichnungsliste in Zusammenarbeit mit dem IBIT, um sicherzustellen, dass die verwendeten Datenbankentitäten auch den für die FED relevanten Datenpunkten der Gebäudeautomation entsprechen.

Die erzeugten Messdaten und eine zusätzliche Beschreibung des Regelungskonzepts der Anlagen diente als Entwicklungsgrundlage der Fehleranalysealgorithmen.

Die Messwerte wurden dabei mittels ViciOne in eine SQL-Datenbank geloggt und dem IBIT als Messwertdatenbank zur Verfügung gestellt.

Auf dieser Basis wurden FED-Regeln am IBIT entwickelt, welche danach mit dem FunctionBlock Creator in Funktionsblöcke mit der Programmiersprache C# übertragen wurden. In kleinen internen Workshops wurden offenen Fragen und eventuell Missverständnisse zur Dokumentation der Regeln geklärt und ausgeräumt.

Im Anschluss wurden die erstellten lauffähigen FED-Funktionsblöcke in das Produktivsystem des Demonstrator Zwickau überführt und kommt dort seitdem zum Einsatz.

In den darauffolgenden Iterationsschritten wurden weitere Messdatensätzen der Fehler szenarien mit anderen Umgebungsparametern erzeugt, um die Fehlererkennungsalgorithmen der Funktionsblöcke zu evaluieren und ggf. anzupassen. Auf eine weitere Dokumentation der Funktionsblöcke wurde an dieser Stelle abgesehen, da die Ausarbeitung der Regeln durch das IBIT aus unserer Sicht lückenlos ist und sich lediglich die verwendete Programmiersprache unterscheidet.

4.3.2 Über die Automationsplattform ViciOne

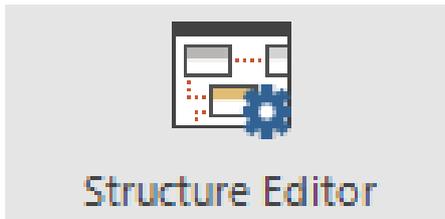
Mithilfe der Automation Suite ist es möglich komplexe Steuer-, Regel- und Überwachungsfunktionen zu erstellen und somit gebäudetechnische Anlagen in Betrieb zu nehmen sowie effizient zu betreiben.

Der nachfolgende Tabelle 4-6 gibt einen kurzen Überblick über die verschiedenen Module der Automation Suite. Innerhalb der Suite lässt sich jeweils nur eine Instanz eines Moduls ausführen. Existiert noch keine Instanz eines Moduls wird diese erzeugt, ansonsten in den Vordergrund gebracht.

Tabelle 4-6: Modulübersicht Automation Suite



Der FunctionBlock Creator ermöglicht die Erstellung neuer oder Bearbeitung bestehender Funktionsblöcke. Ein Funktionsblock stellt Funktionalitäten oder Logiken bereit, zum Beispiel zum Auslesen oder Steuern von Geräten.



Der Structure Editor wird zum Erstellen von Konfigurationen für Anlagen oder Gebäude verwendet. In einer Konfiguration werden die für die Steuerung benötigte Hardware sowie die logischen Verknüpfungen grafisch dargestellt.



Mit dem Screen Designer können grafische Benutzeroberflächen erstellt und mit einer Konfiguration verknüpft werden. Visualisierungen stellen dem Endanwender Informationen über Anlagen oder Gebäude zur Verfügung und lassen Interaktionen mit diesen zu.



Der Screen Viewer bietet die Möglichkeit, die mit dem Screen Designer erstellten, Screens anzuzeigen. Mithilfe verschiedener Diagnose-Screens kann die Inbetriebnahme einer Anlage oder eines Gebäudes durchgeführt werden.



Der Cluster Manager stellt alle verfügbaren ViciOne-Dienste innerhalb eines Netzwerks grafisch dar und ermöglicht die Interaktion mit dem Applikateur.

Das elementare ViciOne-Modul für MFGeb ist der FunctionBlock Creator. Ein Funktionsblock kann frei programmiert werden und stellt der Automation Suite Funktionen, wie das Auslesen und Speichern von Messdaten und das Steuern von Geräten oder das frühzeitige Erkennen von Fehlern, bereit.

Die Suite bietet auch eine Vielzahl von unterschiedlichen vorgefertigten Funktionsblöcken an, mit denen Hardware (Sensoren und Aktoren als Ein- und Ausgänge) schnell und einfach zu den jeweiligen Funktionen hinzugefügt werden kann.

Mit diesen Funktionsblöcken können im Structure Editor Systemkonfigurationen erstellt werden. Sie sind Grundlage einer jeden Gebäudeautomation und beinhalten

Funktionsblöcke, welche die Hardware sowie die logischen Strukturen für die gewünschten Funktionalitäten grafisch darstellen. Mit Linien, Sprungmarken und logischen Operatoren werden sie miteinander verknüpft.

4.3.3 FunctionBlock Creator

4.3.3.1 Allgemein

Mit dem FunctionBlock Creator können Funktionsblöcke (FB) erstellt werden, wobei das Design und die Implementierung des Programmcodes vorgenommen werden. Sie sind als Hauptbestandteil einer Konfiguration die Grundlage einer jeden Steuerung.

Grundlegend wird bei ViciOne zwischen zwei Funktionsblocktypen unterschieden - Blöcke zur **Hardware-Abstraktion** und Blöcke für **verarbeitende Funktionen**.

4.3.3.2 Hardware-Abstraktion

Hiermit sind Funktionsblöcke gemeint, welche den Zugriff auf eine Hardwarekomponente ermöglichen und innerhalb einer Konfiguration bereitstellen. Nach dem Import können die meisten Hardware-Funktionsblöcke direkt verwendet werden. Für ein paar Funktionsblöcke ist es notwendig, dass die Hardware über einen Assistenten in die Konfiguration eingefügt wird.

Beispiele für Hardware-Funktionsblöcke sind:

- ViciOne Embedded Geräte
- Beckhoff
- EnOcean
- KNX
- MBus
- ...

4.3.3.3 Verarbeitende Funktionsblöcke

Als verarbeitende Funktionsblöcke können alle Funktionsblöcke angesehen werden, welche nicht zum direkten Ansteuern einer Hardware dienen. Diese Funktionsblöcke erfüllen in der Regel eine oder mehrere Funktionen.

4.3.3.4 Aufbau und Eigenschaften eines Funktionsblock

Im Folgenden werden zunächst der grundlegende Aufbau sowie die Eigenschaften eines Funktionsblocks beschrieben. In Abbildung 4-4 ist der prinzipielle Aufbau dargestellt. In Tabelle 4-7 ist die zugehörige Legende zu finden.

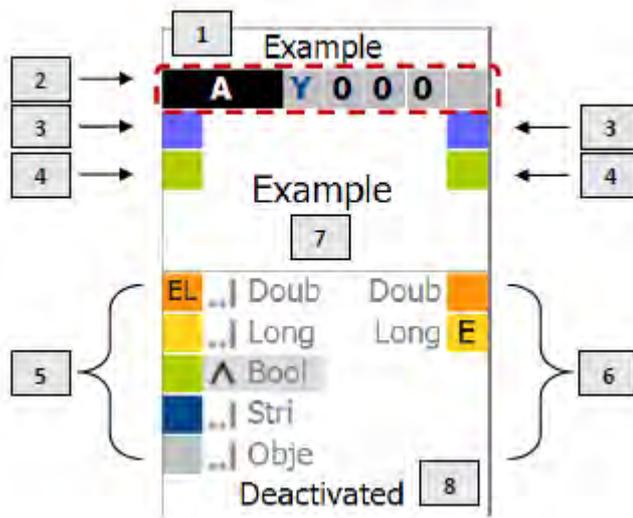


Abbildung 4-4: Grundlegender Aufbau eines Funktionsblocks

Tabelle 4-7: Legende Aufbau Funktionsblock

1	Instanzname Dies ist der eindeutige Name der Instanz eines Funktionsblocks.
2	Header Zeigt Informationen zum Cluster Node , RunMode und EventMode an
3	Konfigurationseingang / Konfigurationsausgang (FbConfig) In der FbConfig lassen sich Einstellungen erstellen.
4	Aktivierungsschalter (FbEnable) Aktiviert bzw. deaktiviert den Funktionsblock.
5	Eingänge Die Eingänge des Funktionsblocks mit farblicher Kennzeichnung des Datentyps.
6	Ausgänge Die Ausgänge des Funktionsblocks mit farblicher Kennzeichnung des Datentyps.
7	Symbol oder Name Das Symbol und der Katalogname des Funktionsblocks.
8	Zustand des Funktionsblocks Zeigt an, ob der Aktivierungsschalter auf disabled gesetzt wurde.

4.3.3.5 Connectoren

Die Ein- bzw. Ausgänge werden als Connectoren bezeichnet und bilden den Hauptbestandteil eines Funktionsblocks. Es wird dabei zwischen sogenannten Kopf-Connectoren und Rumpf-Connectoren unterschieden. Diese werden im Folgenden erläutert.

Kopf-Connectoren

Die Kopf-Connectoren eines Funktionsblocks sind FbConfig und FbEnabled und in nachfolgender Tabelle zusammengefasst.

Tabelle 4-8: Legende Aufbau Funktionsblock

Connector	Datentyp	Eingangsseite	Ausgangsseite
FbConfig	String	Ein gültiger String mit Werten kann hier eingegeben werden, um so zur Laufzeit Parameter verändern zu können.	Alle Werte der Settings des Funktionsblocks werden hier ausgegeben.
FbEnabled	Boolean	Der Funktionsblock kann zur Laufzeit oder mittels eines Default-Wertes des Connectors (de-)aktiviert werden.	Auf der Ausgangsseite wird angezeigt, ob der Block zur Ausführung freigegeben ist.

Rumpf-Connectoren

Die Rumpf-Connectoren besitzen bestimmte Eigenschaften, welche im Folgenden behandelt werden.

DataType

Folgende Datentypen sind verfügbar:

	Double -	Gleitkommazahlen
	Long -	ganzzahlige Werte
	Boolean -	logische Werte
	String -	Zeichenketten
	Object -	komplexe Strukturen

DefaultValue

Der Standardwert des Eingangs-Connectors. Ausgänge werden durch den Block selbst berechnet.

Format

Stellt das Ausgabeformat der angezeigten Daten an die Visualisierung dar.

Description

Stellt Text zur Hilfestellung bzw. Beschreibung des Connectors zur Verfügung.

EventEnabled

Diese Eigenschaft gibt an, ob der Connector für eine Visualisierung nutzbar ist. Ist das der Fall, wird dies durch den Buchstaben "E" im Connector angezeigt (siehe Abbildung 4-4).

Logging

Die Daten eines Connectors können auch in eine Datenbank geloggt werden. Die Kennzeichnung erfolgt dabei durch den Buchstaben "L" am Connector (bei EventEnabled zusätzlich zum "E"). Folgende Modi sind dabei möglich:

- **DataLogChange:** Jede Veränderung wird geloggt, wenn der Wert auf "1" gesetzt wurde.
- **DataLogCycle:** Dieser Wert gibt das Loggingintervall in Zyklen an.

Published

Diese Eigenschaft gibt an, ob der Connector veröffentlicht werden soll.

PoolingMode

Es ist möglich verschiedene Signale auf der **Eingangsseite** eines Blocks logisch oder arithmetisch miteinander zu verbinden. Die möglichen Einstellungen, abhängig vom Datentyp, sind in nachfolgender Tabelle 4-9 aufgeführt. Sie werden am Connector durch das jeweilige Symbol angezeigt.

Tabelle 4-9: Pooling-Modi

Pooling Mode		Boolean	Double	Long	String	Object
Any	Der letzte also "jüngste" Wert wird verwendet.	✓	✓	✓	✓	✓
Sequence III	Jeder Wert wird seiner Reihenfolge (Warteschlange) nach abgearbeitet.	✓	✓	✓	✓	✓
Min ▼ / Max ▲	Der kleinste bzw. größte zur Verfügung stehende Wert wird benutzt.	✓	✓	✓	-	-
Avg ∅	Bildung des Mittelwerts über alle Werte innerhalb eines Zyklus.	-	✓	✓	-	-
Sum ∑	Alle in einem Zyklus zur Verfügung stehenden Werte werden addiert.	-	✓	✓	-	-
AND ∧, OR ∨, NOT ¬, NAND ∧̄, NOR ∨̄	Logische Operatoren können genutzt werden.	✓	-	-	-	-
ConCat +	Zeichenketten können mit-einander verbunden werden.	-	-	-	✓	-

4.3.3.6 Eigenschaften eines Funktionsblocks

Der Funktionsblock selbst besitzt bestimmte Eigenschaften, welche im Folgenden erläutert werden.

EventMode

Diese Eigenschaft gibt an, ob die Ein- bzw. Ausgänge des Funktionsblocks EventEnabled sind. Hiermit wird also festgelegt, ob Daten einer GUI zur Verfügung gestellt werden sollen. Folgende Einstellungen werden unterstützt:

- **Selected** (Standardeinstellung)
Die Connectoren können einzeln zur Verarbeitung von Events freigegeben werden.
- **All**
Alle Connectoren verarbeiten Events.
- **None**
Keiner der Connectoren kann Events verarbeiten.

RunMode

Diese Eigenschaft gibt an, wie Blöcke von der Engine abgearbeitet werden. Nachfolgend sind die verfügbaren Modi, erkennbar durch einen Buchstaben im Header des Funktionsblocks, aufgeführt.

- Always (A)
Zu jedem Zyklus wird der Funktionsblock ausgeführt.
- Never (N)
Der Funktionsblock wird nie aufgerufen.
- Change (C) (Standardeinstellung)
Der Funktionsblock wird nur bei einer Veränderung ausgeführt.
- Hinweis: Das ist die bevorzugte Einstellung, welche bei der Erstellung von Blöcken genutzt werden sollte. Ein Funktionsblock kann zudem selbst seinen Status IsChanged auf true setzen.
- Cycle (Y)
Die Ausführung des Blocks erfolgt in einem festen Intervall. Folgende Konfigurationsmöglichkeiten sind bei einer zyklischen Ausführung möglich:
 - **CycleFrequency**: Gibt die Länge des Intervalls in Zyklen an (z.B.: 1000 Zyklen).
 - **CycleOffset**: Gibt einen Versatz des aufrufenden Zyklus an.
 - **CyclePriority**: Legt fest welche Blöcke im Falle einer Auslastung nicht abgearbeitet werden.

4.3.3.7 Parameter

Die meisten Funktionsblöcke besitzen Parameter, welche meist feste Werte zur Laufzeit bereitstellen. Nutzereingaben, Berechnungen usw. können persistent abgespeichert werden, um diese auch zur Verfügung zu haben, nachdem die Konfiguration neugestartet wurde. Die Gesamtheit aller Parameter wird Settings genannt. Ein Parameter ist wie folgt zusammengesetzt:

Name

Ein eindeutiger Name, der während der Abarbeitung zum Auffinden des Werts des Parameters dient.

Value

Der Wert des Parameters.

Comment

Eine kurze Beschreibung bzw. Hilfestellung zum jeweiligen Parameter.

DataType

Der Datentyp und die damit zulässigen Werte des Parameters.

Minimum/Maximum

Der Wertebereich des Parameters.

SecurityLevel

Dieser Wert legt fest, wer den Parameter sehen und bearbeiten darf, abhängig von der Lizenz.

4.3.4 Structure Editor

4.3.4.1 Allgemein

Im Structure Editor können Konfigurationen erstellt werden. Sie sind Grundlage einer jeden Steuerung und beinhalten Funktionsblöcke, welche die Hardware sowie die logischen Strukturen für die gewünschten Funktionalitäten grafisch darstellen. Mit Linien bzw. Sprungmarken werden sie miteinander verknüpft.

Der Structure Editor gliedert sich im Wesentlichen in zwei Bereiche. Die **Arbeitsfläche**, welche die verwendeten Funktionsblöcke und deren Verbindungen darstellt, sowie den Bereich rechts davon. Hier werden beispielsweise die **Eigenschaften** von Blöcken oder Connectoren angezeigt.

Neben der grafischen Darstellung gibt es die Möglichkeit sich alle Funktionsblöcke einer Konfiguration in einer Liste anzeigen zu lassen (Siehe Abbildung 4-5).

FunctionBlock	Container	IdSimple	Description	Cluster Node	RunMode	EventMode	Cycle Frequency	Cycle Offset	Cycle Priority	Layers
KG Haustechnik Leck	Container L	402		Master	Change	Selected	0	0	0	not defined
EG Waschraum Lecka	Container L	403		Master	Change	Selected	0	0	0	not defined
EG Kochen Leckagem	Container L	404		Master	Change	Selected	0	0	0	not defined
EG Bad Leckagemeld	Container L	405		Master	Change	Selected	0	0	0	not defined
EG WC Leckagemeld	Container L	406		Master	Change	Selected	0	0	0	not defined
OG Kinderbad Lecka	Container L	407		Master	Change	Selected	0	0	0	not defined
Zentral Rauchwarm	Container	479		Master	Change	Selected	0	0	0	not defined
KG Abstellraum Bewe	Root	544		Master	Change	Selected	0	0	0	not defined
KG Flur Bewegung	Root	546		Master	Change	Selected	0	0	0	not defined
KG Mehrzweckraum	Root	548		Master	Change	Selected	0	0	0	not defined
KG Speisekammer Be	Root	550		Master	Change	Selected	0	0	0	not defined
KG Haustechnik Bew	Root	552		Master	Change	Selected	0	0	0	not defined
KG Werkstatt Beweg	Root	554		Master	Change	Selected	0	0	0	not defined
EG Kochen Bewegun	Root	556		Master	Change	Selected	0	0	0	not defined
EG Essen Bewegun	Root	558		Master	Change	Selected	0	0	0	not defined
EG Eltern Bewegun	Root	560		Master	Change	Selected	0	0	0	not defined
EG Arbeiten Bewegu	Root	562		Master	Change	Selected	0	0	0	not defined
EG Wohnen Bewegu	Root	564		Master	Change	Selected	0	0	0	not defined
EG Ankleide Bewegu	Root	566		Master	Change	Selected	0	0	0	not defined
EG Windfang Beweg	Root	568		Master	Change	Selected	0	0	0	not defined
EG Flur Bewegung	Root	570		Master	Change	Selected	0	0	0	not defined
EG Waschraum Bewe	Root	572		Master	Change	Selected	0	0	0	not defined
DG Kinderbad Beweg	Root	574		Master	Change	Selected	0	0	0	not defined
EG Bad Bewegung	Root	576		Master	Change	Selected	0	0	0	not defined
EG WC Bewegung	Root	578		Master	Change	Selected	0	0	0	not defined
DG Kind 2 Bewegung	Root	580		Master	Change	Selected	0	0	0	not defined
DG Hobby Bewegun	Root	582		Master	Change	Selected	0	0	0	not defined

Abbildung 4-5: Auflistung aller Funktionsblöcke einer Konfiguration

Im oberen Bereich der Listenansicht besteht die Möglichkeit die Liste zu gruppieren, indem die Header der jeweiligen Spalten nach oben gezogen werden. Außerdem kann für jede Spalte ein Filter angewendet werden. In der Liste können auch die Eigenschaften **EventEnabled**, **DataLogChange**, **DataLogCycle** und **Published** der Connectoren angepasst werden. Wenn innerhalb der Liste auf einen Funktionsblock ein Doppelklick ausgeführt wird, wechselt der Structure Editor zurück in die grafische Darstellung und markiert den entsprechenden Funktionsblock.

Neben der grafischen Darstellung und der Listenansicht der Funktionsblöcke gibt es noch den Bereich **Notes**. Hier steht ein Texteditor für das Festhalten von Notizen zur Verfügung. Diese werden zusammen mit der Konfiguration gespeichert und stehen dann anderen Applikateuren zur Verfügung.

4.3.4.2 Erstellen einer Konfiguration

Eine Konfiguration kann über die Schaltfläche New oder das Kürzel Strg + N erstellt werden. Es erscheint ein Informationsfenster, indem einige Daten (Kundendaten etc.) zur Konfiguration hinterlegt werden können.

Ist bereits eine Konfiguration vorhanden, kann diese mit der Schaltfläche Open (Strg + O) geöffnet werden.

Über den File-Dialog (Abbildung 4-6) ist das Anlegen oder Öffnen einer Konfiguration ebenfalls vorhanden. Hier kann diese auch gespeichert oder exportiert werden.

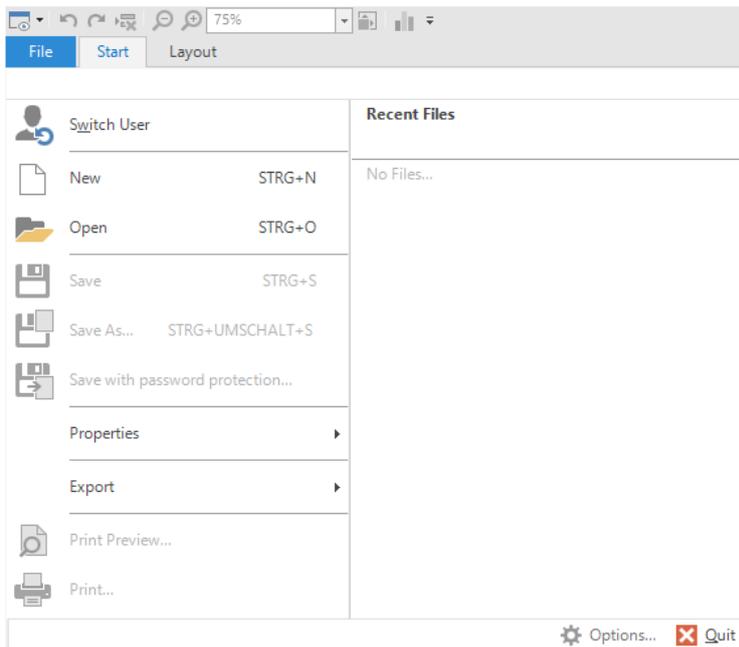


Abbildung 4-6: Der File-Dialog des Structure Editors

Eine Konfiguration benötigt zunächst grundlegende Einstellungen. Über den Reiter **Cluster Nodes** (Abbildung 4-7) können diese vorgenommen werden.

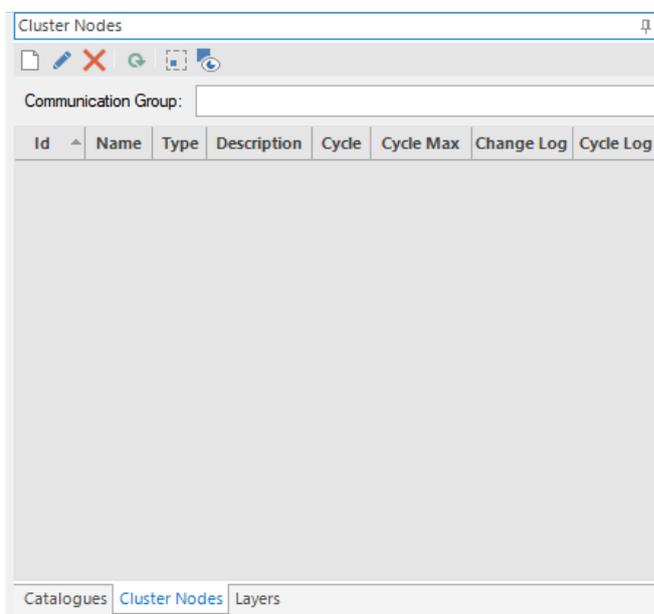


Abbildung 4-7: Reiter Cluster Nodes des Structure Editors

Ein **Cluster** kann als Gerät verstanden werden, auf dem der Dienst zum Ausführen von Konfigurationen läuft. Im Normalfall wird eine Konfiguration nur auf einem Gerät innerhalb eines Netzwerks ausgeführt.

Es gibt aber auch Anwendungsfälle, bei denen es von Vorteil sein kann, die Konfiguration auf mehrere Cluster Nodes zu verteilen.

4.3.4.3 Kommunikationsgruppe

Für die Kommunikation zwischen Visualisierung und Konfiguration wird die Kommunikationsgruppe (**Communication Group**) benötigt. Auch wenn keine Visualisierung für die Steuerung benötigt wird, muss sie angegeben werden. Dazu befindet sich im oberen Bereich des Reiters Cluster Nodes das Textfeld für die Kommunikationsgruppe.

4.3.4.4 Cluster Node

Beim Neuanlegen einer Konfiguration wird automatisch ein neuer Cluster Node vom Typ Server mit dem Namen Master angelegt.

Um einen neuen Cluster Node anzulegen, kann oberhalb der Kommunikationsgruppe die Schaltfläche New ausgewählt werden. Zum Editieren eines bestehenden Cluster Nodes dient die Schaltfläche Edit. Alternativ genügt ein Doppelklick auf den entsprechenden Node. Um einen Node wieder zu löschen, wird dieser ausgewählt und das Delete-Symbol angeklickt oder die Entf-Taste gedrückt.

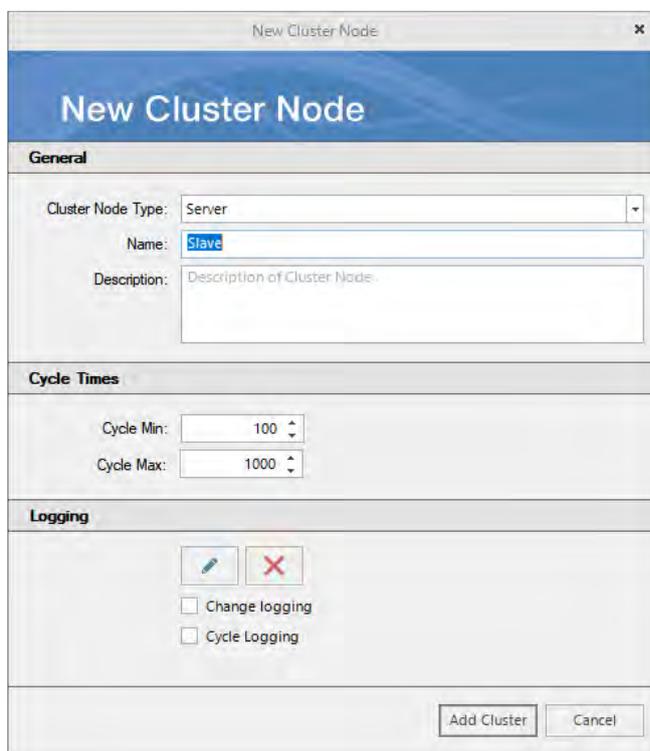


Abbildung 4-8: Dialog zum Erstellen eines neuen Cluster Nodes

Folgende Einstellungen sind beim Erstellen oder Bearbeiten eines Cluster Nodes vorhanden:

Cluster Node Type

Dies beschreibt den Typ des ausführenden Clusters (Server, MiniServer).

Name

Ein Pflichtfeld mit frei wählbarem Namen, z.B. Wohneinheit 1.

Description

Ein optionales Feld zum Hinterlegen einer detaillierten Beschreibung des Cluster Nodes.

Cycle Times Min/Max

Die minimale bzw. maximale Ausführungszeit eines Zyklus, innerhalb dessen Funktionsblöcke einer Konfiguration einmal abgearbeitet werden.

Logging

Das Logging bietet eine einfache Möglichkeit der Datenerfassung zur Diagnose. Die Checkboxen ermöglichen dabei die Auswahl welcher Typ des Loggings global erlaubt ist:

- **Change logging:** Logging bei Veränderung
- **Cycle logging:** Zyklisches Logging

Die **Datenbankverbindung** für das Logging wird über den **Edit**-Button hinterlegt. Dafür sind folgende Einstellungen im **Logging Wizard** verfügbar (Abbildung 4-9).



The screenshot shows a window titled "Logging Connection Wizard" with a close button (x) in the top right corner. Below the title bar is a blue header with the text "Logging Wizard". The main area contains several input fields: "Type:" with a dropdown menu showing "SQL"; "Server:" with a text box containing "name of datasource/server"; "Database:" with a text box containing "name of database"; "Username:" with a text box containing "username"; and "Password:" with a text box containing "password". At the bottom of the window are two buttons: "Accept" and "Cancel".

Abbildung 4-9: Logging Wizard für SQL-Datenbank

Type: Zum Beispiel SQL.

Server: Der Name oder die IP-Adresse des Datenbankservers.

Database: Der Name der Datenbank, in die geloggt werden soll.

Username: Der verwendete Anmeldename am Datenbankserver.

Password: Das zum Anmeldennamen zugehörige Passwort.

4.3.4.5 Funktionsblock-Kataloge

Für die Erstellung einer funktionsfähigen Konfiguration werden zunächst Funktionsblock-Kataloge benötigt. Diese können über den Import-Button des Reiters **Catalogues** importiert werden. Dateien vom Typ **".vfb"** können direkt importiert werden.

Bei Auswahl einer bereits bestehenden Konfiguration (**".cfg"**), kurz **Config**, öffnet sich ein Wizard. Es werden alle in der Konfiguration enthaltenen Kataloge in einer Baumstruktur angezeigt. Hier können die benötigten Kataloge ausgewählt werden (siehe Abbildung 4-10).

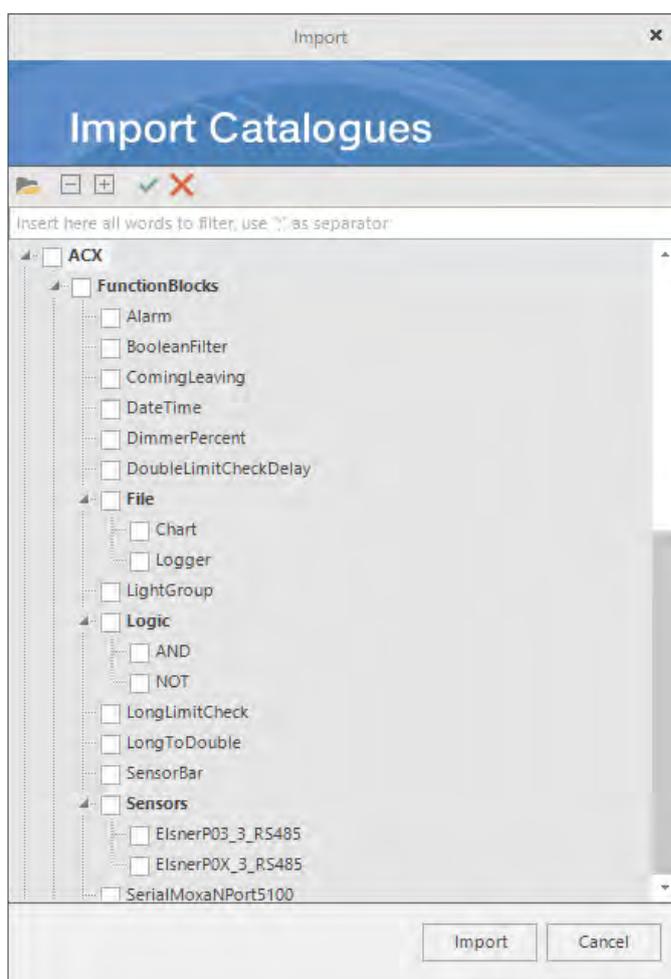


Abbildung 4-10: Katalogimport aus einer bestehenden Konfiguration

Hinweis: Funktionsblöcke können auch aus bestehenden Konfigurationen in eine neue kopiert werden. Dabei geschieht der Import automatisch, falls der Funktionsblock noch nicht vorhanden ist.

Zur Verwendung von Hardwarefunktionsblöcken wie Beckhoff, EnOcean oder KNX gibt es spezielle Hardware-Wizards, welche in diesem Bericht nicht näher erläutert werden, da sie für das Projekt nicht relevant waren.

4.3.4.6 Verwendung von Funktionsblöcken

Funktionsblöcke können per Drag & Drop aus der Katalogbibliothek auf die Arbeitsfläche gezogen werden. Es ist auch möglich Blöcke innerhalb einer Konfiguration oder aus einer anderen zu kopieren.

Die Auswahl von Funktionsblöcken erfolgt durch Anklicken bzw. Aufziehen eines Rahmens um diese. Zum Markieren mehrerer Elemente (auch Linien) kann die "Strg"-Taste verwendet werden. Mittels der Schaltflächen **Select FunctionBlocks of Catalogue** bzw. **Show FunctionBlocks of Catalogue** können Funktionsblöcke je nach gewähltem Katalog ausgewählt bzw. angezeigt werden.

Der Aufruf der Settings eines Funktionsblocks erfolgt per Doppelklick unterhalb des Headers oder über das Kontextmenü (**Edit FunctionBlock settings**). Wenn mehrere Blöcke selektiert sind, erfolgt der Aufruf über das Kontextmenü, wobei dann nur gleichnamige Parameter dargestellt werden!

Eine Veränderung an einem Parameter wird bei allen selektierten Blöcken übernommen. Wenn bei den Funktionsblöcken unterschiedliche Werte in einem Parameter stehen, wird das Parameterfeld gelb hinterlegt.

Im rechten unteren Bereich über den Reiter **Properties** können grundlegende Eigenschaften eines Funktionsblocks und dessen Connectoren angezeigt bzw. bearbeitet werden (Abbildung 4-11). Neben dem **EventMode** und dem **RunMode** hat ein Funktionsblock noch folgende Eigenschaften:

Cluster Node

Zeigt an, welchem Node der Block zugeordnet ist. Die Zuordnung erfolgt über das Kontextmenü unter Cluster Node Management.

Name

Der eindeutige Name eines Funktionsblocks kann hier editiert werden. Alternativ funktioniert dies auch mit einem Doppelklick auf das Namensfeld.

Hinweis: Es ist sinnvoll sich im Vorfeld eine geeignete Namensstruktur auszudenken, z.B. die Struktur eines Gebäudes.

Description

Über das Feld Description lässt sich eine Beschreibung des Blocks erstellen oder anzeigen.

SettingsStorageDelay

Legt fest, wann (nach wie vielen Zyklen) der Funktionsblock Änderungen der Parameter zur Laufzeit auf die Festplatte speichert.

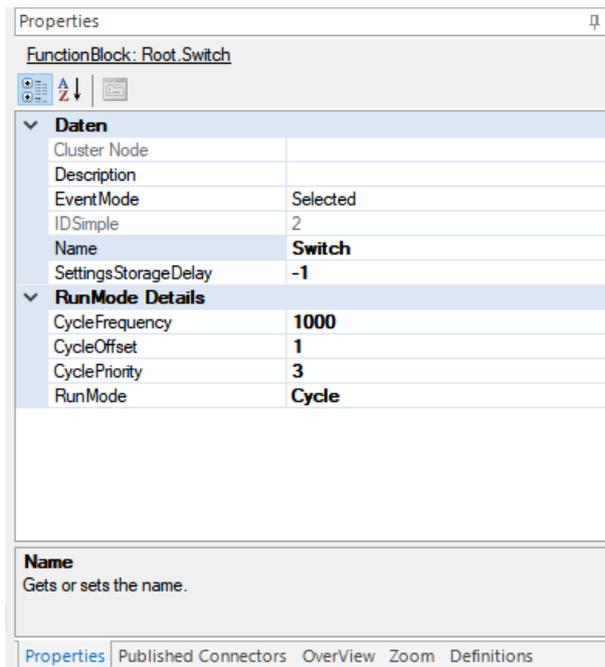


Abbildung 4-11: Die Eigenschaften (Properties) eines Funktionsblocks

4.3.4.7 Verbindung zwischen Funktionsblöcken

Um eine funktionierende Konfiguration zu erhalten, ist es notwendig die eingesetzten Funktionsblöcke miteinander zu verbinden. Dies geschieht mittels Linien und **Sprungmarken**.

Verbindung zwischen Funktionsblöcken mittels Linien

Eine Linie wird immer von einem Ausgangs-Connector eines Funktionsblocks zu einem Eingangs-Connector eines anderen Blocks gezogen.

Wird der Ausgang an mehrere Funktionsblöcke gezogen, handelt es sich um eine **1 zu n Beziehung** (siehe Abbildung 4-11).

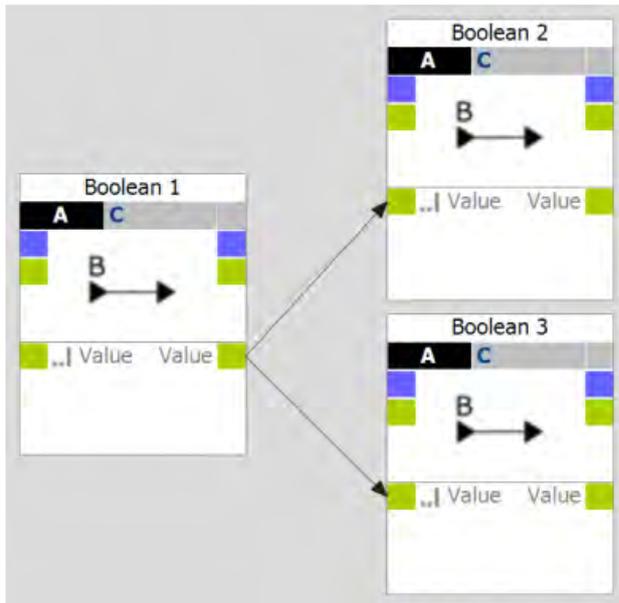


Abbildung 4-12: Eine 1 zu n Beziehung zwischen Funktionsblöcken

Weiterhin können mehrere Ausgangs-Connectoren (auch von verschiedenen Blöcken) an einen Eingangs-Connector eines Blocks gezogen werden (siehe Abbildung 4-13). Für die Verarbeitung mehrerer Signale muss der **PoolingMode** des Eingangs-Connectors entsprechend eingestellt werden. Die Signale können dabei von mehreren Linien, Sprungmarken oder dem Event der Visualisierung stammen.

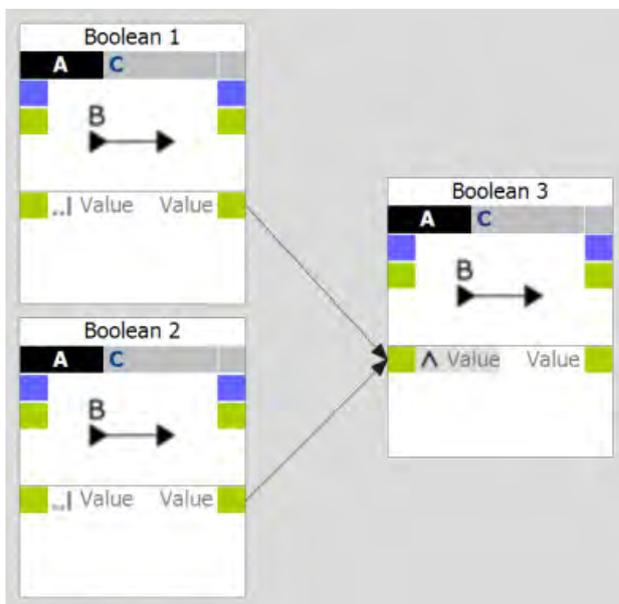


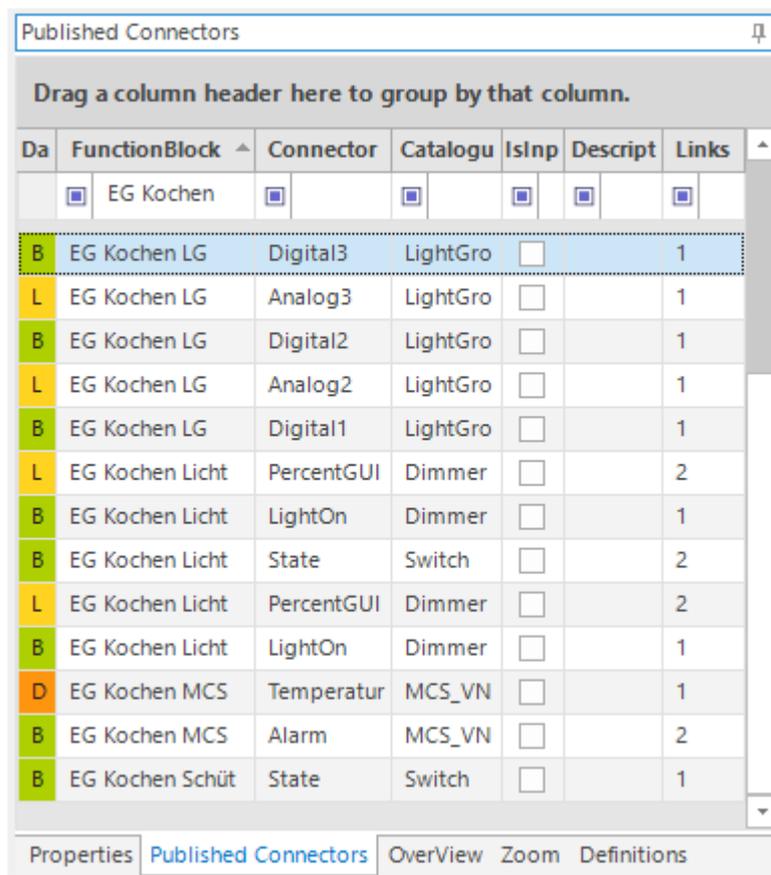
Abbildung 4-13: Verwendung mehrerer Eingangssignale (PoolingMode)

Verbindung zwischen Funktionsblöcken mittels Sprungmarken

Eine weitere Möglichkeit Blöcke miteinander zu verbinden ist die Verwendung von Sprungmarken. Diese eignen sich besonders gut um entfernte Funktionsblöcke miteinander zu verknüpfen. Es ist auch möglich Linien zu Sprungmarken zu konvertieren. Dazu werden die Linien markiert und anschließend **Convert Link to JumpLabel** per Rechtsklick ausgewählt.

Zur Verwendung von Sprungmarken, ist es nötig, dass mindestens einer der zu verbindenden Connectoren "gepublished" ist. Das heißt, dass die Eigenschaft **Published** des Connectors auf true gesetzt werden muss.

Diese Connectoren tauchen dann in einer Liste im Reiter **Published Connectors** auf, wie in Abbildung 4-14 zu sehen ist. Sie können von hier per Drag & Drop an andere anzubindende Connectoren gezogen werden. Auch eine Mehrfachauswahl ist möglich. Ein Doppelklick auf eine Sprungmarke führt immer zum zugehörigen Connector.



Da	FunctionBlock	Connector	Catalogu	IsInp	Descript	Links
	EG Kochen					
B	EG Kochen LG	Digital3	LightGro	<input type="checkbox"/>		1
L	EG Kochen LG	Analog3	LightGro	<input type="checkbox"/>		1
B	EG Kochen LG	Digital2	LightGro	<input type="checkbox"/>		1
L	EG Kochen LG	Analog2	LightGro	<input type="checkbox"/>		1
B	EG Kochen LG	Digital1	LightGro	<input type="checkbox"/>		1
L	EG Kochen Licht	PercentGUI	Dimmer	<input type="checkbox"/>		2
B	EG Kochen Licht	LightOn	Dimmer	<input type="checkbox"/>		1
B	EG Kochen Licht	State	Switch	<input type="checkbox"/>		2
L	EG Kochen Licht	PercentGUI	Dimmer	<input type="checkbox"/>		2
B	EG Kochen Licht	LightOn	Dimmer	<input type="checkbox"/>		1
D	EG Kochen MCS	Temperatur	MCS_VN	<input type="checkbox"/>		1
B	EG Kochen MCS	Alarm	MCS_VN	<input type="checkbox"/>		2
B	EG Kochen Schüt	State	Switch	<input type="checkbox"/>		1

Abbildung 4-14: Übersicht der Published Connectors)

4.3.4.8 Container

Um in großen Konfigurationen den Überblick zu behalten, bietet der Structure Editor die Möglichkeit mehrere logisch zusammengehörige Funktionsblöcke in Container zu verschieben (siehe Abbildung 4-15).

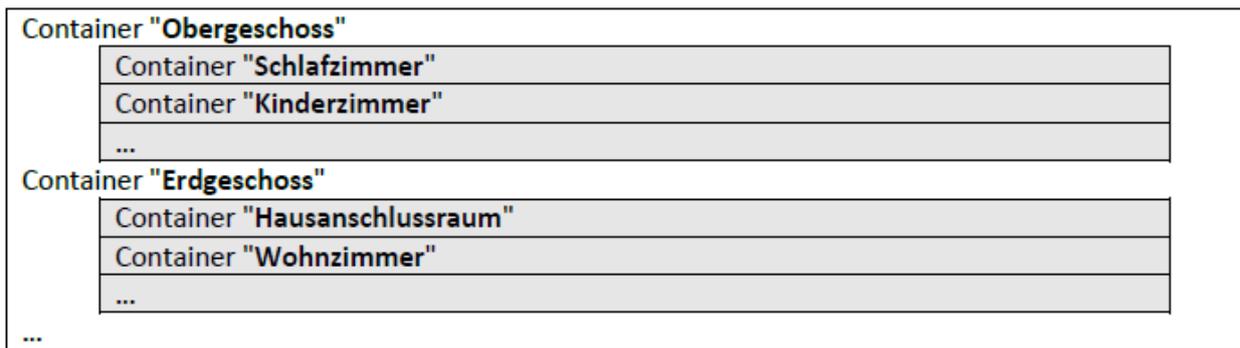


Abbildung 4-15: Beispielstruktur zur Verwendung von Containern

Container werden über das Kontextmenü durch den Eintrag Create Container erzeugt. Dies verschiebt ausgewählte Blöcke in einen Container oder erzeugt einen leeren, falls keine Blöcke ausgewählt sind.

Connectoren von Funktionsblöcken außerhalb eines Containers, die bereits durch Linien mit Blöcken innerhalb des neu erstellten Containers verbunden waren, werden automatisch dem Container hinzugefügt. Dies ist z.B. Abbildung 4-16 zu sehen. Im Header des Containers kann zudem die Anzahl der Blöcke innerhalb abgelesen werden.

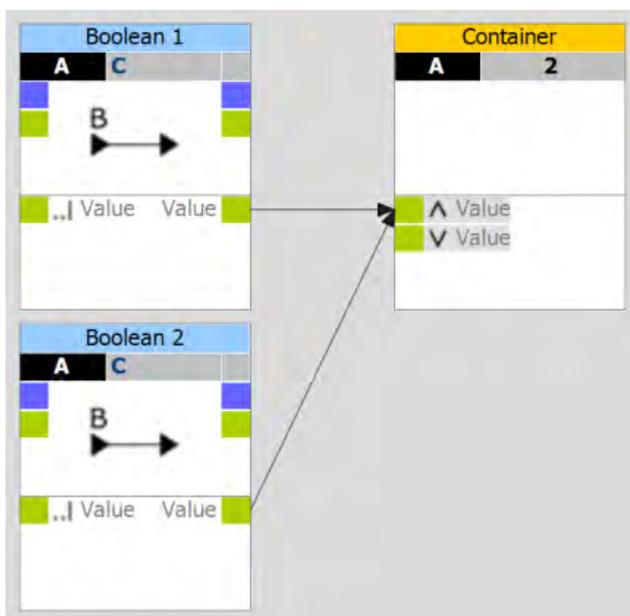


Abbildung 4-16: Darstellung eines Containers im Structure Editor

Durch einen Doppelklick auf den Container wird dieser geöffnet und dessen Inhalt auf der Arbeitsfläche angezeigt. Links unten wird dann die Arbeitsebene angezeigt, z.B. RootContainer.

Beim Klick auf die Pfeile werden alle Container, welche sich auf der vorgelagerten Ebene befinden, angezeigt. Mittels "Backspace"-Taste oder über die Arbeitsebene kann wieder in der Hierarchie nach oben navigiert werden.

4.3.5 Technische Umsetzung

4.3.5.1 Erstellung des Funktionsblockes einer FED-Regel

Anhand der ersten RLT-FED-Regel (siehe auch Kapitel 3.7.3) wird im Folgenden die technische Umsetzung eines Funktionsblockes aufgezeigt. Wie bereits veranschaulicht ist der FunctionBlock Creator sehr vielseitig einsetzbar und es galt anhand der vom IBIT gelieferten Dokumentation ein unter ViciOne lauffähiges Abbild zu erstellen. Dabei lag die Schwierigkeit darin, sich im ersten Schritt nicht so sehr im Detail zu verlieren, sondern möglichst eng an der Vorlage zu arbeiten, auch wenn diese nicht alle Einstellungsmöglichkeiten des FunctionBlock Creators abdeckt.

Configuration

Wie in Abbildung 4-17 zu sehen, gliedert sich der Reiter **Configuration** in zwei Bereiche. Auf der linken Seite wird die Definition des **Funktionsblock-Katalogs** vorgenommen, im rechten Bereich werden die **Settings**, also die Liste der Parameter definiert.

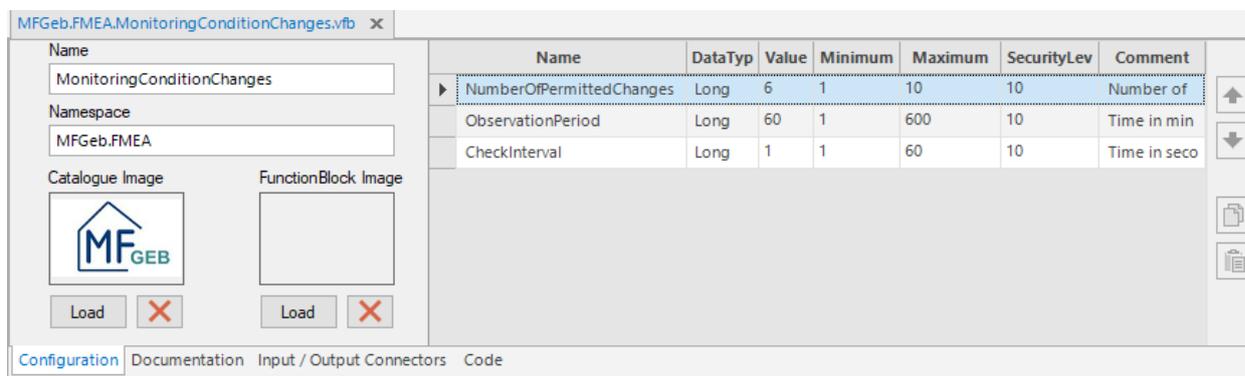


Abbildung 4-17: Überblick über den Reiter Configuration des FunctionBlock Creators

Name

Jeder Funktionsblock-Katalog benötigt zunächst einen Namen, welcher sich an der anzusteuern Hardware oder der bereitgestellten Logik orientieren sollte. In unserem Fall bezieht sich die Namensgebung auf die Kurzbeschreibung der Regel 1: „Zu viele Wechsel der Regelungssequenzen in einer Stunde“. Da die Anwendungssprache in der Suite Englisch ist, wurde der Funktionsblock „MonitoringConditionChanges“ genannt.

Namespace

Der Namespace definiert die Einordnung des Funktionsblock-Kataloges in die Katalog-Liste innerhalb des Structure Editors und wird von jedem Funktionsblock-Katalog benötigt

(siehe Abbildung 4-18). Er besteht aus Zeichenketten, welche jeweils durch einen "."
voneinander getrennt werden, um die Sortierung umzusetzen.

Für die Funktionsblöcke im Forschungsprojekt setzt sicher der Namespace aus dem
Projektname und dem übergeordneten Aufgabengebiet zusammen.

Für das Projekt: **MFGeb.FMEA**

- Der erste Teil beschreibt die **Haupteinordnung** innerhalb der Liste (siehe "MFGeb").
- Der zweite Abschnitt beschreibt die **Rubrik** unterhalb der Haupteinordnung, also z.B. "FMEA".
- Eine dritte Zeichenkette wäre möglich und definiert eine **Unterrubrik**, wie zum Beispiel "Logic", „Inputs“ oder ähnliches.

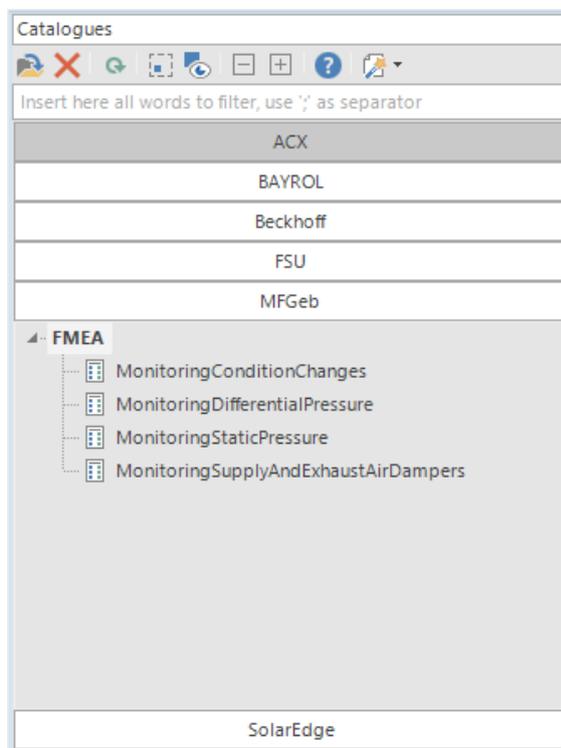


Abbildung 4-18: Einordnung der Kataloge bezüglich ihres Namespaces im Structure Editor

Settings

Für den Funktionsblock-Katalog können noch die Parameter angelegt werden, falls benötigt. Neue Parameter werden mit einem Klick auf die Schaltfläche Setting hinzugefügt. Sie können wieder gelöscht werden, indem die gesamte Reihe markiert und die "Entf"-Taste verwendet wird. Die Schaltflächen rechts neben der Parameterliste bieten Funktionen zum Kopieren und Einfügen. Hier befinden sich auch die Buttons zum Ändern der Parameterreihenfolge.

Für Regel 1 ergaben sich aus dem Programmablauf die folgenden Parameter und deren Standardwerte:

- NumberOfPermittedChanges

```
RSwechselMax = 6 'Festlegung wie viele Wechsel der Regelungssequenz in einer Stunde erlaubt sind
```

- ObservationPeriod

```
If i>60 Then 'wenn es Daten für eine Stunde gibt dann prüfe ob es in der letzten Stunde mehr Wechsel als RSwechselMax gab
```

Der im Programmablauf fest kodierte Zeitwert wurde bei der Umsetzung des Funktionsblocks `variable gestalte`, um einen höheren Freiheitsgrad zu schaffen, da ein Parameter auch während der Laufzeit geändert werden kann. Würde sich also während der Testphase die Zeit als unpassend herausstellen, so könnte man diese Einstellung ändern, ohne das Gesamtsystem anhalten zu und vor allem ohne den Funktionsblockkatalog anpassen zu müssen.

- CheckInterval

Bei diesem Parameter handelt es sich um eine Hilfsvariable für eine threadbasierte Programmierung, wie sie in C# verwendet wird.

Documentation

Unter dem Reiter Documentation hat der Entwickler die Möglichkeit den Funktionsblock ausführlich zu beschreiben. Im oberen Bereich kann ein Tooltip eingetragen werden, welcher als Katalogbeschreibung im Structure Editor angezeigt wird. Die ausführliche Dokumentation wird dann im unteren Bereich verfasst. Hierzu stehen einige Formatierungsmöglichkeiten zur Auswahl.

Im Rahmen von MFGeb wurde bereits eine umfangreiche Dokumentation vom IBIT zu den Regeln erstellt, weswegen auf eine separate Funktionsbeschreibung der einzelnen Funktionsblöcke abgesehen wurde und lediglich auf das PDF verwiesen wurde.

Input / Output Connectors

Im nächsten Reiter Input / Output Connectors (Abbildung 4-19) werden die Eingangs- und Ausgangs-Connectoren sowie die Standardeigenschaften des Funktionsblocks definiert. Die Arbeitsfläche gliedert sich in zwei Bereiche. Im linken Bereich werden die Eingangs- und Ausgangs-Connectoren angelegt und es wird eine Vorschau des Funktionsblocks angezeigt. Diese Vorschau kann über den Haken "Show" abgeschaltet werden. Der rechte Bereich stellt das Eigenschaftenfenster dar, welches die Eigenschaften der Connectoren bzw. des Blocks anzeigt.

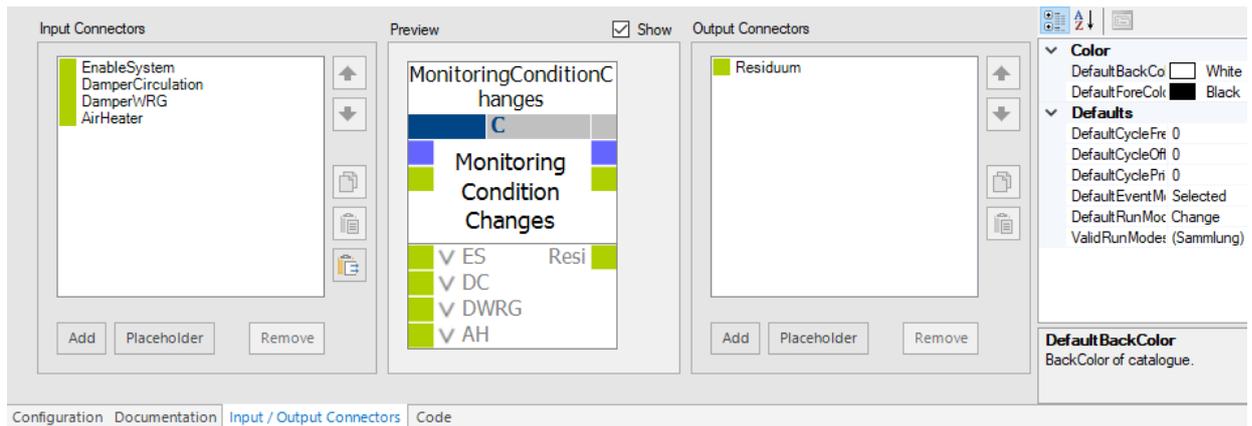


Abbildung 4-19: Überblick über den Reiter Input / Output Connectors des FunctionBlock Creators

Wie bereits in der Beschreibung der Lüftung erklärt, verfügt diese über 3 Zustände (Umluft, WRG, Heizen). Jeder dieser Zustände wird über einen separaten Eingangskonnektor des Datentyps boolean ausgewertet. Jede Wertänderung an einem dieser Eingänge erhöht den internen Zähler um 1.

```
Dim RSwechselh 'Variable zur Summierung der RS-Wechsel in einer Stunde
```

Eine Überwachung der Anlage und somit ein Ausführen des Funktionsblockes erfolgt erst, wenn das Lüftungsanlage angeschaltet wurde. Diese Auswertung erfolgt über den entsprechenden Eingangskonnektor „EnableSystem“.

Der einzige Ausgangskonnektor des Funktionsblock wird im Programmablauf wie folgt definiert:

```
Dim R1_Indikator 'Variable die im Fehlerfall gleich EINS gesetzt wird
```

Somit wurde auch hier der Datentyp boolean ausgewählt, da das Residuum nur 0 oder 1 annehmen kann.

Alle anderen einstellbaren Werte des Funktionsblocks und Konnektoren wurde bei der ersten Betrachtung auf den Standardwerten belassen, da sich zu diesem Zeitpunkt keine Besonderheiten zeigten.

Code

Im Abschnitt Code wird schließlich der Programmcode implementiert. Der FunctionBlock Creator erstellt dazu selbstständig das benötigte **Grundgerüst** (siehe Abbildung 4-20). Dieses stellt alle für den Funktionsblock benötigten Elemente zur Verfügung. Dazu wird eine Klasse angelegt, die dem Namen des Funktionsblocks entspricht. In ihr werden alle **Connectoren** und **Settings** initialisiert.

Standardmäßig ist dieser Bereich ausgeblendet und kann nicht bearbeitet werden. Er kann aber über die Schaltfläche **Show Header / Footer** der Rubrik **Edit / Search** angezeigt werden. Innerhalb des Grundgerüsts sind drei Methoden zugänglich, welche bearbeitet werden können, um den gewünschten Code zu implementieren: **ProcessComponent()**

Wird der Funktionsblock zur Laufzeit aufgerufen, wird immer diese Funktion aufgerufen und bildet damit die Hauptschleife jedes Funktionsblockes.

GetConfig()

Mit dieser Methode werden alle Parameter der Settings auf entsprechende intern angelegte Variablen geparkt.

DisposeComponent()

Mit dieser Methode werden beim Stoppen der Laufzeitumgebung alle Instanzen oder Hintergrundoperation eines Funktionsblockes eliminiert. Sie dient quasi zum Aufräumen der Prozesse.

```
1 using System;
2 using System.Collections.Generic;
3 using System.ComponentModel;
4 using System.Data;
5 using System.Diagnostics;
6 using System.Globalization;
7 using System.Linq;
8 using System.Security.Permissions;
9 using System.Text;
10 using System.Threading;
11 using ACX.ViciOne.Data;
12 using ACX.ViciOne.Data.Elements;
13
14 namespace ACX.ViciOne.Data.FunctionBlock
15 {
16     /// <summary>
17     /// Class for a system FunctionBlock calculating loop related data.
18
19     public int ProcessComponent ()
20     {
21     }
22
23     private bool GetConfig ()
24     {
25     }
26
27     public int DisposeComponent ()
28     {
29     }
30 }
```

Abbildung 4-20: Grundgerüst eines Funktionsblocks im FunctionBlock Creator

Bei der Implementierung ist darauf zu achten, dass z.B. **Verbindungsaufbauten** zu Hardwarekomponenten oder Datenbanken in einen **separaten Thread** auszulagern sind! Diese können auch einmal nicht funktionieren oder längere Zeit benötigen. Damit die Abarbeitung der Funktionsblöcke durch die Engine dabei nicht zum Erliegen kommt, sollen solche Aktionen **NICHT** innerhalb der ProcessComponent()-Methode abgearbeitet werden!

Das **Bedaten** von Connectoren wiederum darf NICHT aus Threads heraus erfolgen, sondern muss innerhalb von **ProcessComponent** oder einer aus ihrer aufgerufenen Methode heraus geschehen!

Bei diesen beiden Vorgängen handelt es sich um Systemeigenheiten von ViciOne und dient der Ausfallsicherheit und Robustheit des Gesamtsystems.

4.3.6 Hemmnisse

Am Anfang des Projektes wurde auf dem Hauptdach des Demonstrators die bestehende Solarthermieanlage gegen eine großflächige Photovoltaikanlage ersetzt. Durch diese umbauten verzögerte sich der Start der Messreihen.

Während der Projektlaufzeit gab es jedoch bei der Bezeichnung der Datenbankentitäten immer wieder Abstimmungsbedarf, da zum einen sich die Datenbankeinträge durch Konfigurations-erweiterungen und die Umbenennung von Funktionsblöcken änderten. Auch ein benötigtes Betriebssystem-Update führte zum notwendigen Austausch der Funktionsblock-Bibliothek. Beides führte zu einem erhöhten Kommunikations- und Rechercheaufwand, um den Ursachen der Umbenennungen auf den Grund zu gehen. Rechner mit Windows 10 als Betriebssystem eignet sich nur bedingt als Host der Automation Suite. Umbenennungen der Datenpunkteinträge wurden schnell per E-Mail mitgeteilt.

Positiver Nebeneffekt der Testphase war der unverfälschte Blick des IBIT auf den Demonstrator. Somit wurden durch die Auswertung der gelieferten Datensätze auch Fehler aufgedeckt, die nicht durch Fehlerszenarien in die Anlagen implementiert wurden. Häufig betrafen die Fehler Sensoren, deren Wertebereich falsch eingestellt, die schlecht abgeglichen oder sogar an falsche Stelle montiert wurden. Nach Behebung der Sensorfehler mussten einige Messreihen wiederholt werden.

Auf Grund von Covid-19 verzögerte sich der Durchlauf der Testfälle erneut, da der Demonstrator nicht immer besuchbar war. Somit zog man die Erstellung einiger Funktionsblöcke als Implementierung der FED-Algorithmen, die bis zu diesem Zeitpunkt bereits vom IBIT bereitgestellt worden waren, vor.

4.3.7 Auswertung der Messreihen mit FED in Demonstrator/Feldtest

Die im Projekt erstellten Funktionsblöcke, die die Algorithmen zur frühzeitigen Erkennung von Fehlerzuständen enthalten, wurden neben dem Demonstrator bereits in zwei weiteren Bestandsprojekten der ifm software GmbH eingesetzt. Somit ist für eine breite Evaluationsbasis der FED-Funktionsblöcken durch die Nutzung in unterschiedlichen Anlagen gesorgt. Dies ist nötig da sich die Datensätze zur Erstellung der Algorithmen nur auf den Demonstrator in Zwickau stützen.

Die Erkenntnisse fließen dann in Bestandsfunktionsblöcke für eine eventuelle Anpassungen ein.

Der Funktionsblock der ersten RLT-FED-Regel (technische Umsetzung in Kapitel 0) ist gut an den Zwickauer Demonstrator angepasst. Dies führt jedoch dazu, dass er für andere Anlagenkonfigurationen mit anderen Regelsequenzen und Betriebszuständen angepasst werden muss.

Es werden bei Neuanlagen Gespräche mit dem Endkunden geführt, um abzuklären wie die Informationskette ausgebaut werden kann, um die Fehlererkennung effizient nutzen können.

5 Fazit und Anknüpfungspunkte

Im Projekt hat sich gezeigt, dass der Einsatz der FMEA in der Gebäudetechnik einen erheblichen Mehrwert für die Planung der FED-Maßnahmen im speziellen Anwendungsfall bieten kann. Die Methode liefert Informationen zu möglichen Fehlerszenarien mit der Zuordnung spezifischer Symptome und ermöglicht eine Priorisierung einzelner Fehlerarten nach verschiedenen Kriterien. Hierdurch können notwendige Parameter für die Fehlererkennung abgeleitet und geeignete FED-Methoden ermittelt werden. Die Verfügbarkeit einer Vielzahl verschiedener Verfahren zur Fehlerdiagnose erfordert zudem eine Methodik zur Anpassung der FED-Anforderungen je nach Anwendungsfall. Die Methode sollte daher als ein wichtiger Baustein bei zukünftigen Entwicklungen im Bereich des Qualitätsmanagements in der Gebäudetechnik mitgedacht werden. Entscheidend ist hierbei eine breite Anwendung auf allen Systemebenen, einheitliche Standards und Festlegung von Verantwortlichkeiten sowie ein durchgängig begleitender Prozess über den gesamten Lebenszyklus eines Gebäudes. Bereits während der Planungs-, und Ausführungsphase kann es zu einer Vielzahl an Fehlermöglichkeiten kommen. Diese können bei der Inbetriebnahme oder bei Abnahmeprozessen bemerkt werden, führen jedoch unerkannt in späteren Lebensphasen zu höheren Betriebskosten und CO₂-Emissionen. Auch durch nicht eindeutig festgelegte Schnittstellen zwischen Fachplanern und Errichtern kann es zu nicht eindeutigen Vorgaben und somit zu Abweichungen zwischen Planungsziel und realem Gebäude kommen. Untersuchungen haben ergeben, dass das energetische Einsparpotential neu errichteter Gebäude 30 % und mehr betragen kann [Wolff (2005)], [Fisch (2007)], [OASE2005)].

Da der finanzielle Aufwand bei der Beseitigung von Planungsfehlern mit dem Fortschreiten im Planungs- und Errichtungsprozess exponentiell ansteigt, ist es wichtig Fehler in einem frühen Stadium des Gebäudelebenszyklus zu erkennen. Auch bei der Errichtung können durch Fehler (mangelhafte, falsche oder minderwertige Baustoffe, Bauteile und Aggregate, mangelhafte oder falsche Ausführung, ...) Mängel entstehen, die bei der Inbetriebnahme / Abnahme erkannt werden können, unerkannt jedoch zu höheren Betriebskosten bzw. nach längerer Zeit zu größeren Schäden führen. Für eine ganzheitliche Fehlerbetrachtung über den gesamten Lebenszyklus des Gebäudes sollte die FMEA bereits in den Phasen Planung, Ausführung und Inbetriebnahme eingesetzt werden. Dabei ist entscheidend mögliche Fehlerpotentiale im Vorfeld zu erfassen und diese durch geeignete Präventivmaßnahmen zu vermeiden. Auch während Sanierungs- und Umnutzungsmaßnahmen kann so auf bestehende FMEA-Ergebnisse aufgebaut und mögliche Problemstellen analysiert werden.

Die mögliche Implementierung der FMEA-Methodik in den Planungsprozess nach HOAI sollte daher anwendungsnah untersucht werden. Hier ist die Kernfrage wie eine Integration in die einzelnen Planungsphasen stattfinden kann und wo die Verantwortlichkeiten für diesen Prozess zu verankern sind. Mögliche Schnittstellen und

Anknüpfungspunkte bietet bspw. der Leitfaden „Handlungsempfehlungen zur Integration des Monitorings in die Planungs- und Ausführungsprozesse“ der Begleitforschung Energiewendebauen [Erhorn et. al. (2021)]. Vorteil ist, dass in dieser Phase durch alle am Bau beteiligten Akteure ein breit gefächertes Expertenwissen zur Verfügung steht. Werden alle Beteiligten in die integrale Fehlerbetrachtung einbezogen, so kann bereits zu Beginn eine breite Wissensbasis für die anschließende Planung der Betriebsüberwachung und der für die Erkennung der schwerwiegendsten Fehlermöglichkeiten erforderlichen Hard- und Software geschaffen werden.

Die Durchführung der Fehlerbetrachtung mithilfe der FMEA ist, bedingt durch die Komplexität und Vielfalt an unterschiedlichsten Anlagenvarianten und Regelungsstrategien, mit einem sehr hohen zeitlichen und personellen Aufwand verbunden. Eine Herangehensweise für die Minimierung dieses Arbeitsaufwandes besteht in der modularen Fehlerbetrachtung. Hierbei werden einzelne Komponenten innerhalb der jeweiligen zuvor festgelegten Systemgrenze einer FMEA unterzogen. An der Systemgrenze lassen sich Schnittstellen zu anderen Modulen oder der Umgebung definieren. Diese Schnittstellen können durch physikalische Größen beschrieben werden. Durch die Verknüpfung verschiedener Module wird der Zustand einer physikalischen Größe als Eingangs- oder Ausgangsgröße weitergeben, und die Auswirkungen auf das nachfolgende Modul werden kenntlich gemacht. Mit dieser Methode lässt sich die FMEA unter Verknüpfung der Module auf verschiedene Anlagentypen anwenden. Eine weitere Abgrenzung innerhalb der Module erfolgt hinsichtlich verschiedenster Steuerungs- und Regelungsstrategien auf unterschiedlichen Systemebenen. Durch die mehrfache Verwendung der Module zu verschiedenen Anlagen wird eine Redundanz geschaffen, die es erlaubt, die erarbeiteten Module in verschiedenen Kontexten auf ihre Konsistenz hin zu überprüfen. Die modulare Herangehensweise ermöglicht darüber hinaus eine effiziente Arbeitsteilung innerhalb der FMEA-Arbeitsgruppe.

Ein weiterer Bereich, der in eine gesamtheitliche Fehleranalyse einfließen sollte, ist die Gebäudeautomation. Als oft letztes Gewerk im Planungsablauf und der Errichtung wird an dieser Stelle gern gespart, und meistens kann der Planer dem Bauherrn nicht ausreichend deutlich machen, welche Auswirkungen dies auf den späteren Betrieb hat. Eine Aufgabe der Gebäudeautomation ist die gewerkübergreifende Steuerung, also die Sicherstellung der Gesamtperformance durch geeignete Betriebsstrategien. Diese werden aber leider meist nicht realisiert [OASE (2005)]. Weiterhin können durch fehlerhafte oder falsch platzierte Sensoren, falsche Parametrierung von Reglern, Fehler in der Verkabelung und Programmierung sowie mangelhafte Steuerungsstrategien erhöhte Betriebskosten entstehen, wobei die Funktion der Anlagen erhalten bleibt. Auch hier können Fehler sowohl in der Planung als auch in der Errichtung entstehen. Leider ist im Planungsprozess nicht eindeutig definiert, wer für entsprechende Betriebsstrategien verantwortlich ist und welche Vorgaben von den Fachplanern erfolgen müssen (Sollwerte, Heizkurven, Kühlkurven, ...).

Für die Betrachtung des Kosten-zu-Nutzenverhältnisses der Investitionen von betriebsüberwachenden Maßnahmen in Neu- und Bestandsanlagen ist eine wirtschaftliche Bewertung auf Grundlage folgender Faktoren erforderlich. Erstens: eine Auflistung aller möglichen Fehler die im System auftreten können. Zweitens: die Bewertung der Fehler hinsichtlich ihrer energetischen Auswirkungen, sowie der Auftretens- und Entdeckungswahrscheinlichkeit. Drittens: die FED-Methoden und die damit verbundenen Hard- und Softwareanforderungen, welche für die Detektion oder Vermeidung der aufgenommenen Fehler erforderlich sind. Eine Bewertung und Priorisierung der Fehlerszenarien ist also ein entscheidender Parameter.

Die FMEA sieht seit 2019 die Aufgabenpriorität als standardisierte Bewertungsmethode zur Risikoanalyse vor. Diese bewertet die Kombination der drei Einzelparameter für: die Bedeutung einer Fehlerfolge, die Auftretenswahrscheinlichkeit einer Fehlerursache sowie deren Entdeckungswahrscheinlichkeit. Je höher dabei die Aufgabenpriorität ist, je höher ist die Priorität zur Festlegung einer Entdeckungs- oder Vermeidungsmaßnahme. Die Bestimmung gestaltet sich jedoch schwierig, da sie jeweils abhängig von vielen Parametern der Anlagentechnik, des Gebäudes und der Nutzungsanforderungen sind und zumeist nur abgeschätzt werden können. Es stellt sich die Frage, inwiefern ein allgemeingültiges Bewertungsverfahren praxistauglich ist und belastbare Werte liefert. Dies sollte im Rahmen einer breiten Anwendungsstudie weiter untersucht werden.

Bei der klassischen FMEA-Vorgehensweise werden einzelne Komponenten oder Anlagenvarianten anhand von Struktur- und Funktionsnetzen modelliert. Diese bilden jedoch nur eine spezielle Produktvariante ab, sodass in der FMEA eine Vielzahl an Betrachtungsvarianten angelegt werden müssen. Eine Möglichkeit mehrere Varianten in einer Struktur abzubilden, bieten sogenannte 150-Prozent-Modelle. Diese Modelle werden vorwiegend in der Produktentwicklung eingesetzt. Bei der Erstellung des Produktdesigns werden so auf Grundlage von Feature-Listen alle optionalen Produktfeatures in einem Modell abgebildet. Die einzelnen Features sind dabei mit Constraints (Abhängigkeiten) logisch miteinander verknüpft. Durch die Constraints können bspw. optionale oder sich gegenseitig ausschließende Features abgebildet werden. Das 150-Prozent-Modell beinhaltet dabei alle möglichen Produkt-Varianten (100-Prozent-Modelle). Diese Modelle können bspw. für Algorithmen zur automatisierten Klassifizierung von Datenpunkten genutzt werden. Die Modelle wurden bereits im Rahmen des Forschungsprojektes „Big Data in der Gebäudeautomation“ [Big Data (2020), S.18] zur Feature-basierten Sichtweise auf Gebäude und Anlagen angewendet.

Für den Datenaustausch zwischen der FMEA-Datenbasis (messbare Symptome und Fehlerbewertung) und der Fehlerdiagnose in der FMEA-Software benötigt es standardisierten Schnittstellen wie bei zumeist firmeninternen Fehler-Ticketverfahren in Gebäudemanagementsystemen. Geeignete Datenschnittstellen zu vorhandene digitalen Beschreibungsmodellen für Gebäudestrukturen und funktionalen Beschreibungen könnten dabei den Prozess der Erarbeitung von Anlagenstrukturen in der FMEA

erheblich erleichtern. Dabei sollten aktuelle Entwicklungen wie bspw. aktive Funktionsbeschreibungen, Building Information Modeling (BIM), der Produktdatenaustausch nach VDI 3805 oder standardisierte Modellierungssprachen wie die Systems Modeling Language (SysML) berücksichtigt werden. Über entsprechende Schnittstellen zwischen FMEA-Softwareprodukten und branchentypischer Projektierungs- und Ausschreibungssoftware für gebäudetechnische Anlagen kann der, bedingt durch die hohe Komplexität der gebäudetechnischen Systeme, enorme Planungsaufwand für die automatisierte Fehlerüberwachung erheblich reduziert werden. Hierdurch werden Anreize geschaffen, die Entwicklung und Einbindung von FED-Methoden durch alle an der Gebäudeplanung beteiligten Akteure bereits während der Planungsphase anzustreben.

Für die entwickelten Algorithmen zur Fehlererkennung wurde eine eigene Datenpunktkennzeichnungssystematik verwendet. Anhand von Übersetzungstabellen findet die Zuordnung zum entsprechenden Datenpunkt in der Versuchsanlage mit eigener firmenspezifischer Datenpunktbezeichnungslogik statt. Dies führt häufig zu Problemen bspw. durch Umbenennung einzelner Datenpunkte. Für eine allgemeine Erfassung und Dokumentation von Fehlerzuständen und dazugehörigen Erkennungsmethoden bietet sich jedoch eine standardisierte Kennzeichnungssystematik an, um diese allgemein verfügbar zu machen. Eine Entwicklung in Richtung Standardisierung verfolgt bspw. die Kennzeichnungssystematik „Buildings-unified-datapoint-naming-schema-for-Operation-Management (BUDO)“, welche vom Fraunhofer ISE und E.ON ERC der RWTH Aachen entwickelt wurde. Anhand des BUDO-Tools (<https://github.com/RWTH-EBC/BUDO>) kann die Generierung des BUDO-Schlüssels auch automatisiert erfolgen.

6 Literaturverzeichnis

- [AIAG & VDA (2019)] AIAG & VDA (2019). Fehler-Möglichkeiten- und -Einfluss-Analyse. FMEA-Handbuch. Berlin: Verband der Automobilindustrie (VDA). Qualitäts Management Center (QMC)
- [AMEV (2008)] Arbeitskreis Maschinen- und Elektrotechnik staatlicher und kommunaler Verwaltungen (2008). Bedienen von Raumluftechnischen Anlagen in öffentlichen Gebäuden (Bedien RLT 2008). Berlin: Arbeitskreis Maschinen- und Elektrotechnik staatlicher und kommunaler Verwaltungen
- [AMEV (2020)] Arbeitskreis Maschinen- und Elektrotechnik staatlicher und kommunaler Verwaltungen (AMEV) (2020). Technisches Monitoring 2020. Technisches Monitoring als Instrument zur Qualitätssicherung. Empfehlung Nr. 158. Berlin: AMEV, BMI
- [Baumann et. al. (2005)] Baumann, O; Bastin, D; Becker, R; Brandauer, G.; Domke, M.; Fingerholz, S.; Grampp, C.; Lahr; Mayr, A.; Messerschmidt, M.; Muschiolik, H.; Reiser, C.; Schmit, T.; Sieher, M.; Stadler, H.; Umpfenbach, M.; Ungerland, C.-G.; Wedeken, S. & Wiedemann, M. (2005). Energetische Verbesserung der Bausubstanz Teilprojekt 1: Optimierung der Automationsfunktionen betriebstechnischer Anlagen mit Hilfe der dynamischen Simulation als Energie-Management-System - OASE. München: Ebert-Ingenieure
- Benndorf et.al. (2018)] Benndorf, G.; Wystrcil, D.; Réhault, N. (2018). Energy performance optimization in buildings: A review on semantic interoperability, fault detection, and predictive control. Freiburg: Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems
- [Benndorf & Réhault (2016)] Benndorf, G. & Réhault, N. (2016). DENSITY-BASED CLUSTERING ALGORITHM FOR FAULT DETECTION AND IDENTIFICATION IN HVAC SYSTEMS. Freiburg: Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems
- [Bhatia et.al. (2014)] Bhatia, A.; Reddy, R.; Garg, V. (2014). Design of Fault Detection and Diagnostics Lab for HVAC System. Hyderabad: International Institute of Information Technology
- [BEWAREN (2004)] Schmidt, F., Haller, R., Scheuermann, W., Sucicm, D., Kopetzky, R., Freihofer, H.: BEWAHREN - Bereitstellung von Planungshilfsmitteln zur Bewertung anlagentechnischer Maßnahmen bei der energetischen Verbesserung der Bausubstanz. Forschungsbericht. Hrsg.: Fachinstitut Gebäude-Klima e.V., Bietigheim-Bissingen, 2004.
- [Big Data (2020)] Auer, T., Lauss, L., Heissler, K. M., Maderspacher, J., Reiß, D., Mehnert, J., Rumpe, B., Stüber, S., Hannen, M., Plessner, S., Pinkernell, C., Kröker, A., Gentemann, R.: Big Data Analysen von Automationsdaten zur energetischen Betriebsoptimierung des

Gebäudebestandes (03ET1426). München: Technische Universität München. Lehrstuhl für Gebäudetechnologie und klimagerechtes Bauen, 2020.

- [Birnbaum et. al. (2007)] Birnbaum, U; Kauert, B.; Kleemann, M.; Schiller, H.; Gabrysch, K.; Göttisch, J. & Schwarzer, K. (2007). Leitfaden für die energetische Sanierung von Laboratorien. Forschungszentrum Jülich in der Helmholtz-Gemeinschaft; Schiller engineering Hamburg & Solar-Institut Jülich der Fachhochschule Aachen
- [Bollin et. al. (2008)] Bollin, E.; da Costa Fernandes, J. & Feldmann, T. (2008). Energie optimiertes Bauen, Teilkonzept 3: Langzeitmonitoring des Neubauvorhabens Solar Info Center Freiburg Phase II, Monitoring/Betrieb. Offenburg: Hochschule Offenburg – Institut für angewandte Forschung
- [Bonin (2018)] Bonin, J. (2018). Wärmepumpen, Fehler vermeiden bei Planung, Installation und Betrieb. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag
- [Bushby et.al. (2019)] Bushby, S.; Galler, M.; Ferretti, N.; Leader, R.; Rush, D.; Whittcomb, J. (2002). NIST Technical Note 2027 – Retro-Commissioning a Performing Arts Center using HVAC-Cx. Gaithersburg: National Institute of Standards and Technology - Building Environment: Division Building and Fire Research Laboratory
- [Castro et.al. (2002)] Castro, N.; Schein, J.; Park, C.; Galler, M.; Bushby, S. (2002). NISTIR 6964 – Results from Simulation and Laboratory Testing of Air Handling Unit and Variable Air Volume Box Diagnostic Tools. Gaithersburg: National Institute of Standards and Technology - Building Environment: Division Building and Fire Research Laboratory
- [COURAGE (2002)] Grob, R.; Harter, J.; Schmidt, M. & Bach, H. (2002). COURAGE – Computergestützte Überprüfung von bestehenden heiz- und raumluftechnischen Anlagen. Stuttgart: Universität Stuttgart – IKE Lehrstuhl für Heiz- und Raumluftechnik
- [Deeskow et. al. (2010)] Deeskow, P.; Mehrkens, C.; Artinger, G.; Lenz, E.; Edvardsson, E.; Wolf, J.; Faber, R; Handke, A. & Helming, J. (2010). EnEff: Wärme: Neue Lösungen zur Effizienzsteigerung bei Wartung und Verfügbarkeit von Fernwärmeerzeugungsanlagen – Gesamtbericht. Hamburg: Vattenfall Europe Wärme AG
- [DGQBand (2012)] Deutsche Gesellschaft für Qualität e.V. (2012). FMEA – Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse. Berlin, Wien, Zürich: Beuth Verlag GmbH
- [DIN EN 12831-1 (2017)] DIN-Normenausschuss Heiz- und Raumluftechnik sowie deren Sicherheit (NHRS), DIN-Normenausschuss Bauwesen (NABau) (2017). Energetische Bewertung von Gebäuden – Verfahren zur Berechnung der Norm-Heizlast – Teil 1: Raumheizlast, Modul M3-3;

Deutsche Fassung EN 12831-1:2017. Berlin: DIN Deutsches Institut für Normung e. V.

- [DIN EN 12977-3 (2018)] DIN-Normenausschuss Heiz- und Raumlufttechnik sowie deren Sicherheit (NHRS) (2018). Thermische Solaranlagen und ihre Bauteile – Kundenspezifisch gefertigte Anlagen – Teil 3: Leistungsprüfung von Warmwasserspeichern für Solaranlagen; Deutsche Fassung EN 12977-3:2018. Berlin: DIN Deutsches Institut für Normung e. V.
- [DIN EN 15232-1 (2017)] DIN Deutsches Institut für Normung e. V.. Energieeffizienz von Gebäuden – Teil 1: Einfluss von Gebäudeautomation und Gebäudemanagement. Berlin: DIN Deutsches Institut für Normung e. V. 2017.
- [DIN EN 15500-1] DIN Deutsches Institut für Normung e.V. (2010). DIN EN 15500-1:2017-09 Energieeffizienz von Gebäuden – Automation von HLK-Anwendungen Teil1: Elektronische Reglel- und Steuereinrichtungen für einzelne Räume oder Zonen. Berlin: DIN Deutsches Institut für Normung e.V.
- [DIN EN 60812 (2015)] DIN Deutsches Institut für Normung e.V. (2015). DIN EN 60812:08-2015 Fehlzustandsart- und -auswirkungsanalyse (FMEA). Berlin: DIN Deutsches Institut für Normung e.V.
- [DIN EN 81346-1] DIN Deutsches Institut für Normung e.V. (2010). DIN EN 81346-1:2010-05 Industrielle Systeme, Anlagen und Ausrüstungen und Industrieprodukte – Strukturierungsprinzipien und Referenzkennzeichnungen Teil1: Allgemeine Regeln. Berlin: DIN Deutsches Institut für Normung e.V.
- [DIN EN ISO 52000-1] DIN Deutsches Institut für Normung e.V. (2018). DIN EN ISO 52000-1:2018-03 Energieeffizienz von Gebäuden – Festlegung zur Bewertung der Energieeffizienz von Gebäuden Teil1: Allgemeiner Rahmen und Verfahren. Berlin: DIN Deutsches Institut für Normung e.V.
- [DIN EN ISO 52003-1] DIN Deutsches Institut für Normung e.V. (2018). DIN EN ISO 52003-1:2018-03 Energieeffizienz von Gebäuden – Indikatoren, Anforderungen, Kennwerte und Ausweise Teil1: Allgemeine Aspekte und Anwendung auf die Gesamtenergieeffizienz. Berlin: DIN Deutsches Institut für Normung e.V.
- [DIN EN ISO 9000] DIN Deutsches Institut für Normung e.V. (2019). DIN EN ISO 9000:2015-11 Qualitätsmanagementsysteme – Grundlagen und Begriffe. Berlin: DIN Deutsches Institut für Normung e.V.
- [DIN EN ISO 16757-1 (2019)] Datenstrukturen für elektronische Produktkataloge der Technischen Gebäudeausrüstung - Teil 1: Konzepte, Architektur und Modelle (ISO 16757-1:2015); Deutsche Fassung EN ISO 16757-1:2019. Berlin: DIN Deutsches Institut für Normung e. V. 2019.

- [DIN EN ISO 16757-2 (2019)] Datenstrukturen für elektronische Produktkataloge der Technischen Gebäudeausrüstung - Teil 2: Geometrie (ISO 16757-2:2016); Deutsche Fassung EN ISO 16757-2:2019. Berlin: DIN Deutsches Institut für Normung e. V. 2019.
- [DIN ISO 17359 (2018)] DIN Deutsches Institut für Normung e.V. (2018). DIN EN 17359:05-2018 Zustandsüberwachung und -diagnostik von Maschinen – Allgemeine Anleitungen. Berlin: DIN Deutsches Institut für Normung e.V.
- [DIN V 18599 Bl. 11 (2018)] DIN Deutsches Institut für Normung e. V.. Energetische Bewertung von Gebäuden – Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung – Teil 11: Gebäudeautomation. Berlin: DIN Deutsches Institut für Normung e. V. 2018.
- [Ebel et. al. (2003)] Ebel, W.; Großklos, M.; Knissel, J.; Loga, T. & Müller, K. (2003). Wohnen in Passiv- und Niedrigenergiehäusern - Eine vergleichende Analyse der Nutzfaktoren am Beispiel der 'Gartenhofsiedlung Lummerlund' in Wiesbaden-Dotzheim. Darmstadt: Institut Wohnen und Umwelt
- [Eberlin et. al. (2014)] Eberlin, S.; Hock, B. (2014). Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit technischer Systeme – Eine Einführung in die Praxis. Springer Vieweg. Wiesbaden
- [Emmerich et. al. (2003)] Emmerich, W.; Georgescu, A.; Ginter, M.; Garrecht, H.; Huber, J.; Hildebrand, O.; König, A.; Laidig, M.; Gruber, E. & Jank, R. (2003). EnSan-Projekt Karlsruhe-Goerdelerstraße Integrale Sanierung auf Niedrigenergie-Standard unter Einschluss moderner Informations- und Regelungstechnik und Beeinflussung des Nutzerverhaltens. Karlsruhe: Volkswohnung Karlsruhe GmbH
- [Erhorn et. al. (2020)] Erhorn, Hans; Schade, Almuth; Eberl, Michael; Sinnesbirchler, Herbert; Kluttig-Erhorn, Heike (2020). Leitfaden. Handlungsempfehlungen zur Betriebskontrolle: Einfachmonitoring von Einfamilienhäusern. Aachen: Wissenschaftliche Begleitforschung Energiewendebauen RWTH Aachen University
- [Erhorn et. al. (2021)] Erhorn, Hans; Reiß, Johann; Kluttig-Erhorn, Heike (2021). Leitfaden. Handlungsempfehlungen zur Integration des Monitorings in die Planungs- und Ausführungsprozesse
- [Feist et. al. (2003)] Feist, W.; Peper, S. & Schnieders, J. (2003). Wissenschaftliche Begleitung, Qualitätssicherung und Messdatenauswertung beim Projekt "Fabrik als Passivhaus" - Endbericht. Darmstadt: Passivhaus Institut
- [Fisch et. al. (2005)] Fisch, N.; Rozynski, M.; Gerder, F.; Ellermann, J. & Brügger, A. (2005). Abschlussbericht F+E-Vorhaben Neubau Informatikzentrum der TU Braunschweig. Braunschweig: Institut für Gebäude und Solartechnik.

- [Fisch et. al. (2013)] Fisch, N., Plesser, S., Bockelmann, F., Brave, L., Büchner, A., Diedrich, A., Hein, A., Kuchen, E., Langehein, H., Rehbein, C., Rumpe, B., Pinkernell, C., Gülke, T., Kurpick, T., Look, M., Navarro-Perez, A., Rendel, H., Hildebrandt, R., Tran, M., Uzunov, M.: Der Energie-Navigator. Forschungsbericht. Braunschweig 2013.
- [Görres et. al. (2007)] Görres, J.; Erhorn-Kluttig, H.; Reiß, J.; de Boer, J.; Erhorn, H.; König, A. & Kühnle, P. (2007). Kohlendioxid-Emissions-Reduktion im Altenzentrum Sonnenberg (KORIAS) - Erarbeitung und Realisierung eines modellhaften Sanierungskonzepts für ein Alten- und Pflegeheim in Stuttgart-Sonnenberg: Stuttgart: Fraunhofer-Institut für Bauphysik
- [Gropp et. al. (2003)] Gropp, T.; Klingele, M.; Schindler, H.; Wagner, A. & Wambsganß, M. (2003). „DB Hamm“ Niedrigenergie-Verwaltungsgebäude in Hamm (Westfalen) für die Deutsche Bahn AG - Geschäftsbereich Netz. Karlsruhe: Universität Karlsruhe – Fachgebiet Bauphysik und technischer Ausbau
- [Großklos et. al. (2008)] Großklos, M.; Diefenbach, N.; Enseling, A.; Lohmann, G. & Hacke, U. (2008). Sanierung von drei kleinen Wohngebäuden in Hofheim - Endbericht Gesamtvorhaben. Darmstadt: Institut Wohnen und Umwelt
- [Hauser et. al. (2004)] Hauser, G.; Schlegel, K.; Heide, M. & Leineweber, R. (2004). Messtechnische Begleitung und Evaluierung des Neubaus des Verwaltungsgebäudes der Fa. Pollmeier in Creuzburg. Kassel: Zentrum für Umweltbewusstes Bauen e.V.
- [Hausladen et. al. (2007)] Hausladen, G.; Ehlers, M.; Ghazai, F.; Wissel, S. & Schuster, K. (2007). Energieoptimiertes Bauen, Teilkonzept 3: Energetische Optimierung, Messprogramm und Dokumentation für den Neubau einer Behindertenwerkstätte der Lebenshilfe Lindenberg. München: Technische Universität München: Lehrstuhl für Bauklimatik und Haustechnik
- [Hesse (2019)] Hesse, L. (2019) Verfahrensentwicklung zur Bewertung von Fehlerzuständen in gebäudetechnischen Anlagen. Erfurt: Fachhochschule Erfurt – Institut für bauwerksintegrierte Technologien (IBIT)
- [HLH BIM (2022)] Schlütter, Dominik; Ihlenburg, Moritz; Zbočna, Maximillian. BIM-Methoden für die Integration der Planung in den Betrieb. Veröffentlicht in: HLH - Heizung, Lüftung, Klima, Haustechnik, 73 (1/2), 54-58, 2022
- [House et.al. (1999)] House, J.; Lee, W.; Shin, D. (1999). Classification techniques for fault detection and diagnosis of an air-handling unit. Chicago: ASHRAE – Technical symposium papers: Volume 105
- [House et.al. (2001)] House, J.; Vaezi-Nejad, H.; Whitcomb, J. (2001). An Expert Rule Set for Fault Detection in Air-Handling Units. ASHRAE Transactions: Volume 107, Part 1

- [House et.al. (2003)] House, J.; Schein, J.; Bushby, S.; Castro, N. (2003). NISTIR 6994 – Results from Field Testing of Air Handling Unit and Variable Air Volume Box Fault Detection Tools. Gaithersburg: National Institute of Standards and Technology - Building Environment: Division Building and Fire Research Laboratory
- [Hyvärinen et. al. (1996)] Hyvärinen, J. & Kärki, S. (1996). IEA ANNEX 25: Real Time Simulation of HVAC Systems for Building Optimisation, Fault Detection and Diagnosis – Building Optimization and Fault Diagnosis Source Book. Espoo: Technical Research Centre of Finland Building Technology
- [Isermann (1994)] Isermann, R. (1994). Überwachung und Fehlerdiagnose – Moderne Methoden und ihre Anwendung bei technischen Systemen. Düsseldorf: VDI-Verlag
- [Isermann (2011)] Isermann, R. (2011). Fault-Diagnosis Applications Model-Based Condition Monitoring: Actuators, Drives, Machinery, Plants, Sensors, and Fault-tolerant Systems. Berlin/Heidelberg: Springer-Verlag
- [Isermann & Ballé (1996)] Isermann, R. & Ballé, P. (2011). Trends in the application of model based fault detection and diagnosis of technical processes. Darmstadt: Technische Universität Darmstadt: Institute of Automatic Control, Laboratory of Control Engineering and Process Automation
- [Jagnow & Gebhardt (2018)] Jagnow, K. & Gebhardt, K. (2018). Enob EnEff Schule Neubai St. Franziskus Grundschule in Halle (Saale) als Nullenergiehaus in Holzbauweise – Abschlussbericht. Magdeburg: Hochschule Magdeburg/Stendal – Fachbereich Wasser, Bau, Umwelt und Sicherheit
- [Jin et.al. (2019)] Jin, B.; Li, D.; Srinivasan, S.; Ng, S.; Poolla, K.; Sangiovanni-Vincentelli, A. (2019). Detecting and Diagnosing Incipient Building Faults Using Uncertainty Information from Deep Neural Networks. San Francisco: 2019 IEEE International Conference on Prognostics and Health Management (ICPHM)
- [Katipamula & Brambley (2005)] Katipamula, S. & Brambley, M. (2005). Methods for Fault Detection, Diagnostics, and Prognostics for Building Systems – A Review, Part I. HVAC&R Research: Volume 11, Issue 1
- [Kappert et. al. (2005)] Kappert, M.; Krah, T.; Arnold, A. & Prechtel, C. (2005). Messprogramm und Evaluierung, Neubau Technologiezentrum Erfurt GmbH - Abschlussbericht. Erfurt: Fachhochschule Erfurt: Fachbereich Gebäudetechnik und Informatik
- [Kerschberger (2002)] Kerschberger, A; Ruff, S; Kaul, P.; Schmitz, U; Oetzel, M. & Annies, C. (2002). Neubau der Fachhochschule Bonn-Rhein-Sieg in Sankt Augustin. Stuttgart: RK-Stuttgart Architekten und Ingenieure
- [Kerschberger et.al. (2004)] Bentscheff; Brüggermann; Herz; Jödicke; Kerschberger; Kloos; Kreie; Schellhardt & Wegewitz. (2004) NIEDDRIGENERGIESANIERUNG ALBERT-SCHWEITZER-VIERTEL

- BERLIN-FRIEDRICHSHAEN Ein BMWA-gefördertes Modellbauvorhaben der KÖWOGÉ Köpenicker Wohnungsgesellschaft mbH. Berlin: KÖWOGÉ Köpenicker Wohnungsgesellschaft mbH.
- [KENWO (2007)]: Schmidt F et al.: Entwicklung eines kostengünstigen Energiemanagements für Wohn- und Bürogebäude auf Basis optimierter Energiekonzepte. Abschlussbericht, FKZ 0329828F. ennovatis GmbH, Großpößna, 2008
- [Kienzlen et. al. (2000)] Kienzler, V.; Erhorn, H.; Hellwig, R.; de Boer, J.; Claus, G.; Biegert, B.; Bacher, C. & Haller, R. (2000). Erarbeitung und Realisierung eines modellhaften Sanierungskonzeptes für eine Schule : MOSES ; Abschlußbericht Sanierung einer Schule MOSES - Abschlussbericht. Stuttgart: Amt für Umweltschutz
- [Kim & Braun (2015)] Kim, W. & Braun, J. (2015). Development and evaluation of virtual refrigerant mass flow sensors for fault detection and diagnostics. International Journal of Refrigeration: Volume 63
- [Knapp (2009)] Knapp, T. (2009). Regenerative Energieversorgung im Museumsbau: Monitoring und Betriebsoptimierung im Museum Ritter in Waldenbuch. Karlsruhe: Universität Karlsruhe - Fachgebiet Bauphysik & technischer Anlagenbau
- [Koenigsdorff & Heinrich (2008)] Heinrich, S. & Koenigsdorff, R. (2008). Wissenschaftliche Begleitung und messtechnische Evaluierung des Neubaus der Gebhard-Müller-Schule des Kreisberufsschulzentrums Biberach. Biberach: Hochschule Biberach
- [Li (2009)] Li, S. (2009). A Model-Based Fault Detection and Diagnostic Methodology for Secondary HVAC Systems – Dissertation. Philadelphia: University Drexel
- [Liu & Liu (2019)] Liu, Z. & Liu, X. (2019). Multi-PCA based Fault Detection Model Combined with Prior knowledge of HVAC. Changsha: College of energy and power engineering, Changsha University of Science and Technology und College of Civil engineering, Hunan University
- [Kleber et. al. (2009)] Kleber. M. & Wagner A. (2009). Revitalisierung des Haupthauses der Monitoring und Betriebsoptimierung im Rahmen von EnSan, Teilkonzept 3 KfW Bankengruppe in Frankfurt Abschlussbericht. Karlsruhe: Karlsruher Institut für Technologie
- [Kluttig-Erhorn (2020)] Kluttig-Erhorn, Heike; Erhorn, Hans; Reiß, Johann; Sinnesbirchler, Herbert; et. al. (2020). Messleitfaden. Messleitfaden für Demonstrationsvorhaben im Bereich „Energie in Gebäuden und Quartieren“. Aachen: Wissenschaftliche Begleitforschung Energiewendebauen RWTH Aachen University
- [Lambertz et. al. (2006)] Lambertz, M.; Klima, M.; Bähr, R. & Ranft, F. (2006). Energetische Sanierung der Käthe-Kollwitz-Schule in Aachen – Förderung

Energetische Verbesserung der Bausubstanz. Aachen: Stadt Aachen
– Abt. Gebäudemanagement

- [Lunze (2014)] Lunze, J. (2014). Regelungstechnik 1: Systemtheoretische Grundlagen, Analyse und Entwurf einschleifiger Regelungen. Berlin/Heidelberg: Springer-Verlag
- [Lunze (2016)] Lunze, J. (2016). Automatisierungstechnik – Methoden für die Überwachung und Steuerung kontinuierlicher und ereignisdiskreter Systeme. Berlin/Boston: Walter de Gruyter GmbH
- [Miara et. al. (2011)] Miara, M.; Günther, D.; Kramer, T.; Olterdorf, T. & Wapler, J. (2011). Wärmepumpen Effizienz: Messtechnische Untersuchung von Wärmepumpenanlagen zur Analyse und Bewertung der Effizienz im realen Betrieb. Freiburg: Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme
- [Müller et.al. (2015)] Müller, T.; Kruppa, K.; Lichtenberg, G.; Réhault, N. (2015). Fault detection with qualitative models reduced by tensor decomposition methods. Paris: 9th IFAC Symposium on Fault Detection, Supervision and Safety for Technical Processes SAFEPROCESS 2015
- [ModQS (2014)] Réhault, N., Ohr, F., Zehnle, S., Müller, T., Rist, T., Jacob, D., Lichtenberg, G., Pangalos, G., Kruppa, K., Schmidt, F., Zuzel, A., Harmsen, A., Sewe, E.: Modellbasierte Qualitätssicherung des energetischen Gebäudebetriebs (ModQS). Forschungsbericht. Freiburg 2014.
- [Niekamp et. al. (2017)] Niekamp, O.; Haroske, G.; Winkler, H.; Mainka, G.; Herkel, S.; Eicker, U. & von Stenglin, M. (2017). Energieoptimiertes Bauen: EnEFF-Schule: PLUS-Energie-Schule Rostock – Wissenschaftliche Begleitung des Modellprojektes Gymnasium NORD – Monitoring. Wismar: Hochschule Wismar – Kompetenzzentrum Bau Mecklenburg-Vorpommern
- [Nold (1994)] Nold, S. (1994). Fehlerdiagnose an Kreiselpumpen. In Isermann, R. (Hrsg.), Überwachung und Fehlerdiagnose – Moderne Methoden und ihre Anwendung bei technischen Systemen (209-221). Düsseldorf: VDI Verlag
- [OASE(2005)] Baumann, O; Bastin, D; Becker, R; Brandauer, G.; Domke, M.; Fingerholz, S.; Grampp, C.; Lahr; Mayr, A.; Messerschmidt, M.; Muschiolik, H.; Reiser, C.; Schmit, T.; Sieher, M.; Stadler, H.; Umpfenbach, M.; Ungerland, C.-G.; Wedeken, S. & Wiedemann, M. (2005). Energetische Verbesserung der Bausubstanz Teilprojekt 1: Optimierung der Automationsfunktionen betriebstechnischer Anlagen mit Hilfe der dynamischen Simulation als Energie-Management-System - OASE. München: Ebert-Ingenieure 2005.

- [OASE(2007)] von Roon, S., Gobmaier, T., Mauch, W.: OASE II – Durchführung eines Messprogrammes. Forschungsbereich. Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V. München 2007.
- [OASE(2008-1)] David, R., Baumann, O., Bensch, I., Domke, M., Ioannidis, M., Jensch, W., Kadar, P., Lahr, A., Messerschmidt, M., Reiser, C., Schmid, T., Siala, M., Stadler, H., Umpfenbach, M., Weinig A.: OASE II - Betriebsprognose und Betriebsdiagnose im Praxistest. Forschungsbericht. Ebert-Ingenieure GmbH & Co KG, München 2008.
- [OASE(2008-2)] Ioannidis, M.: OASE II - Betriebsprognose und Betriebsdiagnose im Praxistest. Teilprojekt: Funktionale Qualitätssicherung in der Gebäudetechnik – Methodik für die Erarbeitung, Fortschreibung, Umsetzung und Überprüfung funktionaler Betriebsstrategien von der Planung bis in den Betrieb. Forschungsbericht. makon GmbH & Co.KG, München 2008.
- [Pafferott et. al. (2002)] Pfafferott, J. & Herkel, S. (2002). Verwaltungsgebäude DB Netz AG in Hamm Abschlussbericht. Freiburg: Fraunhofer Institut Solare Energiesysteme
- [Plath (2009)] Plath, H. (2009). Entwicklung von automatisierbaren Regeln zur Fehlererkennung im heizungstechnischen Gebäudebetrieb - Dissertation. Rostock: Universität Rostock - Agrar- und Umweltwissenschaftliche Fakultät
- [Plesser (2013)] Plesser, S.: Aktive Funktionsbeschreibungen zur Planung und Überwachung des Betriebs von Gebäuden und Anlagen. Dissertation. Fakultät Architektur, Bauingenieurwesen und Umweltwissenschaften der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig 2013.
- [Plesser (2016)] Plesser, S., Görtgens, A., Ahrens-Hein, N., Houschka, D.: Forschungsbericht. Betriebsoptimierung in komplexen Nicht-Wohngebäuden. Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart 2016
- [Plesser (2020)] Plesser, Stefan. Qualitäts-Management in der Gebäudetechnik. Technisches Monitoring und Inbetriebnahmemanagement. Berlin, Offenbach: VDE Verlag GmbH
- [Provan et.al. (2009)] Provan, G.; Boubekour, M.; Ploennigs, J. (2009). Using BIM Data for Generating and Updating Diagnostic Models. Cork: University College Cork
- [REHVA (2019)] Plesser, Stefan; Teisen, Ole; Ryan, Cormac (2019). Qualitätsmanagement für Gebäude. Verbesserung der Gebäude-Performance durch Technisches Monitoring und Inbetriebnahmemanagement. Brüssel: REHVA
- [Röther et. al. (2015)] Röther, S. & Göttische, J. (2015). Science College Overbach Schueler heizen ihre Schule - Die Passivhausschule – Wissenschaftliche

- [Salsbury & Diamond (2001)] Salsbury, T. & Diamond, R. (2001). Fault detection in HVAC systems using model-based feedforward control. *Energy and Building*: Volume 33, Issue 4
- [Schein& Bushby (2005)] Schein, J. & Bushby, S. (2005). NISTIR 7216 – A Simulation Study of a Hierarchical, Rule-Based Method for System-Level Fault Detection and Diagnostics in HVAC Systems. Gaithersburg: National Institute of Standards and Technology - Building Environment: Division Building and Fire Research Laboratory
- [Schein et.al. (2006)] Schein, J.; Bushby, S.; Castro, N.; House, J. (2006). A rule-based fault detection method for air handling units. *Energy and Building*: Volume 38, Issue 12
- [Schulz, D. et. al. (2017)] Schulz, D., Knodt, D., Konietzny, S., Mock, M., Spindler, R.: MONALisa – Automatisiertes MONitoring, Alarming und Visualisieren von Sensordaten der technischen Gebäudeausrüstung zur Erschließung niedrig investiver Energieeinsparpotenziale. Forschungsbericht. Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart 2017.
- [Seem (2006)] Seem, J. (2006). Using intelligent data analysis to detect abnormal energy consumption in buildings. *Energy and Building*: Volume 39, Issue 1
- [Sewe (2018)] Sewe, E. (2018). OBSERVE Arbeitspaket B.3 Fehleranalyse. Hamburg: Plenum Ingenieurgesellschaft für Planung Energie und Umwelt m.b.H
- [Sewe (2018) -1] Sewe, E. (2018). Automatisierte Fehlererkennung in Heizungsanlagen – Dissertation. Dresden: Technische Universität Dresden – Fakultät Maschinenwesen
- [Smartmodule (2008)]: Kopetzky R. et al.: Entwicklung eines universellen, funkbasierten Gerätes, zur Messwertaufnahme und Übertragung per Funk oder MBus. Abschlussbericht, FKZ IW081028. Projektträger INNO-WATT EuroNorm GmbH, Störmthal 2009
- [Stockinger et. al. (2010)] Jensch, W.; Stockinger, V. & Grunewald, J. (2010). EINS Plusenergiesiedlung Ludmillawohnpark Landshut. München: Hochschule München – Competence Centre Energieeffiziente Gebäude & Dresden: Technische Universität Dresden – Institut für Bauklimatik
- [Struss et.al. (1996)] Struss, P.; Malik, A.; Sachenbacher, M. (1996). Qualitative modeling ist the key to automated diagnosis. München: Technical University of Munich
- [Tietjen et. al. (2011)] Tietjen, Thorsten; Decker, Andre; Müller, Dieter H. FMEA-Praxis. Das Komplettpaket für Training und Anwendung. München, Wien: Carl Hanser Verlag

- [van Treeck (2016)] van Treck, Christoph; Elixmann, Robert; Rudat, Klaus; Hiller, Sven; Herkel, Sebastian; Berger, Markus (2016). Gebäude. Technik. Digital. Building Information Modeling. Berlin Heidelberg: Springer Vieweg Verlag
- [VDA Band16] VDA-Verband der Automobilindustrie (2008). VDA Band 16 Qualitätsmanagement in der Automobilindustrie – Dekorative Oberflächen von Anbau- und Funktionsteilen im Außen- und Innenbereich von Automobilen. Frankfurt am Main: Heinrich Druck + Medien GmbH
- [VDI 3805 Bl. 1 – 8 (2004 – 2022)] Verein Deutscher Ingenieure e. V. Produktdatenaustausch in der TGA, Blatt 1 – 8. Düsseldorf: Verein Deutscher Ingenieure e. V., 2004 – 2022.
- [VDI3810-3 (2018)] Verein Deutscher Ingenieure e.V. (2018). Betreiben und Instandhalten von Gebäuden und gebäudetechnischen Anlagen. Heizungstechnische Anlagen. Düsseldorf: Verein Deutscher Ingenieure e.V. (VDI)
- [VDI6010-1 (2019)] Verein Deutscher Ingenieure e.V. (2019). VDI 6010-1:01-2019 Sicherheitstechnische Anlagen und Einrichtungen für Gebäude – Systemübergreifende Kommunikationsdarstellung. Düsseldorf: Verein Deutscher Ingenieure e.V. (VDI)
- [VDI 6010-3 (2020)] Verein Deutscher Ingenieure e.V. (2020). VDI 6010-1:01-2020 Sicherheitstechnische Anlagen und Einrichtungen für Gebäude – Vollprobetest.
- [VDI6028 (2021)] Verein Deutscher Ingenieure e.V. (2017). VDI 6028-1:04-2021 Bewertungskriterien für die technische Gebäudeausrüstung Grundlagen. Düsseldorf: Verein Deutscher Ingenieure e.V. (VDI)
- [VDI6041 (2017)] Verein Deutscher Ingenieure e.V. (2017). VDI 6041:07-2017 Technisches Monitoring von Gebäuden und gebäudetechnischen Anlagen. Düsseldorf: Verein Deutscher Ingenieure e.V. (VDI)
- [Venkatasubramanian et.al. (2002)] Venkatasubramanian, V.; Rengaswamy, R.; Yin, K.; Kavuri, S. (2002). A review of process fault detection and diagnosis Part I: Quantitative model-based methods. Computers & Chemical Engineering: 27
- [Voss & Engelmann (2008)] Voss, K. & Engelmann, P. (2008). Energieoptimiertes Bauen: Demonstrationsbauvorhaben Evaluierung eines Niedrigenergie- und Passivhauses in der Sanierung – „Neue Burse“, Wuppertal. Wuppertal: Bergische Universität Wuppertal – Fachbereich D, Abteilung Architektur Lehrgebiet Bauphysik und Technische Gebäudeausrüstung, b+tga
- [Voss et. al. (2016)] Voss, Karsten; Herkel, Sebastian; Kalz, Doreen; Lützkendorf Thomas;Maas, Anton; Wagner, Andreas. Performance von Gebäuden. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag

- [Wagner et. al. (2006)] Wagner, A.; Kleber, M. & Gropp, T. (2006). Neubau "Ostarkade" der KfW Bankengruppe, Frankfurt a.M. Monitoring und Betriebsoptimierung im Rahmen von SolarBau, Teilkonzept 3 – Abschlussbericht. Karlsruhe: Universität Karlsruhe - Fachgebiet Bauphysik und Technischer Ausbau
- [Werdich (2012)] Werdich, Martin (2012). FMEA – Einführung und Moderation. Durch systematische Entwicklung zur übersichtlichen Risikominimierung (inkl. Methoden im Umfeld). Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag / Springer Fachmedien
- [Wille et. al. (2004)] Wille, A.; John, R. & Vajen, K. (2004). Passiv-Verwaltungsgebäude Cölbe: Messtechnische Begleitung und systemtechnische Untersuchungen. Kassel: Universität Kassel – Institut für Thermische Energietechnik Fachbereich Solar und Anlagentechnik
- [Xiao & Wang (2003)] Xiao, F.; Wang, S. (2003). Commissioning of AHU sensors using principal component analysis method. Building Service Engineering: Volume 24, Issue 3
- [Yan et.al. (2014)] Yan, K.; Chen, W.; Mulumba, T.; Afshari, A. (2014). ARX model based fault detection and diagnosis for chillers using support vector machines. Energy and Building: Volume 81
- [Zhou et.al. (2009)] Zhou, Q.; Wang, S.; Ma, Z. (2009). A model-based fault detection and diagnosis strategy for HVAC systems. International Journal of Energy Research: Volume 33, Issue: 10
- [Zehnle, S. et. Al. (2019)] Forschungsbericht. OBSERVE: Optimierung und Betriebsführung komplexer Gebäudeenergieversorgungsanlagen. AP 1, Freiburg 2019, AP 2, Hamburg 2018, AP 6, Hamburg 2018, AP A3, Freiburg 2019, AP A4, Hamburg, 2018, AP A5, Berlin, 2018, AP B3, Hamburg, 2018, AP B4, Hamburg, 2018, AP B5, Hamburg, 2018.

Anhang

A1 Anmerkungen zur Datenbasis aus der Literaturrecherche

Die Art wie Fehler in den Dokumenten beschrieben werden unterscheidet sich stark voneinander. Oft wurden Fehler nur in Tabellen aufgelistet ohne genauere Angaben zur Gesamtanlage. Als Beispiel soll der Fehler „Betriebszeiten Pumpe“ nach [Sewe (2018)] Tabelle B-3 „Fehler der Kategorie Abstimmung Komponenten“ dienen. Die Beschreibung lautet „Nicht benötigte Pumpen werden nicht ausgeschaltet“. Dieser Fehler konnte den Gewerken Heizung, Kühlung, und Sanitär sowie der MSR zugeschrieben werden. Auch ist eine Eingrenzung auf den Anlagenteil Verteilung möglich. Aussagen zum Teilsystem (Zirkulation, Druckerhöhung, Beimischschaltung, Drosselschaltung, etc.) können jedoch nicht getroffen werden. Jedoch scheint es relativ eindeutig, dass eine Fehlerkategorie „Einstellung“ vorliegt, da mögliche Gründe für den Fehler fehlende Bedingungen für das Ausschalten der Pumpe sind (Betriebszeiten, Sommerabschaltung, Heizgrenztemperatur, usw.). Als Lebensphasen, bei denen sich der Fehler in eine Anlage einschleichen kann, wurde „Planung“, „Ausführung“, „Inbetriebnahme“ und „Wartung und Instandhaltung“ gewählt.

Handelt ein Bericht explizit von einem Gewerk werden die genannten Fehler nur dem behandelten Gewerk zugeteilt. So wurden die beispielsweise die Fehler aus [AMEV (2008)] nur den Gewerken RLT und MSR zugeordnet.

Die aus Monitoring-Berichten übernommenen Fehler konnten meist genauer zugeordnet werden, da dort meist mehr Angaben zu den verbauten Anlagekonfigurationen vorlagen.

Die recherchierte Datenbasis lässt sich nicht nutzen um quantitative Größen wie Fehlerhäufigkeiten abzuleiten, da die Anlagen, in denen die Fehler auftraten, nicht ausreichend genau dokumentiert sind (Anzahl und Betriebszeiten aller Komponenten sowie Fehlerzeiträume).

Je nach vorhandener Beschreibung eines Fehlerzustandes konnte auch eine Zuordnung zu mehreren Gewerken erfolgen. Die Fehlerbeschreibung der Quellen ließ oft keine eindeutige Zuordnung zu einzelnen Anlagenteilen zu. Daher sind auch Fehler erfasst, denen kein Anlagenteil zugeordnet ist. Fehler des Gewerkes MSR sind den jeweiligen Anlagenteilen auf Feldebene zugeordnet worden, welche angesteuert und geregelt werden sollen.

Die meisten Fehler konnten mehreren Lebensphasen zugeordnet werden. Fehler die während der Planung, Ausführung und Inbetriebnahme auftreten, können als Fehler der Anlagenerstellung zusammengefasst werden. Fehler während des Gebäudebetriebs, Wartung und Instandhaltung können als Fehler durch die Anlagennutzung zusammengefasst werden. Der Fokus des Forschungsprojektes MFGeb liegt auf Fehlern, die während der Anlagennutzung auftreten. Nicht alle aufgelisteten Fehler können eindeutig diesen Kategorien zugeteilt werden.

A2 Fehlerbewertung

A2-1: Tabelle zu Kriterien der Bedeutung

B	Auswirkung	Auswirkung auf				
		Gesamtanlage	Teilsystem mit hoher nötiger Verfügbarkeit	Teilsystem normal	Teilbereich mit hoher nötiger Verfügbarkeit	Teilbereich normal
10	Sehr hoch	Ausfall eines Systems das zum Verlust einer Hauptfunktion der gesamten Anlage führen kann (z.B. WE, u.U. Pufferspeicher, WE-Pumpe, Heizkreis bei Gebäude mit nur einem Heizkreis...)	Ausfall eines Teilsystems der zum Verlust einer Funktion in einem Anlagenteil führen kann, welcher stets verfügbar sein muss (z.B. Kühlkreis Lebensmittellager, Heizkreis Museum mit empfindlichen Exponaten, Heizkreis Krankenhaus)			
9					Ausfall eines begrenzten Abschnitts eines Teilsystems der zum Verlust einer Funktion in einem begrenzten Abschnitt führen kann, welcher stets verfügbar sein muss (z.B. Übergabe in einem Museumsraum mit empfindlichen Exponaten)	

B	Auswirkung	Auswirkung auf				
		Gesamtanlage	Teilsystem mit hoher nötiger Verfügbarkeit	Teilsystem normal	Teilbereich mit hoher nötiger Verfügbarkeit	Teilbereich normal
8	Hoch	Effizienzverschlechternde Fehler in der Erzeugung, Speicherung, Luftförderung sowie Luftkonditionierung		Ausfall eines Teilsystems der zum Verlust einer Funktion in einem Anlagenteil führen kann (z.B. Ein Heizkreis bei Gebäude mit mehreren Heizkreisen)		
7			Effizienzverschlechternde Fehler in der Verteilung oder hydraulischer Schaltung	Effizienzverschlechternde Fehler in der Verteilung oder hydraulischer Schaltung		
6	Mittel					Ausfall eines begrenzten Abschnitts eines Teilsystems der zum Verlust einer Funktion in einem begrenzten Abschnitt führen kann (z.B. Übergabe in einem Büroraum)
5					Effizienzverschlechternde Fehler in der Übergabe	Effizienzverschlechternde Fehler in der Übergabe
4						
3	Niedrig					
2						
1	Sehr niedrig					

A2-2: Tabelle zu Kriterien der Häufigkeit

H	Geschätzte Häufigkeit	Kriterien der Häufigkeit
10	Extrem hoch oder nicht bestimmbar	Häufigkeit des Auftretens ist unbekannt oder während der erwarteten Lebensdauer der Gesamtanlage inakzeptabel hoch
9	Hoch	Fehlerursache tritt wahrscheinlich sehr häufig während der erwarteten Lebensdauer der Gesamtanlage auf
8		Fehlerursache tritt möglicherweise häufig während der erwarteten Lebensdauer der Gesamtanlage auf
7	Mittel	Fehlerursache tritt möglicherweise häufiger während der erwarteten Lebensdauer der Gesamtanlage auf
6		Fehlerursache tritt möglicherweise weniger häufig während der erwarteten Lebensdauer der Gesamtanlage auf
5		Fehlerursache tritt möglicherweise gelegentlich während der erwarteten Lebensdauer der Gesamtanlage auf
4	Niedrig	Fehlerursache tritt möglicherweise gelegentlich während der erwarteten Lebensdauer der Gesamtanlage auf. Voraussichtlich mindestens zehn Vorkommnisse während des Gebrauchs
3	Sehr niedrig	Fehlerursache tritt voraussichtlich in Einzelfällen während der erwarteten Lebensdauer der Gesamtanlage auf. Voraussichtlich höchstens zehn Vorkommnisse während des Gebrauchs. Kann akzeptabel sein, wenn die Fehlerfolgen nicht die Einhaltung von Vorgaben betreffen,
2	Extrem niedrig	Fehlerursache tritt voraussichtlich während der erwarteten Lebensdauer der Gesamtanlage nicht auf. Eine Begründung erfolgt auf Basis von Vermeidungs- und Entdeckungsmaßnahmen und Felderfahrung mit ähnlichen Bauteilen. Einzelfälle können nicht ausgeschlossen werden. Kein Beweis für das Nichtauftreten.
1	Auftreten ausgeschlossen	Fehlerursache kann während der erwarteten Lebensdauer der Gesamtanlage nicht auftreten oder ist praktisch ausgeschlossen. Nichtauftreten des Fehlers ist nachgewiesen. Begründung ist dokumentiert

A2-3: Tabelle zu Bewertung der Häufigkeit nach Komponenten

		Daten aus VDI 2067		Häufigkeit H anhand Nutzungsdauer und Aufwand W&I		
Komponente		Nutzungs-dauer	Aufwand W&I	Häufigkeit anhand Nutzungsdauer	Häufigkeit anhand Aufwand W&I	arithmetisches Mittel
		[a]	[%/a]	[-]		
Heizung						
Heizkörper	Gussradiator	40	1	3,6	1,6	3
	Stahlradiator	35	1	4,4	1,6	3
	Platten-HK	30	1	5,2	1,6	3
	FBH	50	1	2,0	1,6	2
	Thermostatventil	15	1,5	7,6	1,9	5
	Thermostatventil mit Hilfsenergie	10	2,5	8,4	2,5	5
Pumpen	Fundamentpumpe	18	3	7,1	2,8	5
	Umwälzpumpe	15	2,5	7,6	2,5	5
	Strahlpumpe	20	2,5	6,8	2,5	5
Druckhaltung	MAG	15	2	7,6	2,2	5
Mess und Regelgeräte		15	3	7,6	2,8	5
Rohrleitung	Stahl Heizung	40	1	3,6	1,6	3
	Kupfer	35	0,5	4,4	1,3	3
	Kunststoff	30	0,5	5,2	1,3	3
	Dämmung	30 ³	1	5,2	1,6	3
Pufferspeicher ⁴	direkt und indirekt	20	1	6,8	1,6	4
Erzeugung	Gas BWK <100 kW	18	3	7,1	2,8	5
	Gas BWK >100 kW	20	2,5	6,8	2,5	5
	Pellet/Hackschnitzel	15	6	7,6	4,6	6
	WP Luft/Wasser	18	2,5	7,1	2,5	5
	WP Wasser/Wasser Sole/Wasser	20	2,5	6,8	2,5	5
	BHKW	15	8	7,6	5,8	7
	Solarthermie Flachkollektor	20	1,5	6,8	1,9	4
	Solarthermie Vakuumröhren	18	1,5	7,1	1,9	5
WÜ	Heizwasser	20	2	6,8	2,2	5
	Heizwasser/Trinkwasser	15	2	7,6	2,2	5
	Platten-WÜ	20	2	6,8	2,2	5
	HAST indirekt	20	3	6,8	2,8	5
RLT						

³ Wert gegenüber VDI 2067 von 25 auf 30 a erhöht. Dämmung soll so lange, wie die dazugehörige Rohrleitung genutzt werden, also mindestens 30 a

⁴ Heizungspufferspeicher nicht in VDI 2067 aufgeführt. Gewählt: Nutzungsdauer wie TW-Speicher und Aufwand für W&I 1%/a

	Komponente	Daten aus VDI 2067		Häufigkeit H anhand Nutzungsdauer und Aufwand W&I		
		Nutzungs-dauer	Aufwand W&I	Häufigkeit anhand Nutzungsdauer	Häufigkeit anhand Aufwand W&I	arithmetisches Mittel
		[a]	[%/a]	[-]		
Übergabe	Luftdurchlass	20	1	6,8	1,6	4
Erhitzer	Elektro	15	2	7,6	2,2	5
	Wasser	20	2	6,8	2,2	5
	Dampf	20	2	6,8	2,2	5
WRG	Platten-WRG	20	12	6,8	8,2	8
	KVS	15	17	7,6	10	9
	Rotations-WRG	15	13	7,6	8,8	8
Kühler	Wasser	20	6	6,8	4,6	6
	Sole	20	6	6,8	4,6	6
Befeuchtung	Verdampfung	10	7	8,4	5,2	7
	Verdunstung	12	7	8,1	5,2	7
	Wasserdüse	15	7	7,6	5,2	6
Entfeuchtung	Kühler siehe oben					
	Adsorption/Adsorption	10	6	8,4	4,6	7
Filter	Grobfilter	1	0	9,8	1	5
	Feinfilter	0,5	0	9,9	1	5
	zu reinigender Filter	8	17	8,7	10	9
Ventilator	axial Riemeneinbau	18	13	7,1	8,8	8
	axial Direktantrieb	12	7	8,1	5,2	7
	radial	12	4	8,1	3,4	6
Schalldämpfer	Schalldämpfer	20	1	6,8	1,6	4
Kanal	Kanal	30	2	5,2	2,2	4
Kälte						
	Rohrleitung	40	1	3,6	1,6	3
	Dämmung	20	1	6,8	1,6	4
	Pumpen	10	2	8,4	2,2	5
	Armaturen	20	2,5	6,8	2,5	5
	Regelung	15	2,5	7,6	2,5	5
	Ausdehnungsgefäße	15	1,5	7,6	1,9	5
Erzeugung	Kompressions-KM	15	3,5	7,6	3,1	5
	Absorptions-KM	18	3	7,1	2,8	5
Übergabe	Direktverdampfer	12	4	8,1	3,4	6
Rückkühlwerke	Rückkühlwerke	20	3,5	6,8	3,1	5
Erdsonden	Erdsonden	50	3	2,0	2,8	2
Sanitär						
Armaturen	Absperr- und Drosselarmaturen	15	2	7,6	2,2	5
	Entnahme	10	2	8,4	2,2	5

	Komponente	Daten aus VDI 2067		Häufigkeit H anhand Nutzungsdauer und Aufwand W&I		
		Nutzungsdauer	Aufwand W&I	Häufigkeit anhand Nutzungsdauer	Häufigkeit anhand Aufwand W&I	arithmetisches Mittel
		[a]	[%/a]	[-]		
	Sicherungs- und Sicherheitsarmaturen	15	3	7,6	2,8	5
Rohrleitung	TW Kalt	40	1	3,6	1,6	3
	TW Warm Wasserqualität gut	30	2	5,2	2,2	4
	TW Warm Wasserqualität schlecht	15	3	7,6	2,8	5
	Dämmung	20	1	6,8	1,6	4
Mess und Regelgeräte	Mess und Regelgeräte	20	3	6,8	2,8	5
Pumpen	Zirkulation	10	3	8,4	2,8	6
Erzeugung	Dezentral Durchlauferhitzer elektrisch geregelt	15	2	7,6	2,2	5
	Dezentral Durchlauferhitzer elektrisch	12	2	8,1	2,2	5
	Dezentral Untertischgerät bis 80l	15	2	7,6	2,2	5
	Dezentral el. Speicher groß	20	3	6,8	2,8	5
	Dezentral Speicher mit Fremderwärmung	15	3	7,6	2,8	5
	Zentral TWW-Speicher	20	2	6,8	2,2	5
	Durchlauferhitzer	18	2	7,1	2,2	5
Wasseraufbereitung	Wasseraufbereitung	15	3	7,6	2,8	5
Gebäudeautomation						
Stellgeräte	für Ventile, Klappen, Hähne	10	12	8,4	8,2	8
	für Jalousie	10	11	8,4	7,6	8
	für Brandschutzklappen	10	15	8,4	10	9
	Frequenzumformer	5	25	9,2	10	10
Sensoren	Messwertgeber Temperatur, Feuchte, Druck	10	12	8,4	8,2	8
	Kontaktgeber Temperatur, Feuchte, Druck	10	12	8,4	8,2	8
	Sicherheitsbegrenzer Temperatur, Feuchte, Druck	5	25	9,2	10	10
Übertragung	Starkstrom	15	10	7,6	7	7
	Kleinspannung	15	10	7,6	7	7
	Bus	10	15	8,4	10	9
	Pneumatik	10	15	8,4	10	9
Verteilung	Steuerung	10	15	8,4	10	9
	USV	5	25	9,2	10	10
	Optimierungsgeräte	10	7	8,4	5,2	7
	Regler	10	15	8,4	10	9
	Schütze/Relais	10	10	8,4	7	8
Datenübertragung	Modem, Router, Switch, Bridge	5	11	9,2	7,6	8

	Komponente	Daten aus VDI 2067		Häufigkeit H anhand Nutzungsdauer und Aufwand W&I		
		Nutzungsdauer	Aufwand W&I	Häufigkeit anhand Nutzungsdauer	Häufigkeit anhand Aufwand W&I	arithmetisches Mittel
		[a]	[%/a]	[-]		
	DFÜ-Einrichtungen	5	21	9,2	10	10
	Gateway	5	20,5	9,2	10	10
	Multiplexer	5	15	9,2	10	10
	Bussysteme	10	5,5	8,4	4,3	6
	Mitnutzung EDV-Netzwerk	2	31	9,7	10	10
Datenverarbeitung	Server	5	22	9,2	10	10
	Eingabegerät	3	30,5	9,5	10	10
	Archiv-Speicher	5	22	9,2	10	10
	DFÜ-Einrichtungen	5	21	9,2	10	10
	Software, OS, Treiber, Datenbank	5	30	9,2	10	10
	Software für Regelung und Steuerung	10	15	8,4	10	9

A2-4: Tabelle zu Kriterien Monitoring (M)

M	Wirksamkeit der Monitoring-Maßnahmen und der Systemreaktionen	Monitoring Kriterien für die Sinneswahrnehmung	Systemreaktion Kriterien für menschliche Reaktion	Anwendung auf Gebäudetechnik
10	Unwirksam	Der Fehler kann nicht oder nicht innerhalb der Fehlerbehandlungszeit durch das System, den Betreiber oder einen Techniker erkannt werden	Keine Reaktion innerhalb der Fehlerbehandlungszeit	
9	Sehr niedrig	Der Fehler kann in relevanten Betriebssituationen fast nie erkannt werden. Überwachungsmaßnahmen mit niedriger Wirksamkeit, hoher Varianz oder hoher Unsicherheit. Minimale diagnostische Abdeckung	Die Reaktion durch das System, den Betreiber oder den Techniker tritt nicht zuverlässig innerhalb der Fehlerbehandlungszeit auf. Es ist möglicherweise nicht sichergestellt, dass die Reaktion durch das System, den Betreiber oder den Techniker innerhalb der Fehlertoleranzzeit erfolgt	Fehler, die die Effizienz verschlechtern und nur einen kleinen Teil der Anlage betreffen. (z.B. Übergabe in einem Raum)
8	Niedrig	Der Fehler kann in nur wenigen relevanten Betriebssituationen erkannt werden. Überwachungsmaßnahme mit niedriger Wirksamkeit, hoher Varianz oder hoher Unsicherheit. Geschätzte diagnostische Abdeckung < 60 %	Die Reaktion durch das System, den Betreiber oder den Techniker erfolgt möglicherweise nicht immer innerhalb der Fehlerbehandlungszeit	Fehler, die die Effizienz verschlechtern und ein Teilsystem der Anlage betreffen. (z.B. Verteilung oder hydraulischer Schaltung)
7	Mäßig niedrig	Geringe Wahrscheinlichkeit der Entdeckung des Fehlers durch das System, den Betreiber oder den Techniker innerhalb der Fehlerbehandlungszeit.	Geringe Wahrscheinlichkeit der Reaktion durch das System, den Betreiber oder den Techniker auf den entdeckten Fehler	Fehler, die die Effizienz verschlechtern und die mehrere Teilsysteme betrifft.

		Überwachungsmaßnahme mit niedriger Wirksamkeit, hoher Varianz oder hoher Unsicherheit. Geschätzte diagnostische Abdeckung > 60 %	innerhalb der Fehlerbehandlungszeit	
6	Mittel	Der Fehler wird vom System, dem Betreiber oder dem Techniker automatisch nur während des Anlagenstarts mit mittlerer Varianz innerhalb des Entdeckungszeitraums entdeckt. Geschätzte diagnostische Abdeckung > 90 %	Das automatische System, der Betreiber oder der Techniker können in vielen Betriebssituationen auf den entdeckten Fehler reagieren	
5	Mittel	Der Fehler wird vom System automatisch innerhalb der Fehlerbehandlungszeit mit mittlerer Varianz im Entdeckungszeitraum oder vom Betreiber/Techniker in sehr vielen Betriebssituationen entdeckt. Geschätzte diagnostische Abdeckung zwischen 90 % und 97 %	Das automatische System, der Betreiber oder der Techniker können in sehr vielen Betriebssituationen auf den entdeckten Fehler reagieren	
4	Mäßig hoch	Der Fehler wird vom System automatisch innerhalb der Fehlerbehandlungszeit mit geringer Varianz im Entdeckungszeitraum oder vom Betreiber/Techniker in den meisten Betriebssituationen entdeckt. Geschätzte diagnostische Abdeckung > 97 %	Das automatische System, der Betreiber oder der Techniker können in den meisten Betriebssituationen auf den entdeckten Fehler reagieren	Fehler, die zum Ausfall einer Hauptfunktion führen und nur einen kleinen Teil der Anlage betreffen. Der Fehler wirkt sich auf einen kleinen Nutzerkreis aus. (z.B. Übergabe in einem Raum)
3	Hoch	Der Fehler wird vom System automatisch innerhalb der Fehlerbehandlungszeit mit sehr geringer Varianz im Entdeckungszeitraum	Das System reagiert in den meisten Betriebssituationen automatisch innerhalb der Fehlerbehandlungszeit	Fehler die zum Ausfall eines Teilsystems führen. Ein begrenzter Nutzerkreis kann den Fehler bemerken.

		und sehr hoher Wahrscheinlichkeit entdeckt Geschätzte diagnostische Abdeckung > 99 %	t mit sehr geringer Varianz in der Systemreaktion und hoher Wahrscheinlichkeit auf den entdeckten Fehler	
2	Sehr hoch	Der Fehler wird vom System automatisch innerhalb der Fehlerbehandlungszeit mit sehr geringer Varianz im Entdeckungszeitraum und sehr hoher Wahrscheinlichkeit entdeckt Geschätzte diagnostische Abdeckung > 99,9 %	Das System reagiert in den meisten Betriebssituationen automatisch innerhalb der Fehlerbehandlungszeit mit sehr geringer Varianz in der Systemreaktion und sehr hoher Wahrscheinlichkeit auf den entdeckten Fehler	Fehler die zum Ausfall der Gesamtanlage führen. Nutzer/Betreiber/Techniker bemerken den Fehler schnell.
1	Zuverlässig und akzeptabel	Der Fehler wird vom System immer automatisch entdeckt. Geschätzte diagnostische Abdeckung signifikant höher als 99,9 %	Das System reagiert immer automatisch innerhalb der Fehlerbehandlungszeit auf den entdeckten Fehler	Fehler von Komponenten, die eine interne Fehlerdiagnose besitzen und selbstständig eine Fehlermeldung senden (z.B. Heizkessel) und Fehler, auf welche die Anlage selbstständig reagiert (z.B. Sicherheitsventil öffnet bei Überdruck).

A2-5: Tabelle zur Aufgabenpriorität

Auswirkung	B	Prognose des Auftretens der Fehlerursache während der Lebensdauer	H	Wirksamkeit der Überwachung	M	AP
Sehr große Auswirkung	10	Mittel – extrem hoch	5-10	Zuverlässig – unwirksam	1-10	H
		Niedrig	4	Mäßig hoch – unwirksam	4-10	H
				Sehr hoch – hoch	2-3	H
				Zuverlässig	1	M
		Sehr niedrig	3	Mäßig hoch – unwirksam	4-10	H
				Sehr hoch – hoch	2-3	M
				Zuverlässig	1	N
		Extrem niedrig	2	Mäßig hoch – unwirksam	4-10	M
				Zuverlässig – hoch	1-3	N
		kann nicht auftreten	1	Zuverlässig – unwirksam	1-10	N
Große Auswirkung	9	Niedrig – extrem hoch	4-10	Zuverlässig – unwirksam	1-10	H
		Extrem niedrig – sehr niedrig	2-3	Sehr hoch – unwirksam	2-10	H
				Zuverlässig – hoch	1	N
kann nicht auftreten	1	Zuverlässig – unwirksam	1-10	N		
Mäßig große Auswirkung	7-8	Mittel – extrem hoch	6-10	Zuverlässig – unwirksam	1-10	H
		Mittel	5	Mäßig hoch – unwirksam	5-10	H
				Zuverlässig – mäßig hoch	1-4	M
		Niedrig	4	Mäßig niedrig – unwirksam	7-10	H
				Mäßig hoch – mäßig	4-6	M
				Zuverlässig – hoch	1-3	N
		Sehr niedrig	3	Sehr niedrig – unwirksam	9-10	H
				Mäßig niedrig – niedrig	7-8	M
				Zuverlässig – mäßig	1-6	N
		Extrem niedrig	2	Mäßig niedrig – unwirksam	7-10	M
Zuverlässig bis mäßig	1-6			N		
kann nicht auftreten	1	Zuverlässig – unwirksam	1-10	N		
Mäßig niedrige Auswirkung	4-6	Hoch – extrem hoch	7-10	Zuverlässig – unwirksam	1-10	H
		Mittel	5-6	Mäßig – unwirksam	6-10	H
				Zuverlässig – mäßig hoch	1-5	M
		Sehr niedrig – niedrig	2-4	Sehr niedrig – unwirksam	9-10	M
				Mäßig hoch – mäßig	7-8	M
Zuverlässig – mäßig	1-6	N				
kann nicht auftreten	1	Zuverlässig – unwirksam	1-10	N		
Niedrige Auswirkung	2-3	Hoch – extrem hoch	7-10	Zuverlässig – unwirksam	1-10	H
		Mittel	5-6	Mäßig niedrig – unwirksam	7-10	M
				Zuverlässig – mäßig	1-6	N

		Sehr niedrig – niedrig	2-4	Zuverlässig – unwirksam	1-10	N
		kann nicht auftreten	1	Zuverlässig – unwirksam	1-10	N
Sehr niedrige Auswirkung	1	kann nicht auftreten – extrem hoch	1-10	Zuverlässig – unwirksam	1-10	N

A2-6: Anwendungsbeispiele zur Risikobewertung nach der Aufgabenpriorität

In der nachfolgenden Tabelle werden die vorrangigsten Festlegungen an allgemein gehaltenen Fehlern der Heizungsübergabe getestet. Fehler die zum Verlust der Heizfunktion einer Heizfläche führen haben eine mittlere Priorität. Leckagen der Heizflächen haben auf Grund ihrer Seltenheit und schnellen Erkennbarkeit eine niedrige bis mittlere Priorität. Fehler, die sich auf die Effizienz einer Heizfläche auswirken besitzen eine hohe Priorität da sie wahrscheinlich selten durch den Nutzer bemerkt werden.

Fehler	B	H	M	AP	Bemerkung
Ein Plattenheizkörper mit Thermostatventil bleibt kalt	6	5	4	M	Funktionsverlust in begrenzten Abschnitt: B=6 Thermostatventil H=5 Einfluss auf kleinen Nutzerkreis M=4
Ein Plattenheizkörper mit Thermostatventil stets geöffnet	5	5	9	H	Effizienzverschlechternder Fehler im kleine Abschnitt B=5 Thermostatventil H=5 Ineffizienz Übergabe M=9
Ein Plattenheizkörper hat eine Leckage	10	3	1-2	N - M	Wassermangel führt zum Funktionsverlust der Gesamtanlage B=10 Plattenheizkörper H=3 Fehler wird durch Nutzer schnell bemerkt M=2 oder Nachfülleinrichtung/WE gibt Fehlermeldung aus M=1
Ein Kreis der Fußbodenheizung mit Thermostatventil mit Hilfsenergie bleibt kalt	6	5	4	M	Funktionsverlust in begrenzten Abschnitt: B=6 Thermostatventil mit Hilfsenergie H=5 Einfluss auf kleinen Nutzerkreis M=4
Ein Kreis der Fußbodenheizung mit Thermostatventil mit Hilfsenergie stets geöffnet	5	5	9	H	Effizienzverschlechternder Fehler im kleine Abschnitt B=5 Thermostatventil mit Hilfsenergie H=5 Ineffizienz Übergabe M=9
Ein Kreis der Fußbodenheizung hat eine Leckage	10	2	1-2	N	Wassermangel führt zum Funktionsverlust der Gesamtanlage B=10 Fußbodenheizung H=2 Fehler wird durch Nutzer schnell bemerkt M=2 oder Nachfülleinrichtung/WE gibt Fehlermeldung aus M=1

In der nachfolgenden Tabelle wird die Aufgabenpriorität für Fehler der Heizungsverteilung bestimmt. Fehler, die die Funktion der Verteilung einschränken haben dabei eine niedrige bis hohe Priorität. Fehler durch Pumpen oder Regelventile, die die Effizienz verschlechtern haben eine hohe Priorität, während ineffizienzverschlechternde Fehler durch die Wärmedämmung nur eine mittlere Priorität besitzen.

Fehler	B	H	M	AP	Bemerkung
VL zu kalt Fehler durch 3-Wege-Ventil	8	5	3	M	Funktionsverlust in Teilsystem: B=8 Armatur/Mess- & Regelgerät H=5 Einfluss auf größeren Nutzerkreis M=3
Massestrom zu klein Fehler durch Pumpe	8	5	3	M	Funktionsverlust in Teilsystem: B=8 Pumpe H=5 Einfluss auf größeren Nutzerkreis M=3
Massestrom zu klein Fehler durch Rohrleitung	8	3	3	N	Funktionsverlust in Teilsystem: B=8 Rohrleitung H=3 Einfluss auf größeren Nutzerkreis M=3
Massestrom zu klein Fehler durch Armatur	8	5	3	M	Funktionsverlust in Teilsystem: B=8 Armatur allgemein H=5 Einfluss auf größeren Nutzerkreis M=3
VL zu warm Fehler durch 3-Wege-Ventil	7	5	8	H	Effizienzverschlechternder Fehler eines Teilsystems B=7 Armatur/Mess- & Regelgerät H=5 Ineffizienz eines Teilsystems M=8
Massestrom zu groß Fehler durch Pumpe	7	5	8	H	Effizienzverschlechternder Fehler eines Teilsystems B=7 Pumpe H=5 Ineffizienz eines Teilsystems M=8
Wärmeverlust in Verteilung Fehler durch Dämmung	7	3	8	M	Effizienzverschlechternder Fehler eines Teilsystems B=7 Dämmung H=3 Ineffizienz eines Teilsystems M=8

In der nachfolgenden Tabelle wird die AP an einem Speicher mit Rücklaufeinschichtung, der zeitgleich als hydraulische Weiche zwischen Wärmeerzeugern und Verteilungen dient, getestet. Fehler, die zum Funktionsverlust der Anlage führen können sind mit einer

hohen Priorität bewertet. Die Energieeffizienz verschlechternde Fehler auf Grund der Rücklaufeinschichtung besitzen ebenfalls eine hohe Priorität, wogegen der Dämmung nur eine mittlere zugewiesen wird.

Fehler	B	H	M	AP	Bemerkung
VL zu kalt Fehler durch Ventil Rücklaufeinschichtung	10	5	2	H	Funktionsverlust Gesamtanlage möglich: B=10 Armatur/Mess- & Regelgerät H=5 Einfluss auf gesamten Nutzerkreis M=2
Massestrom zu klein Fehler Pufferspeicher	10	4	2	H	Funktionsverlust Gesamtanlage möglich: B=10 Pufferspeicher H=4 Einfluss auf gesamten Nutzerkreis M=2
Effizienz verschlechtert Fehler durch Ventil Rücklaufeinschichtung	8	5	7	H	Effizienzverschlechternder Fehler Speicher: B=8 Armatur/Mess- & Regelgerät H=5 Ineffizienz wirkt sich auf mehrere Teilsysteme aus M=7
Effizienz verschlechtert Fehler durch Dämmung Pufferspeicher	8	3	7	M	Effizienzverschlechternder Fehler Speicher: B=8 Wärmedämmung H=3 Ineffizienz wirkt sich auf mehrere Teilsysteme aus M=7

In der nachfolgenden Tabelle wird die Aufgabenpriorität an einigen Fehlern möglicher Wärmeerzeugerkonstellationen getestet.

Gibt es nur einen Wärmeerzeuger sind die Aufgeführten Fehler mit einer hohen Priorität bewertet. Eine Ausnahme sind die Effizienz betreffende Fehler bei WE mit einer Fehlerhäufigkeit von H=5 oder weniger die selbstständig den Fehler erkennen können (AP= mittel). Gleiches gilt für Wärmepumpen die ebenfalls mit einer Fehlerhäufigkeit von H=5 bewertet sind.

Fehler durch ein BHKW in Verbindung mit weiteren WE sind mit einer hohen Priorität bewertet. Gleichen würde für Pellet-Kessel gelten.

Gibt es eine WE-Kaskade aus mehreren Brennwertkesseln sind Fehler, die der Kessel nicht selbst erkennt mit einer hohen Priorität bewertet. Wird ein Fehler durch den Kessel erkannt ist AP = mittel. Gleiches gilt für Wärmepumpen (H ebenfalls 5).

Gibt es eine Heizungsunterstützung durch Solarthermie sind Fehler, die nicht selbst erkannt werden mit einer hohen Priorität bewertet. Wird der Fehler automatisch erkannt ist die Priorität nur niedrig.

	Fehler	B	H	M	AP	Bemerkung
WE aus einem Brennwertkessel	VL zu kalt Fehler durch Gas-BWK	10	5	2	H	Funktionsverlust Gesamtanlage möglich: B=10 Gas-BWK H=5 Einfluss auf gesamten Nutzerkreis M=2
	VL zu kalt Fehler durch Gas-BWK Fehler automatisch erkannt	10	5	1	H	Funktionsverlust Gesamtanlage möglich: B=10 Gas-BWK H=5 Fehlermeldung BWK M=1
	Massestrom zu klein Fehler durch Pumpe des Gas-BWK	10	5	2	H	Funktionsverlust Gesamtanlage möglich: B=10 Pumpe H=5 Einfluss auf gesamten Nutzerkreis M=2
	Effizienz verschlechtert Fehler durch Gas-BWK	8	5	7	H	Effizienz WE verschlechtert B=8 Gas-BWK H=5 Betrifft angeschlossene Teilsysteme M=7
	Effizienz verschlechtert Fehler durch Gas-BWK Fehler automatisch erkannt	8	5	1	M	Effizienz WE verschlechtert B=8 Gas-BWK H=5 Fehlermeldung BWK M=1
WE aus einem Pellet- Kessel	VL zu kalt Fehler durch Pellet-Kessel	10	6	2	H	Funktionsverlust Gesamtanlage möglich: B=10 Pellet-Kessel H=6 Einfluss auf gesamten Nutzerkreis M=2

	VL zu kalt Fehler durch Pellet-Kessel Fehler automatisch erkannt	10	6	1	H	Funktionsverlust Gesamtanlage möglich: B=10 Pellet-Kessel H=6 Fehlermeldung Pellet- Kessel M=1
	Massestrom zu klein Fehler durch Rücklaufanhebung eines Pellet- Kessels	10	5	2	H	Funktionsverlust Gesamtanlage möglich: B=10 Armatur/Regeleinrichtung H=5 Einfluss auf gesamten Nutzerkreis M=2
	Effizienz verschlechtert Fehler durch Pellet-Kessel	8	6	7	H	Effizienz WE verschlechtert B=8 Pellet-Kessel H=6 Betrifft angeschlossene Teilsysteme M=7
	Effizienz verschlechtert Fehler durch Pellet-Kessel Fehler automatisch erkannt	8	6	1	H	Effizienz WE verschlechtert B=8 Pellet-Kessel H=6 Fehlermeldung Pellet- Kessel M=1
WE aus BHKW und weiteren Kessel	VL zu kalt Fehler durch BHKW – weitere WE vorhanden	8	7	7	H	Effizienz Teilsystem WE herabgesetzt und weniger Stromproduktion B=8 BHKW H=7 Betrifft mehrere Teilsysteme M=7
	VL zu kalt Fehler durch BHKW – weitere WE vorhanden Fehler automatisch erkannt	8	7	1	H	Effizienz Teilsystem WE herabgesetzt und weniger Stromproduktion B=8 BHKW H=7 Betrifft mehrere Teilsysteme M=7 Fehlermeldung BHKW M=1

	Massestrom zu klein Fehler durch Pumpe des BHKW – weitere WE vorhanden	8	5	7	H	Effizienz Teilsystem WE herabgesetzt und weniger Stromproduktion B=8 Pumpe H=5 Betrifft mehrere Teilsysteme M=7
	Effizienz verschlechtert Fehler durch BHKW – weitere WE vorhanden	7	7	8	H	Effizienz Teilsystem WE herabgesetzt B=7 BHKW H=5 Betrifft Teilsystem M=8
	Effizienz verschlechtert Fehler durch BHKW – weitere WE vorhanden Fehler automatisch erkannt	7	7	1	H	Effizienz Teilsystem herabgesetzt B=7 BHKW H=5 Fehlermeldung BHKW M=1
WE aus Brennwertkessel und weiteren Kessel	VL zu kalt Fehler durch Gas-BWK – weitere WE vorhanden	8	5	7	H	Effizienzverschlechternder Fehler: B=8 Gas-BWK H=4 Betrifft ggf. mehrere Teilsysteme M=7
	VL zu kalt Fehler durch BHKW – weitere WE vorhanden Fehler automatisch erkannt	8	5	1	M	Effizienzverschlechternder Fehler: B=8 Gas-BWK H=4 Fehlermeldung Kollektor M=1
	Effizienz verschlechtert Fehler durch Gas-BWK – weitere WE vorhanden	7	5	8	H	Effizienz Teilsystem herabgesetzt B=7 Gas-BWK H=4 Betrifft Teilsystem M=8
	Effizienz verschlechtert Fehler durch Gas-BWK – weitere WE vorhanden Fehler automatisch erkannt	7	5	1	M	Effizienz Teilsystem herabgesetzt B=7 Gas-BWK H=4 Fehlermeldung Kollektor M=1
WE aus Kessel	VL zu kalt Fehler durch Flachkollektor – weitere WE vorhanden	8	4	8	H	Effizienzverschlechternder Fehler: B=8 Flachkollektor H=4

						Betrifft Teilsystem M=8
VL zu kalt Fehler durch Flachkollektor – weitere WE vorhanden Fehler automatisch erkannt	8	4	1	N		Effizienzverschlechternder Fehler: B=8 Flachkollektor H=4 Fehlermeldung Kollektor M=1
Massestrom zu klein Fehler durch Pumpe des Flachkollektor – weitere WE vorhanden	8	5	8	H		Effizienzverschlechternder Fehler: B=8 Pumpe H=5 Betrifft Teilsystem M=8
Effizienz verschlechtert Fehler durch Flachkollektor – weitere WE vorhanden	7	4	8	H		Effizienz Teilsystem herabgesetzt B=7 Flachkollektor H=4 Betrifft Teilsystem M=8
Effizienz verschlechtert Fehler durch Flachkollektor – weitere WE vorhanden Fehler automatisch	7	4	1	N		Effizienz Teilsystem herabgesetzt B=7 Flachkollektor H=4 Fehlermeldung Kollektor M=1

A4 Versuchsreihen

A4-1: Versuchsreihen Heizungsanlage im Musterhaus Zwickau

Keine Wärmeanforderung (bezogen auf Heizkreis FBH, RLT und WW)						Test durchgeführt	Von - Bis						
Beschreibung						Priorität aus FMEA	Aufgewendete Zeit	Manipuliert durch	x = pass/ - = fail	Startzeit	Endzeit		
Test Funktionen bei Heizen AUS (Sommerbetrieb)	F01	erhöhte Betriebszeiten Pumpe Heizkreis	F.01.01	[P-HP] = EIN & [MV-HF] geschlossen									
	F.01.02		[P-HP] = EIN & [MV-HF] offen										
	F02	erhöhte Betriebszeiten Pumpe Wärmeerzeugerkreis	F.02.01	[P-WP] = EIN & Speicher WW geladen									
	F.02.02		[P-SK] = EIN & Speicher WW geladen										
F03	Durchgangsventil Heizkreis schließt nicht	F.03.01	[MV-HL] = OFFEN & keine Wärmeanforderung Lufterhitzer										
Wärmeanforderung (Speicher + Heizkreise + Warmwasserbereitung (ggf. noch in einzelne Betriebszustände unterteilen))						Test durchgeführt	Von - Bis		Bezeichnung Diadem Datei	Logging Backup			
Beschreibung						Priorität aus FMEA	Aufgewendete Zeit [TT:hh:mm]	Manipuliert durch	x = pass/ - = fail	Startzeit	Endzeit		
F01	Heizkreis - Dreiwegeventil - keine Stellfunktion	F01.01	[DV-HF] = 0% RL Beimischung	M	01:00:56		x	15.3.21 7:26	16.3.21 8:22	Versuchsreihen Heizung bis 160321	Backup vom 16.3.2021		
		F01.02	[DV-HF] = 50% RL Beimischung	M-H	03:00:00		x	12.3.21 7:26	15.3.21 7:26	Versuchsreihen Heizung bis 160321	Backup vom 16.3.2022		
		F01.03	[DV-HF] = 100% RL Beimischung	H	00:11:52		x	18.2.21 8:00	18.2.21 19:52	Versuchsreihen Heizung bis 160321	Backup vom 18.2.2021		
F02	Heizkreis - Dreiwegeventil - Stellbereich eingeschränkt	F02.01	[DV-HF] = +10% Offset (oberer Stellbereich eingeschränkt)	H	00:23:15		x	11.3.21 8:11	12.3.21 7:26	Versuchsreihen Heizung bis 160321	Backup vom 16.3.2022		
		F02.02	[DV-HF] = +20% Offset	H	00:23:10		x	24.3.21 10:39	25.3.21 9:49	Versuchsreihen Heizung bis 260321	Backup vom 26.3.2021		
		F02.03	[DV-HF] = -10% Offset (unterer Stellbereich eingeschränkt)	M	01:00:57		x	6.4.21 7:32	7.4.21 8:29	Versuchsreihen Heizung bis 090421	Backup vom 09.4.2020		
		F02.04	[DV-HF] = -20% Offset	M	02:00:01		x	7.4.21 8:29	9.4.21 8:30	Versuchsreihen Heizung bis 090421	Backup vom 09.4.2021		
		F02.05	optional: [DV-HF] = +30% Offset	H	00:00:00								
		F02.06	optional: [DV-HF] = -30% Offset	M	00:00:00								
F03	Heizkreis - erhöhter Druckverlust	F03.01	Kugelhahn Druckseite Pumpe = -25% (Durchfluss)	M	00:00:00								
		F03.02	Kugelhahn Druckseite Pumpe = -50% (Durchfluss)	M	01:01:36		x	3.3.22 9:20	4.3.22 10:56				
F04	Speicher (Links) - kein Durchfluss	F04.01	[MV-PS1] = geschlossen, Heizstab EIN	M	01:00:11		x	7.3.22 8:30	8.3.22 8:41				
		F04.02	[MV-PS1] = geschlossen, Heizstab AUS	M	00:00:00								
F05	Speicher (Links) - verringerter Durchfluss	F05.01	[MV-PS1] = -25% (Durchfluss), Heizstab EIN	M	00:00:00								
		F05.02	[MV-PS1] = -50% (Durchfluss), Heizstab EIN	M	01:00:04		x	8.3.22 8:41	9.3.22 8:45				
		F05.03	[MV-PS1] = -25% (Durchfluss), Heizstab AUS	M	00:00:00								
		F05.04	[MV-PS1] = -50% (Durchfluss), Heizstab AUS	M	00:00:00								
F06	Speicher (Rechts) - kein Durchfluss	F06.01	[MV-PS2] = geschlossen, Heizstab EIN, Heizbetrieb	M	00:03:35								
		F06.02	[MV-PS2] = geschlossen, Heizstab EIN, Sommerbetrieb	M	00:00:00								
		F06.03	[MV-PS2] = geschlossen, Heizstab AUS, Sommerbetrieb	M	00:00:00								
F07	Speicher (Rechts) - verringerter Durchfluss	F07.01	[MV-PS2] = -25% (Durchfluss), Heizstab EIN	M	00:00:00								
		F07.02	[MV-PS2] = -50% (Durchfluss), Heizstab EIN	M	00:00:00								
		F07.03	[MV-PS2] = -25% (Durchfluss), Heizstab AUS	M	00:00:00								
		F07.04	[MV-PS2] = -50% (Durchfluss), Heizstab AUS	M	00:00:00								
F08	Wärmepumpe - Wärmesenke - verringerter Durchfluss	F08.01	[P-WP] = -25% Sollwert Durchfluss	H	00:00:00								
		F08.02	[P-WP] = -50% Sollwert Durchfluss	H	01:03:23		x	4.4.22 8:41	5.4.22 12:04				
		F08.03	[P-WP] = AUS	H	00:00:00								
F09	Wärmepumpe - Wärmequelle - verringerter Durchfluss	F09.01	[P-SK] = -25% Sollwert Durchfluss	H	00:00:00								
		F09.02	[P-SK] = -50% Sollwert Durchfluss	H	01:01:02		x	5.4.22 12:04	6.4.22 13:06				
		F09.03	[P-SK] = AUS	H	00:00:00								
F10	Wärmepumpe - keine Funktion (AUS bei Anforderung EIN)	F10.01	WP manuell AUS, Heizstab inaktiv, [P-WP] = EIN	M	00:00:00								
		F10.02	WP manuell AUS, Heizstab aktiv, [P-WP] = EIN	H	00:00:00								
F11	Wärmepumpe - Wärmesenke - erhöhter Durchfluss	F11.01	[P-SK] = +50% (Bzw Maximum) Sollwert Durchfluss	H	01:01:35								
F12	Fehlzirkulation - falsche Ventilstellung	F12.01	[MV-NCF] = Offen	H	00:00:00								
		F12.02	[MV-NCF] = Offen & [ZV-NCS & MV-NCS] = Offen	H	00:00:00								

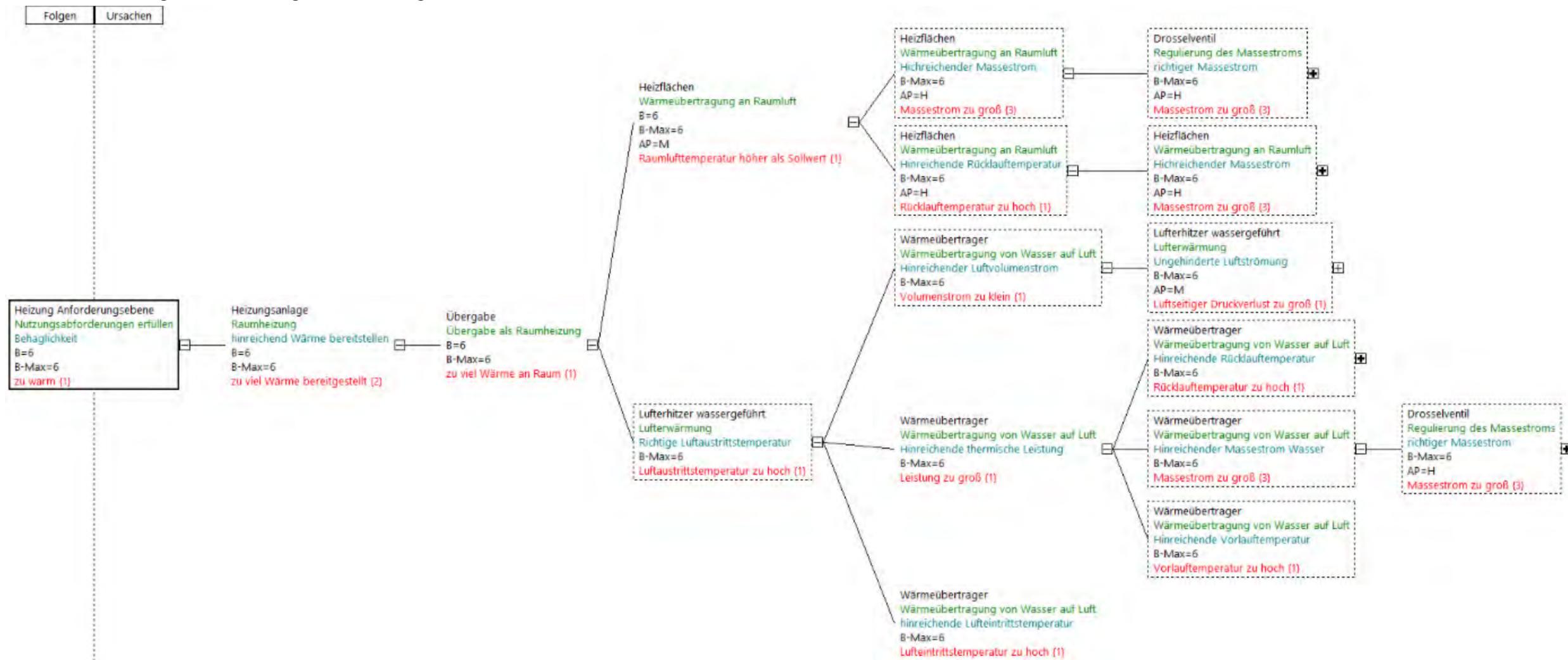
A4-2: Versuchsreihen Lüftungsanlage im Musterhaus Zwickau

Kein Lüftungsbetrieb						Test durchgeführt	Datum	Von - Bis	
Beschreibung			Aufgewendete Zeit	Manipuliert durch	x = pass/ - = fail			Startzeit	Endzeit
Test nicht Lüften	Klappen geöffnet	AUL-Klappe 100%	00:15	Multigrig	x	10.08.2020	13:30	13:45	
		FOL-Klappe 100%	00:25	Multigrig	x	10.08.2020	13:46	14:11	
	Ventilatoren dennoch an	ABL-Ventilator-Drehzahl-Sollwert (0%) plus 25%	00:12	Multigrig	x	10.08.2020	14:12	14:24	
ZUL-Ventilator-Drehzahl-Sollwert (0%) plus 25%		00:13	Multigrig	x	10.08.2020	14:24	14:37		
Lüftungsbetrieb						Test durchgeführt	Datum	Von - Bis	
Beschreibung			Aufgewendete Zeit	Manipuliert durch	x = pass/ - = fail			Startzeit	Endzeit
Test Lüftung	Klappe geschlossen	AUL-Klappe 0%	00:38	Multigrig	x	10.08.2020	14:57	15:33	
		FOL-Klappe 0%	00:35	Multigrig	x	10.08.2020	15:35	16:10	
	Ventilator aus	ZUL-Ventilator 0%	00:37	Multigrig	x	11.08.2020	09:01	09:38	
		ABL-Ventilator 0%	00:36	Multigrig	x	11.08.2020	09:38	10:14	
	Ventilator hat eine Minderleistung	ZUL-Ventilator-Drehzahl-Sollwert (ca. 50%) minus 25%	00:06	Multigrig	x	11.08.2020	10:17	10:23	
		ABL-Ventilator-Drehzahl-Sollwert (ca. 50%) minus 25%	00:30	Multigrig	x	11.08.2020	11:16	11:46	
	Ventilator hat eine Überlast	ZUL-Ventilator-Drehzahl-Sollwert (ca. 50%) plus 25%	00:50	Multigrig	x	11.08.2020	12:29	13:19	
		ABL-Ventilator-Drehzahl-Sollwert (ca. 50%) plus 25%	00:25	Multigrig	x	11.08.2020	13:20	13:45	
	Volumenstrom	ZUL-Klappe Pool/Wohnen (ca. 50%) minus 25%	00:40	Multigrig	x	11.08.2020	13:46	14:26	
		ZUL-Klappe Pool/Wohnen (ca. 50%) plus 25%	00:28	Multigrig	x	11.08.2020	14:26	14:54	
	Druckverlust (Fremdkörper in der Anlage)	am Hauptkanal	00:00						
		am Zuluftkanal	00:00						
		am Stichkanal zur Wohnung	00:00						
		am Stichkanal zum Pool	00:00						
		am Hauptkanal	00:00						
		am Zuluftkanal	00:00						
Leckage (Kanal öffnen)	am Zuluftkanal	00:00							
	am Stichkanal zur Wohnung	00:00							
	am Stichkanal zum Pool	00:00							
Heizsequenz 1						Test durchgeführt	Datum	Von - Bis	
Beschreibung			Aufgewendete Zeit	Manipuliert durch	x = pass/ - = fail			Startzeit	Endzeit
Test der Sequenz	Umluftklappenstellung	Bypass (ca. 50%) minus 50%	00:00	Multigrig					
		Bypass (ca. 50%) minus 25%	00:00	Multigrig					
		Bypass (ca. 50%) plus 25%	00:00	Multigrig					
		Bypass (ca. 50%) plus 50%	00:00	Multigrig					
	Bypassstellung	Sollstellung 0% plus 25%	00:00	Multigrig					
Heizsequenz 2						Test durchgeführt	Datum	Von - Bis	
Beschreibung			Aufgewendete Zeit	Manipuliert durch	x = pass/ - = fail			Startzeit	Endzeit
Test Lüftung	Klappe geschlossen	AUL-Klappe 0%	00:38	Multigrig	x	11.03.2021	08:20	08:58	
		FOL-Klappe 0%	00:41	Multigrig	x	11.03.2021	09:05	09:46	
	Ventilator aus	ZUL-Ventilator 0%	00:12	Multigrig	-	11.03.2021	10:06	10:18	
		ABL-Ventilator 0%	00:02	Multigrig	-	11.03.2021	10:34	10:36	
	Ventilator hat eine Minderleistung	ZUL-Ventilator-Drehzahl-Sollwert (ca. 50%) minus 25%	00:43	Multigrig	x	11.03.2021	10:50	11:33	
		ABL-Ventilator-Drehzahl-Sollwert (ca. 50%) minus 25%	00:04	Multigrig	-	11.03.2021	11:36	11:40	
	Ventilator hat eine Überlast	ZUL-Ventilator-Drehzahl-Sollwert (ca. 50%) plus 25%	00:31	Multigrig	x	11.03.2021	13:37	14:08	
		ABL-Ventilator-Drehzahl-Sollwert (ca. 50%) plus 25%	00:35	Multigrig	x	11.03.2021	14:08	14:43	
	Volumenstrom	ZUL-Klappe Pool/Wohnen (ca. 50%) minus 25%	00:37	Multigrig	x	12.03.2021	08:39	09:16	
		ZUL-Klappe Pool/Wohnen (ca. 50%) plus 25%	00:14	Multigrig	-	12.03.2021	09:26	09:40	
	Druckverlust (Fremdkörper in der Anlage)	am Hauptkanal	00:00						
		am Zuluftkanal	00:00						
		am Stichkanal zur Wohnung	00:00						
		am Stichkanal zum Pool	00:00						
		am Hauptkanal	00:00						
		am Zuluftkanal	00:00						
Leckage (Kanal öffnen)	am Zuluftkanal	00:00							
	am Stichkanal zur Wohnung	00:00							
	am Stichkanal zum Pool	00:00							
Test der Sequenz	Umklappenstellung	Bypass 100% minus 25%	00:00						
		Sollstellung (ca. 50%) minus 50%	00:00						
	Bypassstellung	Sollstellung (ca. 50%) minus 25%	00:00						
		Sollstellung (ca. 50%) plus 25%	00:00						
		Sollstellung (ca. 50%) plus 50%	00:00						
		Sollstellung (0%) plus 25%	00:00						

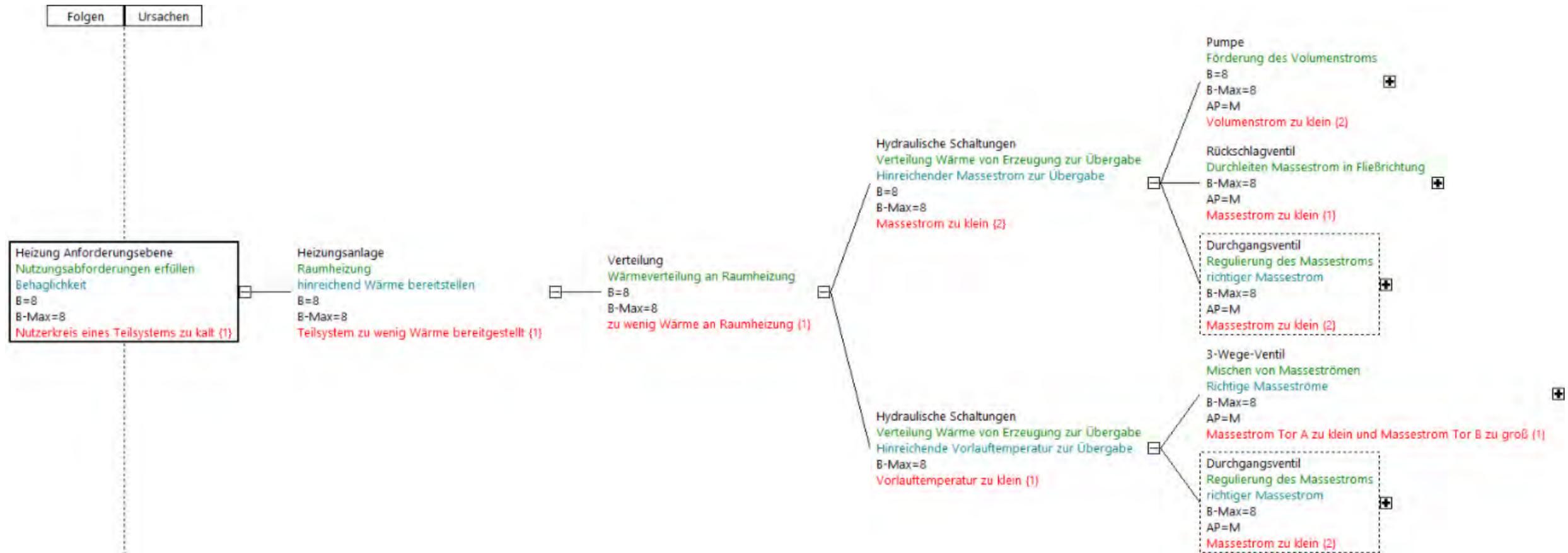
Lüftungsbetrieb					Test durchgeführt	Datum	Von - Bis		
Beschreibung			Aufgewendete Zeit	Manipuliert durch	x = pass/ - = fail		Startzeit	Endzeit	
Test Lüftung	Klappe geschlossen	AUL-Klappe 0%	00:41	Multigrig	x	13.01.2022	10:20	11:01	
		FOL-Klappe 0%	00:41	Multigrig	x	13.01.2022	11:04	11:45	
	Ventilator aus	ZUL-Ventilator 0%	01:32	Multigrig	x	13.01.2022	11:47	13:19	
		ABL-Ventilator 0%	00:40	Multigrig	x	13.01.2022	13:21	14:01	
	Ventilator hat eine Minderleistung	ZUL-Ventilator-Drehzahl-Sollwert (ca. 50%) minus 25%	00:44	Multigrig	x	13.01.2022	14:04	14:48	
		ABL-Ventilator-Drehzahl-Sollwert (ca. 50%) minus 25%	00:55	Multigrig	x	13.01.2022	14:52	15:47	
	Ventilator hat eine Überlast	ZUL-Ventilator-Drehzahl-Sollwert (ca. 50%) plus 25%	00:40	Multigrig	x	14.01.2022	08:45	09:25	
		ABL-Ventilator-Drehzahl-Sollwert (ca. 50%) plus 25%	00:46	Multigrig	x	14.01.2022	09:27	10:13	
	Volumenstrom	ZUL-Klappe Pool/Wohnen (ca. 50%) minus 25%	01:03		x	14.01.2022	10:22	11:25	
		ZUL-Klappe Pool/Wohnen (ca. 50%) plus 25%	01:51		x	14.01.2022	11:26	13:17	
	Druckverlust (Fremdkörper in der Anlage)	am-Hauptkanal		00:00					
		am Zuluftkanal		00:00					
		am Stichkanal zur Wohnung		00:00					
	Leckage (Kanal öffnen)	am Stichkanal zum Pool		00:00					
		am-Hauptkanal		00:00					
am Zuluftkanal			00:00						
		am Stichkanal zur Wohnung	00:00						
		am Stichkanal zum Pool	00:00						
Heizsequenz 1					Test durchgeführt	Datum	Von - Bis		
Beschreibung			Aufgewendete Zeit	Manipuliert durch	x = pass/ - = fail		Startzeit	Endzeit	
Test der Sequenz	WRG-Klappe	Bypass (ca. 50%) minus 50%	01:24	Multigrig	x	18.01.2022	09:51	11:15	
		Bypass (ca. 50%) minus 25%	00:56	Multigrig	x	31.01.2022	08:26	09:22	
		Bypass (ca. 50%) plus 25%	01:03	Multigrig	x	31.01.2022	09:29	10:32	
		Bypass (ca. 50%) plus 50%	01:14	Multigrig	x	31.01.2022	12:07	13:21	
		Umluftklappenstellung	Sollstellung 0% plus 25%	00:39	Multigrig	x	31.01.2022	10:34	11:13
Heizsequenz 2					Test durchgeführt	Datum	Von - Bis		
Beschreibung			Aufgewendete Zeit	Manipuliert durch	x = pass/ - = fail		Startzeit	Endzeit	
Test Lüftung	Klappe geschlossen	AUL-Klappe 0%	00:45	Multigrig	x	31.01.2022	13:23	14:08	
		FOL-Klappe 0%	00:53	Multigrig	x	31.01.2022	15:21	16:14	
	Ventilator aus	ZUL-Ventilator 0%	00:48	Multigrig	x	03.03.2022	09:48	10:36	
		ABL-Ventilator 0%	00:48	Multigrig	x	03.03.2022	10:53	11:41	
	Ventilator hat eine Minderleistung	ZUL-Ventilator-Drehzahl-Sollwert (ca. 50%) minus 25%	00:45	Multigrig			11:42	12:27	
		ABL-Ventilator-Drehzahl-Sollwert (ca. 50%) minus 25%	00:00	Multigrig					
	Ventilator hat eine Überlast	ZUL-Ventilator-Drehzahl-Sollwert (ca. 50%) plus 25%	00:00	Multigrig					
		ABL-Ventilator-Drehzahl-Sollwert (ca. 50%) plus 25%	00:00	Multigrig					
	Volumenstrom	ZUL-Klappe Pool/Wohnen (ca. 50%) minus 25%	00:00	Multigrig					
		ZUL-Klappe Pool/Wohnen (ca. 50%) plus 25%	00:00	Multigrig					
	Druckverlust (Fremdkörper in der Anlage)	am-Hauptkanal		00:00					
		am Zuluftkanal		00:00					
		am Stichkanal zur Wohnung		00:00					
	Leckage (Kanal öffnen)	am Stichkanal zum Pool		00:00					
		am-Hauptkanal		00:00					
am Zuluftkanal			00:00						
Test der Sequenz	WRG-Klappe	Bypass 100% minus 25%	00:00						
		Sollstellung (ca. 50%) minus 50%	00:00						
	Umluftklappenstellung	Sollstellung (ca. 50%) minus 25%	00:00						
		Sollstellung (ca. 50%) plus 25%	00:00						
		Sollstellung (ca. 50%) plus 50%	00:00						
Ventilstellung Vorerhitzer	Sollstellung (0%) plus 25%	00:00							

A5-2: Fehlernetze der Heizungsversuchsanlage

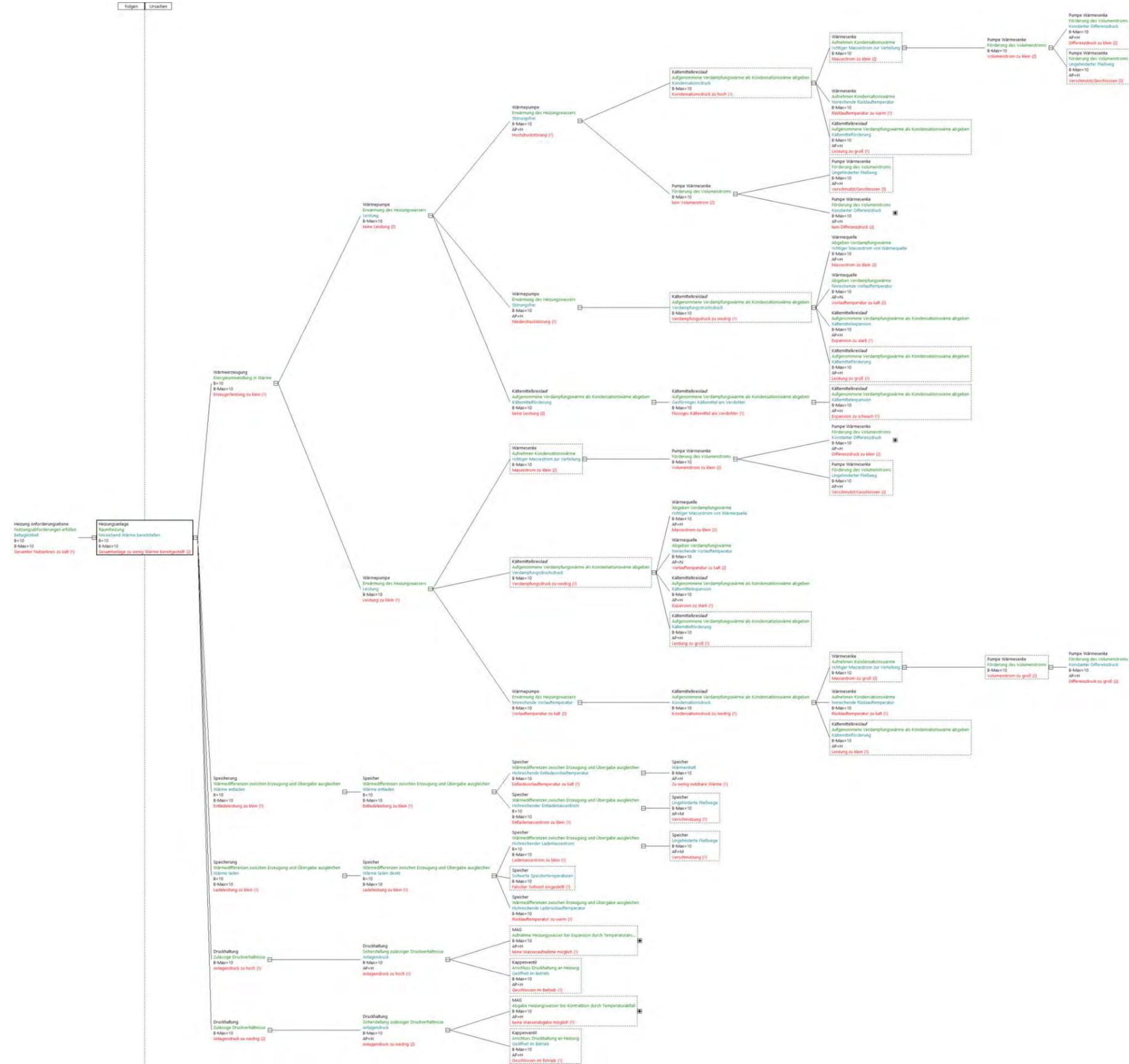
Fehlernetz Heizungsversuchsanlage: Anforderungsebene zu warm



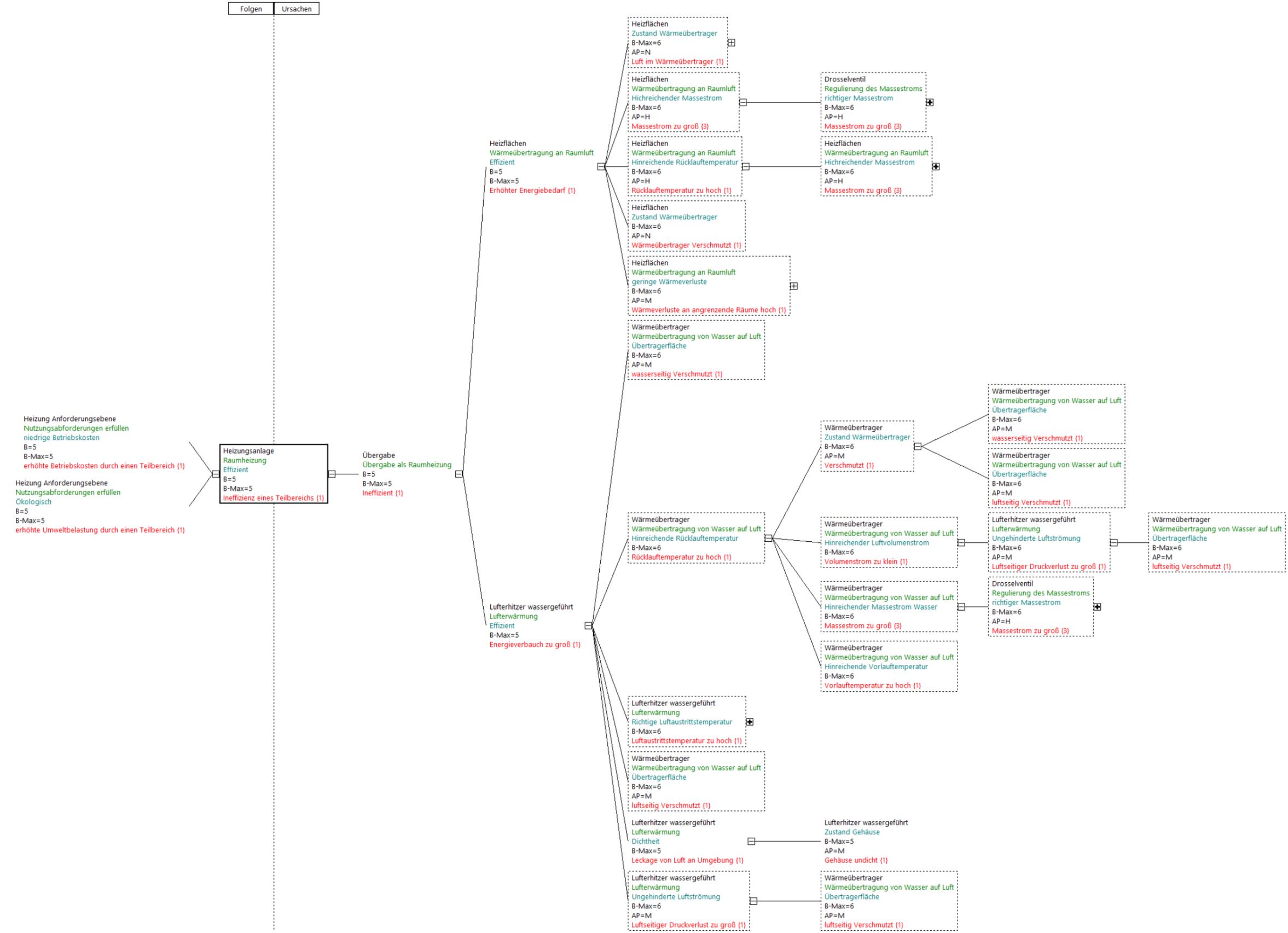
Fehlernetz Heizungsversuchsanlage: Anforderungsebene Nutzerkreis eines Teilsystems zu kalt



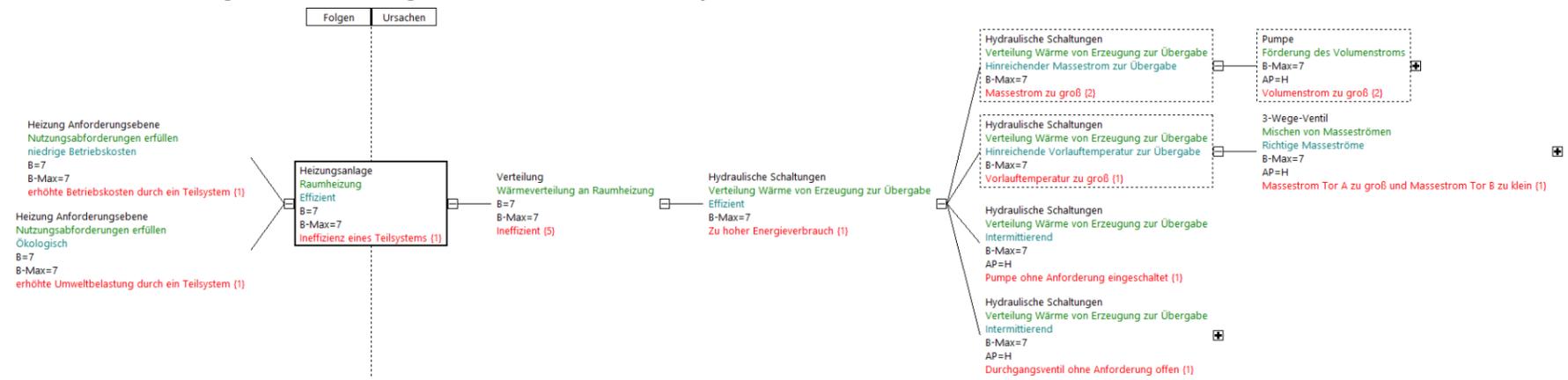
Fehlernetz Heizungsversuchsanlage: Anforderungsebene Gesamter Nutzerkreis zu kalt



Fehlernetz Heizungsversuchsanlage: Ineffizienz eines Teilbereichs



Fehlernetz Heizungsversuchsanlage: Ineffizienz eines Teilsystems



A5-3: Fehlerbewertung mit Aufgabenpriorität

Fehlerbewertung Übergabe: Lufterhitzer

Fehlerfolge	B	Ursache	H	E	AP	Bemerkung
Kleiner Nutzerkreis: zu warm	6	Drosselventil: Massestrom zu groß	5	9	H	Es handelt sich um einen Funktionseinschränkenden Fehler, aber der Nutzer kann durch geöffnete Fenster meist leicht gegensteuern und beschwert sich weniger. Daher ist E mit 9 bewertet.
Kleiner Nutzerkreis: zu kalt	6	Drosselventil: Massestrom zu klein	5	4	M	Fehlerfolge sollte dem Nutzer im Extremfall schnell auffallen (kein Massestrom oder sehr kalte Außentemperatur). Dann ist die AP-Bewertung gleich M. Liegt jedoch eine Vorlauftemperaturregelung in Abhängigkeit zur Zulufttemperatur vor kann das 3-Wege-Ventil der Verteilung gegensteuern. Der Fehler wird dann weniger auffallen. E=9 und die AP ist hoch.
		Erhitzer: Fließweg verschmutzt/ geschlossen	5	4	M	
		Erhitzer: wasserseitig verschmutzt	5	4	M	
		Erhitzer: luftseitig verschmutzt	5	4	M	
Ineffizienz eines Teilbereichs	5	Drosselventil: Massestrom zu groß	5	9	H	Einfluss ist wahrscheinlich gering. Entdeckung bei Wartung.
		Erhitzer: wasserseitig verschmutzt	5	4	M	
		Erhitzer: luftseitig verschmutzt	5	4	M	
		Erhitzer: Gehäuse undicht	5	4	M	

Fehlerbewertung Übergabe: Fußbodenheizung

Fehlerfolge	B	Ursache	H	E	AP	Bemerkung
Kleiner Nutzerkreis: zu warm	6	Drosselventil: Massestrom zu groß	5	9	H	Es handelt sich um einen Funktionseinschränkenden Fehler, aber der Nutzer kann durch geöffnete Fenster meist leicht gegensteuern und beschwert sich weniger. Daher ist E mit 9 bewertet.
Kleiner Nutzerkreis: zu kalt	6	Drosselventil: Massestrom zu klein	5	4	M	Fehlerfolge sollte dem Nutzer schnell auffallen. Daher nur AP-Bewertung gleich M.
		Heizfläche: Wärmedämmung beschädigt	2	9	M	Fehler hat wahrscheinlich nur schwache Auswirkungen und fällt dem Nutzer eher nicht auf. Daher E gleich 9.
		Heizfläche: Fließweg verschmutzt/ geschlossen	2	4	N	Fehler an Fußbodenheizungen nur mit Häufigkeit H=2 bewertet. Daher haben die Fehler eine niedrige Priorität.
		Heizfläche: keine Entlüftung	2	4	N	
		Heizfläche: Wärmeübertrager verschmutzt	2	4	N	
Ineffizienz eines Teilbereichs	5	Drosselventil: Massestrom zu groß	5	9	H	
		Heizfläche: Wärmedämmung beschädigt	2	9	M	Fehler hat wahrscheinlich nur schwache Auswirkungen und fällt dem Nutzer eher nicht auf. Daher E gleich 9.
		Heizfläche: keine Entlüftung	2	4	N	
		Heizfläche: Wärmeübertrager verschmutzt	2	4	N	

Fehlerbewertung Verteilung: Beimischschaltung mit Durchgangsventil

Fehlerfolge	B	Ursache	H	E	AP	Bemerkung
Nutzerkreis eines Teilsystems: zu kalt	8	Pumpe: Massestrom zu klein	5	3	M	Fehlerursachen, die dazu führen, dass ein größerer Nutzerkreis nicht mit ausreichend Wärme versorgt wird, sollte schnell auffallen (E=3). Die Fehlerursachen haben daher nur eine mittlere Priorität.
		Durchgangsventil: Massestrom zu klein	5	3	M	
		Rückschlagventil: Klemmt	5	3	M	
		3-Wege-Ventil: Massestrom Tor A zu klein und Massestrom Tor B zu groß	5	3	M	
		Fließweg: verschmutzt/ geschlossen	5	3	M	
Ineffizienz eines Teilsystems	7	Pumpe: Massestrom zu groß	5	8	H	Die Fehlerfolge und die Fehlerursachen sind für den Nutzer schwierig zu erkennen, da es bei Funktionsfähigen Übergabesystemen keinen Funktionsverlust gibt (E=8). Die Fehlerursachen sind daher mit einer hohen Priorität bewertet.
		3-Wege-Ventil: Massestrom Tor A zu groß und Massestrom Tor B zu klein	5	8	H	
		Pumpe: ohne Anforderung eingeschaltet	5	8	H	
		Durchgangsventil: ohne Anforderung offen	5	8	H	

Fehlerbewertung Speicherung: Pufferspeicher mit Rücklaufeinschichtung

Fehlerfolge	B	Ursache	H	E	AP	Bemerkung
Gesamter Nutzerkreis: zu kalt	10	Speicher: zu wenig nutzbare Wärme durch Ventil- oder Pumpenfehler der Speicherladung oder -Entladung	5	2	H	Der Fehler kann als Ursache die Ladepumpe oder im Extremfall die Rücklaufeinschichtung haben. Daher ist die Häufigkeit H=5. Die Aufgabenpriorität ist damit hoch.
		Speicher: Fließweg Speicherladung oder -Entladung verschmutzt/ geschlossen	3	2	M	Der Fehler sollte nicht häufig auftreten und vom gesamten Nutzerkreis bemerkt werden. Die Priorität ist mittel.
Ineffizienz Gesamtanlage oder mehrere Teilsysteme	8	Speicher: Rücklauf auf zu hohen Temperaturniveau eingeschichtet	5	7	H	Der Fehler ist eher unauffällig (E=7) daher ist die Aufgabenpriorität hoch.
		Speicher: Rücklauf auf zu niedrigen Temperaturniveau eingeschichtet	5	7	H	
		Speicher: mangelhafte Isolation	3	7	M	Eine Beschädigung der Wärmeisolation des Speichers ist nicht häufig zu erwarten. Die Aufgabenpriorität ist nur mittel.

Fehlerbewertung Wärmeerzeugung: Wärmepumpe mit Erdkollektor

Fehlerfolge	B	Ursache	H	E	AP	Bemerkung
Gesamter Nutzerkreis: zu kalt	10	Wärmepumpe: Wärmesenken-Pumpe Massestrom zu klein	5	1	H	Zu kleiner Massestrom kann Kondensationsdruck erhöhen. Fehler wird als Hochdruckstörung durch WP diagnostiziert (E=1).
		Wärmepumpe: Fließweg Wärmesenke verschmutzt/geschlossen	5	1	H	
		Wärmepumpe: Wärmequellen-Pumpe Massestrom zu klein	5	1	H	Zu kleiner Massestrom kann Verdampfungsdruck verringern. Fehler wird als Niederdruckstörung durch WP diagnostiziert (E=1).
		Wärmepumpe: Fließweg Wärmequelle verschmutzt/geschlossen	5	1	H	
		Wärmepumpe: Expansionsventil Expansion zu stark	5	1	H	
		Wärmepumpe: Expansionsventil Expansion zu schwach	5	1	H	Kann zu flüssigen Kältemittel am Kompressor führen. Zu hoher Druck im Verdampfer sollte WP diagnostizieren (E=1).
		Wärmepumpe: Kompressor Leistung zu groß	5	1	H	Fehler der Leistungsregelung des Kompressors. Niedriger Verdampfungsdruck und hoher Kondensationsdruck sollte WP diagnostizieren (E=1).
		Wärmepumpe: Kompressor Leistung zu klein	5	1	H	Mangel am Kompressor verringert seine Leistung. Hoher Verdampfungsdruck und niedriger Kondensationsdruck sollte WP diagnostizieren (E=1).
		Wärmepumpe: Kältemittelmangel	5	1	H	Führt zu niedrigen Verdampfungs- und Kondensationsdrücken. Niedrige Drücke sollte WP diagnostizieren (E=1).
Wärmepumpe: Wärmequelle Vorlauftemperatur zu kalt	2	1	N	Zu kleine VL-Temperatur der Quelle kann Verdampfungsdruck verringern. Fehler wird als Niederdruckstörung durch WP		

Fehlerfolge	B	Ursache	H	E	AP	Bemerkung
						diagnostiziert (E=1) und Ursache ist selten (Häufigkeit des Erdkollektors H=2).
Ineffizienz Gesamtanlage oder mehrere Teilsysteme	8	Wärmepumpe: Wärmesenken-Pumpe Massestrom zu groß	5	7	H	Fehler verursacht keine Störung der WP und wird dadurch nicht automatisch erkannt (E=7). Leistung der Umwälzpumpe unnötig hoch, Kompressorleistung erhöht, um Kondensationsdruck bei erforderlichem Niveau zu halten.
		Wärmepumpe: Wärmesenken-Pumpe Massestrom zu klein	5	1	M	Zu kleiner Massestrom kann Kondensationsdruck erhöhen, was zu einer zu hohen heizungsseitigen
		Wärmepumpe: Fließweg Wärmesenke verschmutzt/ geschlossen	5	1	M	Vorlauftemperatur führt. Fehler wird im Extremfall als Hochdruckstörung durch WP diagnostiziert (E=1).
		Wärmepumpe: Wärmequellen-Pumpe Massestrom zu groß	5	7	H	Fehler verursacht keine Störung der WP und wird dadurch nicht automatisch erkannt (E=7). Leistung der Umwälzpumpe unnötig hoch.
		Wärmepumpe: Wärmequellen-Pumpe Massestrom zu klein	5	1	M	Zu kleiner Massestrom kann Verdampfungsdruck verringern. Ggf. häufiges abtauen nötig. Fehler wird im Extremfall als
		Wärmepumpe: Fließweg Wärmequelle verschmutzt/ geschlossen	5	1	M	Niederdruckstörung durch WP diagnostiziert (E=1).
		Wärmepumpe: Wärmequelle Vorlauftemperatur zu warm	2	7	M	Fehler durch Kollektor selten. Führt nur bei schlechter Leistungsregelung der WP zu einer unnötig hohen Wärmeleistung.
		Wärmepumpe: Wärmequelle Vorlauftemperatur zu kalt	2	1	N	Führt zu niedrigen Verdampfungsdruck und damit zu erhöhter Kompressorleistung. Wird im Extremfall als Niederdruckstörung durch WP

Fehlerfolge	B	Ursache	H	E	AP	Bemerkung
						diagnostiziert (E=1). Ursache ist selten (Häufigkeit des Erdkollektors H=2).
		Wärmepumpe: Expansionsventil Expansion zu stark	5	1	M	Führt zu niedrigen Verdampfungsdruck und damit zu erhöhter Kompressorleistung. Wird im Extremfall als Niederdruckstörung durch WP diagnostiziert (E=1).
		Wärmepumpe: Expansionsventil Expansion zu schwach	5	1	M	Führt nur bei schlechter Leistungsregelung der WP zu einer unnötig hohen Wärmeleistung. Kann zu flüssigen Kältemittel am Kompressor führen. Zu hoher Druck im Verdampfer sollte WP diagnostizieren (E=1).
		Wärmepumpe: Kompressor Leistung zu groß	5	1	M	Fehler der Leistungsregelung des Kompressors. Führt zu unnötig niedrigen Verdampfungsdruck und hohen Kondensationsdruck. Wird im Extremfall als Druckstörung durch WP diagnostiziert (E=1).
		Wärmepumpe: Kältemittelmangel	5	1	M	Führt zu niedrigen Verdampfungs- und Kondensationsdrücken. Häufigeres Abtauen des Verdampfers und erhöhte Kompressorleistung sind folgen. Niedrige Drücke sollte WP im Extremfall diagnostizieren (E=1).

Fehlerbewertung Druckhaltung

Fehlerfolge	B	Ursache	H	E	AP	Bemerkung
Gesamter Nutzerkreis: zu kalt	10	Druckhaltung: keine Wasserabgabe möglich	5	2	M	Die Druckhaltung kann der Heizungsanlage kein Wasser aus dem Ausdehnungsgefäß bereitstellen. Der Wärmeerzeuger geht im Extremfall in Störung. Lufteinträge in das Heizungssystem sind möglich und Pumpen können beschädigt werden. Die Gesamte Anlage ist betroffen (E=2).
		Druckhaltung: keine Wasseraufgabe möglich	5	1	M	Die Druckhaltung kann kein Wasser der Heizungsanlage aufnehmen. Der Anlagendruck steigt und das Sicherheitsventil reagiert automatisch (E=1). Danach aber evtl. Wassermangel und Funktionsausfall der Anlage.
		Kappenventil: geschlossen	4	2	M	Die Druckhaltung ist ohne Funktion.

A5-4: Möglichkeiten zur Fehlerdiagnose aus Recherche und nötige Sensorausstattung

FED aus Recherche Übergabe: Lufterhitzer

Fehler	AP	Beschreibung	Messwerte und Methode	Quelle	nötige Effizienzklasse DIN EN 15232	GA- nötiger Automationsgrad DIN EN 18599-11	In Versuchsanlage möglich?
Drosselventil: Massestrom zu groß	H	Sollte ähnlich zu „Drosselventil: Massestrom zu klein“, bzw. nicht intermittierender Komponenten	Keine Methode in Fehlerrecherche	keine			nein: keine Wärmemengen- oder Volumenstrommessung ggf. indirekt über VL- und RL-Temperaturen möglich
Drosselventil: Massestrom zu klein	H	Ventil ist auf Grund eines Fehlers geschlossen	Vergleich Soll- und Ist-Volumenstrom, WMZ	[Hyvfirinen et. al. (1996) Kap. 3.1.2]	Informationen Energieverbrauch: C oder HZG Wärmeverteilung: A mit Rücklauf-temperatur	HZG Wärmeverteilung: A mit Rücklauf-temperatur	nein: keine Wärmemengen- oder Volumenstrommessung evtl. indirekt über VL- und RL-Temperaturen möglich
Erhitzer: Fließweg verschmutzt/ geschlossen	H	Sollte ähnlich zu „Drosselventil: Massestrom zu klein“	Keine Methode in Fehlerrecherche	keine			nein: keine Wärmemengen- oder Volumenstrommessung

Fehler	AP	Beschreibung	Messwerte und Methode	Quelle	nötige GA-Effizienzklasse DIN EN 15232	nötiger Automationsgrad DIN EN 18599-11	In Versuchsanlage möglich?
Erhitzer: wasserseitig verschmutzt	H		Messung Übertragerleistung und Strömungswiderstand und mit Referenzwerten vergleichen	[Deeskow et. al. (2010) S.25]	Informationen Energieverbrauch: C mit zusätzlicher Differenzdruckmessung oder HZG Wärmeverteilung: A mit Rücklauftemperatur	HZG Wärmeverteilung: A mit Rücklauftemperatur	nein: keine Wärmemengen-, Volumenstrom- oder Druckverlustmessung
		Regelung versucht schlechten Wärmeübergang durch höhere VL-Temperatur oder Massestrom auszugleichen → RL-Temperatur steigt an	Massestrom und RL-Temperatur messen und mit Referenzwert vergleichen	[Hyvfirinen et. al. (1996) Kap. 3.1.2]			bedingt: nur Messung RL-Temperatur
Erhitzer: luftseitig verschmutzt	H	Siehe wasserseitige Verschmutzung	Messung Übertragerleistung und Strömungswiderstand und mit Referenzwerten vergleichen	[Deeskow et. al. (2010) S.25]	Informationen Energieverbrauch: C mit zusätzlicher Differenzdruckmessung oder HZG	HZG Wärmeverteilung: A mit Rücklauftemperatur	nein: keine Wärmemengen-, Volumenstrom- oder Druckverlustmessung

Fehler	AP	Beschreibung	Messwerte und Methode	Quelle	nötige GA-Effizienzklasse DIN EN 15232	nötiger Automationsgrad DIN EN 18599-11	In Versuchsanlage möglich?
					Wärmeverteilung: A mit Rücklauftemperatur		
			Massestrom und RL-Temperatur messen und mit Referenzwert vergleichen	[Hyvfirinen et. al. (1996) Kap. 3.1.2]	Informationen Energieverbrauch: C oder HZG Wärmeverteilung: A mit Rücklauftemperatur	HZG Wärmeverteilung: A mit Rücklauftemperatur	bedingt: nur Messung RL-Temperatur
Erhitzer: nicht entlüftet	H	Sollte ähnlich zu „Verschmutzt“ sein	Keine Methode in Fehlerrecherche	keine			
Erhitzer: Gehäuse undicht - Luftleckage	H	Sollte mit „Ventilator: Luftleckage“ möglich sein, jedoch keine Eingrenzung auf Lufterhitzer möglich	Keine Methode in Fehlerrecherche	keine			nein: keine Messung Energie an Ventilatoren
Zuluft zu warm (allgemein)			Messwert/Fühler (Vergleich Soll- und Ist-ZUL-Temperatur)	[Grob et. al. (2002) Anhang A S. 185-187]	RLT Regelung der Temperatur der Raumluft: D oder RLT Regelung der Zulufttemperatur: C	RLT Wärmeübergabe: C (bei Zulufttemperaturregelung)	ja

Fehler	AP	Beschreibung	Messwerte und Methode	Quelle	nötige GA-Effizienzklasse DIN EN 15232	nötiger Automationsgrad DIN EN 18599-11	In Versuchsanlage möglich?
Zuluft zu kalt (allgemein)			Messwert/Fühler (Vergleich Soll- und Ist-ZUL-Temperatur)	[Grob et. al. (2002) Anhang A S. 185-187]	RLT Regelung der Temperatur der Raumluft: D oder RLT Regelung der Zulufttemperatur: C	RLT Wärmeübergabe: C (bei Zulufttemperaturregelung)	ja
Zuluft zu warm (nicht intermittierend)		Der Luftherhitzer erwärmt die ZUL obwohl er ausgeschaltet sein sollte	Vergleich Lufteintritts- und Luftaustrittstemperatur des LE in Abhängigkeit zum nötigen Betriebszustand	[Gropp et. al. (2003) S. 144]		RLT Luftheizung: A 2 + Monitoring	ja
			Vergleich Wärmeverbrauch mit Betriebszustand	[Feist et. al. (2003) S.111] [Stockinger et. al. (2010) S.82]	Informationen Energieverbrauch: C oder HZG Wärmeverteilung: A mit Rücklauftemperatur	HZG Wärmeverteilung: A mit Rücklauftemperatur	bedingt: keine Wärmemengemessung am LE Temperaturspreizung ist bestimmbar

FED aus Recherche Übergabe: Fußbodenheizung

Ursache	AP	Beschreibung	Messwerte und Methode	Quelle	nötige GA-Effizienzklasse DIN EN 15232	nötiger Automationsgrad DIN EN 18599-11	In Versuchsanlage möglich?
Drosselventil: Massestrom zu groß	H	Thermostat verringert Massestrom nicht. Raum kann überhitzen.	Raumtemperatur Soll-Ist-Vergleich	[Baumann et. al. (2005) S.38 - 39; S 143 & 149] [Voss & Engelmann (2008) S. 68] [Niekamp et. al. (2017) S. 15-16 und S. 18] [Emmerich et. al. (2003) S. 148] [Hyvfirinen et. al. (1996) Anhang 3A]	HZG Regelung der Übergabe: A	HZG Regelung der Übergabe: B	ja
		Höhere Masseströme führen zu höheren RL-Temperaturen und kleineren Spreizungen.	Vergleich Rücklauftemperaturen ähnlicher Räume/Heizkreise/Übergabekomponenten	[Röther et. al. (2015) S.22-24]	HZG Regelung der Übergabe: D mit Messung Rücklauftemperatur der	HZG Regelung der Übergabe: D mit Messung Rücklauftemperatur der	ja, wenn viele Fußbodenheizkreise betroffen

Ursache	AP	Beschreibung	Messwerte und Methode	Quelle	nötige GA-Effizienzklasse DIN EN 15232	nötiger Automationsgrad DIN EN 18599-11	In Versuchsanlage möglich?
		Durch Vergleich ähnlicher Verbraucher können zu stark durchströmte identifiziert werden.			Übergabekomponente	Übergabekomponente	
		In Quelle wurde eine Raumheizung per WMZ im Betriebszustand Kühlen identifiziert.	Wärmemenge messen und mit Betriebszuständen/Außentemperaturen auswerten	[Knapp (2009) S. 74-76]	Informationen Energieverbrauch: C	HZG Regelung der Übergabe: D mit Messung Vor- und Rücklauf Temperatur sowie Massestrom der Übergabekomponente	nein: keine Wärmemengemessung
Drosselventil: Massestrom zu klein	M	Methoden wie bei „Drosselventil: Massestrom zu groß“					ja, wenn viele Fußbodenheizkreise betroffen
Heizfläche: Wärmedämmung beschädigt	M		Keine Methode in Fehlerrecherche	keine			nein

Ursache	AP	Beschreibung	Messwerte und Methode	Quelle	nötige GA-Effizienzklasse DIN EN 15232	nötiger Automationsgrad DIN EN 18599-11	In Versuchsanlage möglich?
Heizfläche: Fließweg verschmutzt/geschlossen	N	Sollte ähnlich zu „Drosselventil: Massestrom zu klein“ sein	Keine Methode in Fehlerrecherche	keine			ja
Heizfläche: keine Entlüftung	N		zu geringe Raumtemperatur, Geräusche, Auskühlung – Geräusche kein üblicher Messwert	[Hyvfirinen et. al. (1996) Anhang 3A]	HZG Regelung der Übergabe: A	HZG Regelung der Übergabe: B	ja
Heizfläche: Wärmeübertrager verschmutzt	N		Messung Übertragerleistung und Strömungswiderstand und mit Referenzwerten vergleichen	[Deeskow et. al. (2010) S.25]	HZG Regelung der Übergabe: D mit Messung Rücklauftemperatur, Massestrom und Differenzdruck der Übergabekomponente	HZG Regelung der Übergabe: D mit Messung Rücklauftemperatur, Massestrom und Differenzdruck der Übergabekomponente	nein: keine Wärmemengen-, Volumenstrom- oder Druckverlustmessung

FED aus Recherche Verteilung: Beimischschaltung mit Durchgangsventil

Ursache	AP	Beschreibung	Messwerte und Methode	Quelle	nötige Effizienzklasse EN 15232	GA-DIN	nötiger Automationsgrad DIN EN 18599-11	In Versuchsanlage möglich?
Pumpe: Massestrom zu groß	H		Rücklauf-temperatur Anhand Unterlagen und Außentemperatur abschätzen und mit Ist-RL-Temperatur vergleichen	[Plath (2009) S. 66]	HZG Regelung der Warmwassertemperatur im Verteilungsnetz (Vor- oder Rücklauf): C mit Messung Rücklauf-temperatur		HZG Regelung der Vorlauf-temperatur: C mit Messung Rücklauf-temperatur	ja
		Höhere Masseströme führen zu höheren RL-Temperaturen (siehe auch Tabelle FBH – Verfahren wurde bei Heizflächen angewendet, sollte aber auch bei Heizkreisen nutzbar sein)	Vergleich Rücklauf-temperaturen ähnlicher Heizkreise	[Röther et. al. (2015) S.22-24]	HZG Regelung der Warmwassertemperatur im Verteilungsnetz (Vor- oder Rücklauf): C mit Messung Rücklauf-temperatur		HZG Regelung der Vorlauf-temperatur: C mit Messung Rücklauf-temperatur	ja
Pumpe: Massestrom zu klein	M		Unterversorgung mehrerer Bereiche (Soll und Ist-Temperaturen der Bereiche vergleichen)	[Sewe (2018) S.58]	HZG Regelung der Übergabe: A		HZG Regelung der Übergabe: B	ja

Ursache	AP	Beschreibung	Messwerte und Methode	Quelle	nötige Effizienzklasse EN 15232	GA-DIN	nötiger Automationsgrad DIN EN 18599-11	In Versuchsanlage möglich?
		Pumpe einer Solaranlage fiel aus	Wärmemenge mit erwarteter Wärmemenge vergleichen (Einbezug Nutzung, Außentemperatur, ...)	[Kerschberger et.al. (2004) S.127]	Informationen Energieverbrauch: C oder HZG Regelung der Warmwassertemperatur im Verteilungsnetz (Vor- oder Rücklauf): D mit Messung Vor- und Rücklauftemperatur sowie Massestrom		HZG Regelung der Vorlauftemperatur: D mit Messung Vor- und Rücklauftemperatur sowie Massestrom	nein: keine Wärmemengensmessungen
		Prüfen per Rücklauftemperatur sollte möglich sein	Rücklauftemperatur Anhand Unterlagen und Außentemperatur abschätzen und mit Ist-RL-Temperatur vergleichen	[Plath (2009) S. 66]	HZG Regelung der Warmwassertemperatur im Verteilungsnetz (Vor- oder Rücklauf): C mit Messung Rücklauftemperatur		HZG Regelung der Vorlauftemperatur: C mit Messung Rücklauftemperatur	ja
Pumpe: mechanischer Defekt	M	Verschiedene mechanische Defekte werden in Ausarbeitung durch	Wirkungsgrad verschlechtert sich (Messung Differenzdruck, Volumenstrom und	Nold (1994)	HZG Regelung der Umwälzpumpen: B		HZG Regelung der Umwälzpumpen: B mit Messung Leistungsaufnahme	nein: keine Messung Differenzdruck, Leistungsaufnahme oder

Ursache	AP	Beschreibung	Messwerte und Methode	Quelle	nötige Effizienzklasse EN 15232	GA-DIN	nötiger Automationsgrad DIN EN 18599-11	In Versuchsanlage möglich?
		Messgrößen an Pumpen detektiert	el. Leistungsaufnahme) und mit Referenzwerten vergleichen		mit Messung Leistungsaufnahme und Volumenstrom oder Informationen Energieverbrauch: C mit Messung Differenzdruck		e und Volumenstrom	Volumenstrom über Pumpe
3-Wege-Ventil: Massestrom Tor A zu groß und Massestrom Tor B zu klein	H		Vorlauftemperatur nach Näherungsgleichung und mit Ist-Vorlauftemperatur vergleichen (Absenkbetrieb berücksichtigen)	[Plath (2009) S. 64 und 107] [Görres et. al. (2007) S.133]	HZG Regelung der Warmwassertemperatur im Verteilungsnetz (Vor- oder Rücklauf): C		HZG Regelung der Vorlauftemperatur: C	ja
			Prüfen Absenkung VL-Temperatur außerhalb der Nutzungszeiten	[Sewe (2018) Anhang B S. 54] [Plath (2009) S. 78]	HZG Regelung der Warmwassertemperatur im Verteilungsnetz (Vor- oder Rücklauf): C mit HZG Regelung der Verteilung bei		HZG Regelung der Vorlauftemperatur: C mit HZG Intermittierender Betrieb: C	ja

Ursache	AP	Beschreibung	Messwerte und Methode	Quelle	nötige Effizienzklasse EN 15232	GA-DIN	nötiger Automationsgrad DIN EN 18599-11	In Versuchsanlage möglich?
					intermittierendem Betrieb: C			
		Ob Vorlauftemperatur genug abgesenkt, Raumtemperatur außerhalb der Nutzungszeit auswerten	Prüfen Absenkung Raumtemperatur außerhalb der Nutzungszeiten	[Kienzlen et. al. (2000) S. 126-129]	HZG Regelung der Übergabe: A mit HZG Regelung der Verteilung bei intermittierendem Betrieb: C		HZG Regelung der Übergabe: B mit HZG Intermittierender Betrieb: C	ja
		Ventil arbeitet nicht im Regelbereich	Schwankende Vorlauftemperatur	[Sewe (2018) Anhang B S.131]	HZG Regelung der Warmwassertemperatur im Verteilungsnetz (Vor- oder Rücklauf): C		HZG Regelung der Vorlauftemperatur: C	ja
3-Wege-Ventil: Massestrom Tor A zu klein und Massestrom Tor B zu groß	M	Siehe „3-Wege-Ventil: Massestrom Tor A zu groß und Massestrom Tor B zu klein“						ja
Durchgangsventil: Massestrom zu klein	M		Messung Volumenstrom und mit Soll-	[Hyvfirinen et. al. (1996)]	HZG Regelung der Warmwassertemperatur im Verteilungsnetz (Vor- oder Rücklauf): C		HZG Regelung der Vorlauftemperatur: C	nein: keine Wärmemengen- oder Volumenstrom-

Ursache	AP	Beschreibung	Messwerte und Methode	Quelle	nötige Effizienzklasse EN 15232	GA-DIN	nötiger Automationsgrad DIN EN 18599-11	In Versuchsanlage möglich?
			Volumenstrom vergleichen	Abschnitt 3.1.2]	mit Messung Volumenstrom oder Informationen Energieverbrauch: C		mit Messung Volumenstrom	messung evtl. indirekt über VL- und RL-Temperaturen möglich
		Wenn Durchgangsventil geschlossen, dann Absinkende Vorlauftemperatur und ggf. Reduzierung Massestrom, wenn Pumpe nicht durch geschlossenes Tor B des 3WV fördern kann (da kalt 3WV schließt Tor B komplett) Evtl. Kombination vorhandener Methoden						

Ursache	AP	Beschreibung	Messwerte und Methode	Quelle	nötige Effizienzklasse EN 15232	GA-DIN	nötiger Automationsgrad DIN EN 18599-11	In Versuchsanlage möglich?
Rückschlagventil: Klemmt	M	Fehlzirkulationen führen zu negativen Volumenströme	Volumenströme messen und auf negative Volumenströme überprüfen	[Miara et. al. (2011) S. 37] [Sewe (2018) Anhang B S.129]	HZG Regelung der Warmwassertemperatur im Verteilungsnetz (Vor- oder Rücklauf): C mit Messung Volumenstrom oder Informationen Energieverbrauch: C		HZG Regelung der Vorlauftemperatur: C mit Messung Volumenstrom	nein: evtl. indirekt durch negative Temperatur-Spreizung
Fließweg: verschmutzt/geschlossen	M	Mögliche Auswirkungen sind die Fehler in denen ein Massestrom zu klein ist. Teilstück im Netz wird aber nur mit hohem messtechnischem Aufwand eingrenzbar sein.						nein
Pumpe: ohne Anforderung eingeschaltet	H		Vergleich des Wärmeverbrauchs im Verhältnis zur	[Plath (2009) S. 78]	Informationen Energieverbrauch: C			nein: keine Wärmemengenmessung

Ursache	AP	Beschreibung	Messwerte und Methode	Quelle	nötige Effizienzklasse EN 15232	GA-DIN	nötiger Automationsgrad DIN EN 18599-11	In Versuchsanlage möglich?
			Außenlufttemperatur und Nutzungszeit	<p>[Sewe (2018) Anhang B S.127]</p> <p>[Emmerich et. al. (2003) S. 62-63]</p> <p>[Kappert et. al. (2005) S. 86-87]</p> <p>[Voss & Engelmann (2008) S. 40&48]</p> <p>[Niekamp et. al. (2017) S. 14-15]</p>				evtl. indirekt über VL- und RL-Temperaturen möglich
			Messung Stromverbrauch Pumpe und mit Außenlufttemperatur und	[Wagner et. al. (2006) S. 134-135]	Informationen Energieverbrauch: C			nein: keine Messung Stromverbrauch der Pumpe

Ursache	AP	Beschreibung	Messwerte und Methode	Quelle	nötige Effizienzklasse EN 15232	GA-DIN	nötiger Automationsgrad DIN EN 18599-11	In Versuchsanlage möglich?
			Nutzungszeit/Betriebszustand auswerten					
			Betriebszustand Pumpe mit Außenlufttemperatur und Nutzungszeit/Betriebszustand auswerten	[Knapp (2009) S. 137]	HZG Regelung der Warmwassertemperatur im Verteilungsnetz (Vor- oder Rücklauf): C mit HZG Regelung der Umwälzpumpen: C		HZG Regelung der Vorlauftemperatur: C mit HZG Regelung der Umwälzpumpen: C	ja
			Anforderung Ventil mit Anforderung Pumpe vergleichen	[Sewe (2018) Anhang B S.127]	HZG Regelung der Verteilung bei intermittierendem Betrieb: C		HZG Intermittierender Betrieb: C	ja
Durchgangsventil: ohne Anforderung offen	H	Mit Verfahren wurden nicht intermittierende Pumpen Entdeckt – sollte auch für Durchgangsventile möglich sein	Vergleich des Wärmeverbrauchs im Verhältnis zur Außenlufttemperatur und Nutzungszeit	[Plath (2009) S. 78] [Sewe (2018) Anhang B S.127] [Emmerich et. al.]	Informationen Energieverbrauch: C			nein: keine Wärmemengenummessung

Ursache	AP	Beschreibung	Messwerte und Methode	Quelle	nötige Effizienzklasse EN 15232	GA-DIN	nötiger Automationsgrad DIN EN 18599-11	In Versuchsanlage möglich?
				(2003) S. 62-63 [Kappert et. al. (2005) S. 86-87] [Voss & Engelmann (2008) S. 40&48] [Niekamp et. al. (2017)S. 14-15]				
			Anforderung Ventil mit Anforderung Pumpe vergleichen	[Sewe (2018) Anhang B S.127]	HZG Regelung der bei intermittierendem Betrieb: C		HZG Intermittierender Betrieb: C	ja

FED aus Recherche Speicherung: Pufferspeicher mit Rücklaufeinschichtung

Ursache	AP	Beschreibung	Messwerte und Methode	Quelle	nötige GA-Effizienzklasse DIN EN 15232	nötiger Automationsgrad DIN EN 18599-11	In Versuchsanlage möglich?
Speicher: zu wenig nutzbare Wärme	H	Entsteht durch zu niedrige Temperatur im Speicher. Als Ursachen dienen die in dieser Tabelle genannten Fehlerursachen oder anderweitige Ursachen für ungünstigen Wärmestromverhältnissen Ladung/Entladung					
Speicher: Fließweg Speicherladung verschmutzt/geschlossen	M	Schneller Anstieg Vorlauftemperatur des Wärmeerzeugers, große Spreizung über Wärmeerzeuger	Vorlauf- und Rücklauftemperatur am Wärmeerzeuger oder Ladeeingang des Speichers messen und auswerten	[Bonin (2018) S. 57]	HZG Wärmeerzeugung: D mit Messung Rücklauftemperatur	HZG Wärmeerzeugung: D mit Messung Rücklauftemperatur	ja

Ursache	AP	Beschreibung	Messwerte und Methode	Quelle	nötige GA-Effizienzklasse DIN EN 15232	nötiger Automationsgrad DIN EN 18599-11	In Versuchsanlage möglich?
		Massestrom sinkt. Dadurch taktender Wärmeerzeuger und häufig zu niedrige Speichertemperatur	Betriebszustand Wärmeerzeuger und Speichertemperatur	[Bonin (2018) S. 43]	HZG Wärmeerzeugung: D mit Messung Speichertemperatur oder HZG Regelung des Betriebs ladender Wärmespeicherung: D	HZG Wärmeerzeugung: D mit Messung Speichertemperatur	ja
Speicher: Fließweg Speicherentladung verschmutzt/ geschlossen	M	Massestrom zur Verteilung sollte sinken. Unterversorgung aller angeschlossener Teilsysteme. Speicherladung relativ kleine Leistung/ nicht häufig aktiv. Wärmeentnahme passt nicht zu Außentemperatur/	Keine Methode in Fehlerrecherche	keine			bedingt: Heizkreise werden Unterversorgt und Speicher ist warm

Ursache	AP	Beschreibung	Messwerte und Methode	Quelle	nötige GA-Effizienzklasse DIN EN 15232	nötiger Automationsgrad DIN EN 18599-11	In Versuchsanlage möglich?
		Nutzung vorhergehender Perioden					
Speicher: Rücklauf auf zu hohen Temperaturniveau eingeschichtet	H	Oberste Messstelle Stelle relativ kühl	Speichertemperaturen (oben & unten?)	[Hyvfirinen et. al. (1996) Abschnitt 3.65]	HZG Regelung des Betriebs ladender Wärmespeicherung: C		ja
Speicher: Rücklauf auf zu niedrigen Temperaturniveau eingeschichtet	H	Unterste Messstelle relativ warm	Speichertemperaturen (oben & unten?)	[Hyvfirinen et. al. (1996) Abschnitt 3.64]	HZG Regelung des Betriebs ladender Wärmespeicherung: C		ja
Speicher: hohe Verluste	M	Energieverluste bestimmen	Messung Wärmemenge für Ladung und Entladung	[Knapp (2009) S. 100-101]	Informationen Energieverbrauch: C		nein: keine Wärmemengenmessung
		Entladung durch Fehlzirkulation	Volumenströme messen und auf negative Volumenströme überprüfen	[Knapp (2009) S. 100-101] mit [Miara et. al. (2011) S. 37]	Informationen Energieverbrauch: C		nein: keine Volumenstrommessung indirekt durch Temperaturen im Speicher (Durchmischung) und VL- und RL-

Ursache	AP	Beschreibung	Messwerte und Methode	Quelle	nötige Effizienzklasse DIN EN 15232	GA- nötiger Automationsgrad DIN EN 18599-11	In Versuchsanlage möglich?
				[Sewe (2018) Anhang B S.129]			Temperaturen der Anschlüsse

FED aus Recherche Wärmeerzeugung: Wärmepumpe mit Erdkollektor

Ursache	Max-AP	Beschreibung	Messwerte und Methode	Quelle	nötige Effizienzklasse DIN EN 15232	GA- nötiger Automationsgrad DIN EN 18599-11	In Versuchsanlage möglich?
Wärmepumpe: Wärmesenken-Seite Vorlauftemperatur zu hoch			Vorlauftemperatur nach Näherungsgleichung und mit Ist-Vorlauftemperatur vergleichen	[Plath (2009) S. 64 und S. 107] [Baumann et. al. (2005) S.150]	HZG Regelung des Wärmeerzeugers: C	HZG Wärmeerzeugung: C	ja
Wärmepumpe: Wärmesenken-Seite Vorlauftemperatur zu niedrig		Siehe „Wärmepumpe: Wärmesenken-Seite Vorlauftemperatur zu hoch“			HZG Regelung des Wärmeerzeugers: C	HZG Wärmeerzeugung: C	ja

Ursache	Max-AP	Beschreibung	Messwerte und Methode	Quelle	nötige GA-Effizienzklasse DIN EN 15232	nötiger Automationsgrad DIN EN 18599-11	In Versuchsanlage möglich?
Wärmepumpe: Wärmesenken-Pumpe Massestrom zu groß	H	Zu hohe Volumenströme führen zu kleinen Spreizungen (siehe auch Wärmesenken-Pumpe Massestrom zu klein)	Rücklauftemperatur Anhand Unterlagen und Außentemperatur abschätzen und mit Ist-Rücklauftemperatur vergleichen	[Plath (2009) S. 66]	HZG Regelung des Wärmereizers: C mit Messung Rücklauftemperatur	HZG Wärmereizung: C mit Messung Rücklauftemperatur	ja
		Prüfung ob Pumpe nach Anforderung arbeitet	Vergleich Anforderung/Betriebsmeldung Wärmereizer und Wärmesenken-Pumpe	[Sewe (2018) Anhang B S. 57]	HZG Regelung der Umwälzpumpen im Netz: C mit HZG Regelung des Wärmereizers: C	HZG Regelung der Umwälzpumpen: C mit HZG Wärmereizung: C oder HZG intermittierender Betrieb: C	ja
Wärmepumpe: Wärmesenken-Pumpe Massestrom zu klein	H	Zu kleinen Massestrom führt zu großen Spreizungen. Spreizung über Kondensator sollte recht klein sein.	Messen Vor- und Rücklauftemperatur. Spreizung über Kondensator sollte ~ 5 K betragen	[Bonin (2018) S. 58-66]	HZG Regelung des Wärmereizers: D mit Messung Rücklauftemperatur	HZG Wärmereizung: D mit Messung Rücklauftemperatur	ja

Ursache	Max-AP	Beschreibung	Messwerte und Methode	Quelle	nötige GA-Effizienzklasse DIN EN 15232	nötiger Automationsgrad DIN EN 18599-11	In Versuchsanlage möglich?
		Schneller Anstieg Vorlauftemperatur des Wärmeerzeugers, große Spreizung über Wärmeerzeuger	Vorlauf- und Rücklauftemperatur am Wärmeerzeuger messen und auswerten	[Bonin (2018) S. 57]	HZG Regelung des Wärmeerzeugers: D mit Messung Rücklauftemperatur	HZG Wärmeerzeugung: D mit Messung Rücklauftemperatur	ja
		Massestrom sinkt. Dadurch taktender Wärmeerzeuger und häufig zu niedrige Speichertemperatur	Betriebszustand Wärmeerzeuger und Speichertemperatur	[Bonin (2018) S. 43]	HZG Regelung des Wärmeerzeugers: D mit Messung Speichertemperatur oder HZG Regelung des Betriebs ladender Wärmespeicherung: D	HZG Wärmeerzeugung: D mit Messung Speichertemperatur	ja
		Durch diese Methoden keine Eingrenzung ob Ursache der Fließweg oder die Pumpe. Zusätzliche Prüfung der Pumpe nach „Pumpe: mechanischer Defekt“ (in Tabelle für Beimischschaltung siehe oben)					nein
Wärmepumpe: Fließweg Wärmesenke	H	Siehe: „Wärmepumpe: Wärmesenken-Pumpe Massestrom zu klein“ keine Eingrenzung ob Fehler bei Pumpe oder Fließweg					ja

Ursache	Max-AP	Beschreibung	Messwerte und Methode	Quelle	nötige Effizienzklasse DIN EN 15232	GA-nötiger Automationsgrad DIN EN 18599-11	In Versuchsanlage möglich?
verschmutzt/ geschlossen							
Wärmepumpe: Wärmequellen- Pumpe Massestrom zu groß	H	Prüfung ob Pumpe nach Anforderung arbeitet	Vergleich Anforderung/Betrie bsmeldung Wärmeerzeuger und Wärmequellen- Pumpe	[Sewe (2018) Anhang B S. 57]	HZG Regelung der Umwälzpumpen im Netz: C mit HZG Regelung des Wärmeerzeugers: C	HZG Regelung der Umwälzpumpen: C mit HZG Wärmeerzeugung: C oder HZG intermittierender Betrieb: C	ja
			Volumenstrom messen und mit Sollwert vergleichen	[Hyvfirinen et. al. (1996) Abschnitt 3.1.2]	Informationen Energieverbrauch: C		nein: keine Volumenstrom- messung
Wärmepumpe: Wärmequellen- Pumpe Massestrom zu klein	H		Strömungswächter zeigt an, wenn Volumenstrom gleich NULL	[Bonin (2018) S. 72 und S. 75]	Erkennen von Störungen an gebäudetechnischen Anlagen: B		nein: evtl. indirekt durch Temperatur- spreizung der Sole
		Verdampfer wird auf Quellenseite nicht durchström	Meldung der Wärmepumpe Frostschutz	[Koenigsdor ff & Heinrich (2008)]			nein: evtl. indirekt durch Temperatur-

Ursache	Max-AP	Beschreibung	Messwerte und Methode	Quelle	nötige GA-Effizienzklasse DIN EN 15232	nötiger Automationsgrad DIN EN 18599-11	In Versuchsanlage möglich?
							spreizung der Sole
			Volumenstrom messen und mit Sollwert vergleichen	[Hyvfirinen et. al. (1996) Abschnitt 3.1.2]	Informationen Energieverbrauch: C		nein: keine Volumenstrommessung
Wärmepumpe: Wärmequelle Vorlauftemperatur zu warm	N	Zu warmer Vorlauf wird kein Fehler bewirken, da Leistungsregelung der Wärmepumpe	Keine Methode in Fehlerrecherche	keine			
Wärmepumpe: Wärmequelle Vorlauftemperatur zu kalt	N	im Bsp. Sondenfeld zu klein und nicht abgeglichen, dadurch schnell absinkende Vorlauftemperaturen	Messung Vorlauftemperatur der Quelle	[Kappert et. al. (2005) S. 107]	Informationen Energieverbrauch: C		ja
Wärmepumpe: Fließweg Wärmequelle verschmutzt/geschlossen	H	Siehe: „Wärmepumpe: Wärmequellen-Pumpe Massestrom zu klein“ keine Eingrenzung ob Fehler bei Pumpe oder Fließweg					bedingt: durch Temperatur-spreizung der Sole

Ursache	Max-AP	Beschreibung	Messwerte und Methode	Quelle	nötige Effizienzklasse DIN EN 15232	GA-nötiger Automationsgrad DIN EN 18599-11	In Versuchsanlage möglich?
Wärmepumpe: Expansionsventil Expansion zu stark	H	Relativ niedrige Verdampfungsdrücke. Gefahr Kältemittel verdampft nicht vollständig	Keine Methode in Fehlerrecherche	keine			nein
Wärmepumpe: Expansionsventil Expansion zu schwach	H	Relativ hohe Verdampfungsdrücke.	Keine Methode in Fehlerrecherche	keine			nein
Wärmepumpe: Kompressor Leistung zu groß	H	Kompressor baut sehr hohe Drücke auf (Prüfung Kondensationsdruck), Erhöhung des Stromverbrauchs, Verringerung des COP-Wertes, höhere Temperaturen auf der Kondensatorseite, Kompressor wird heiß	Prüfen Kondensationsdruck, Messen el. Leistungsaufnahme und Wärmemenge und daraus COP bestimmen und mit Referenzwerten vergleichen	[Bonin (2018) S. 99-100]	Informationen Energieverbrauch: C		nein: keine el. Leistungsaufnahme und Wärmemenge Im Extremfall über Hochdruckwächter

Ursache	Max-AP	Beschreibung	Messwerte und Methode	Quelle	nötige GA-Effizienzklasse DIN EN 15232	nötiger Automationsgrad DIN EN 18599-11	In Versuchsanlage möglich?
Wärmepumpe: Kompressor Leistung zu klein	H	Unterversorgung Gesamtanlage	Keine Methode in Fehlerrecherche	keine			
Wärmepumpe: Kältemittelmangel	H	Verschlechterung COP	Keine Methode in Fehlerrecherche	keine			
Wärmepumpe: Hochdruckstörung	H		Messen der Temperaturspannung über den Verflüssiger -> Grenzwerte siehe DIN EN 14511-2:2018-05 als Referenzwerte	[Bonin (2018) S. 42]	HZG Regelung des Wärmeerzeugers: C mit Messung Rücklauftemperatur	HZG Wärmezeugung: C mit Messung Rücklauftemperatur	ja und im Extremfall über Hochdruckwächter
		Siehe auch „Wärmepumpe: Wärmesenken-Pumpe Massestrom zu klein“					
Wärmepumpe: Niederdruckstörung	H	-> Spreizung zu hoch durch fehlerhafte Pumpe im Solekreis; Eintrittstemperaturen zu niedrig (Sole/Wasser ca. 0°, Wasser/Wasser ca. 10°C)	Messen der Verdampfer Ein- und Austrittstemperaturen	[Bonin (2018) S. 38]	Informationen Energieverbrauch: C		ja Und im Extremfall über Niederdruckwächter

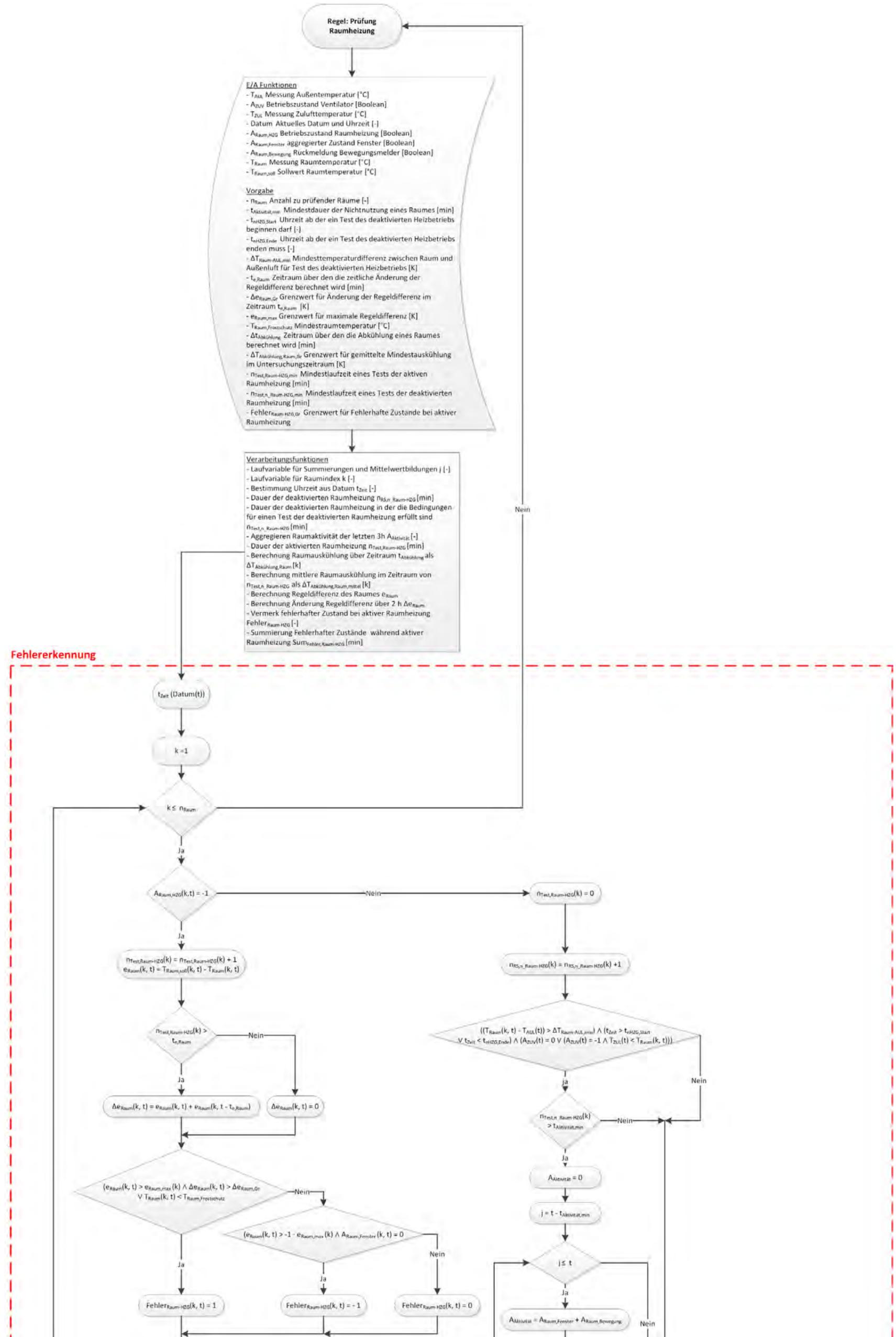
Ursache	Max-AP	Beschreibung	Messwerte und Methode	Quelle	nötige Effizienzklasse DIN EN 15232	GA-nötiger Automationsgrad DIN EN 18599-11	In Versuchsanlage möglich?
		Siehe auch „Wärmepumpe: Wärmequellen-Pumpe Massestrom zu klein“					
Allgemein: Effizienz Wärmepumpe verschlechtert sich			kontinuierliche Erfassung der abgegebenen Wärmemenge und der zugeführten Antriebsenergie, Berechnung JAZ als Tagesmittel und mit Referenzwerten vergleichen	[Plath (2009) S. 71]	HZG Regelung des Wärmeerzeugers: C mit Messung Rücklauftemperatur, Volumenstrom auf Senkenseite und el. Leistungsaufnahme oder Informationen Energieverbrauch: C	HZG Wärmeerzeugung: C mit Messung Rücklauftemperatur, Volumenstrom auf Senkenseite und el. Leistungsaufnahme	nein: keine el. Leistungsaufnahme und Wärmemenge
		elektrischer Heizstab darf nach DIN 15450 max. 5% der Jahresheizarbeit nicht überschreiten	Wärmemenge der Wärmepumpe und el. Energie der Heizpatrone Messen	[Bonin (2018) S. 28]	Informationen Energieverbrauch: C		nein: keine el. Leistungsaufnahme und Wärmemenge

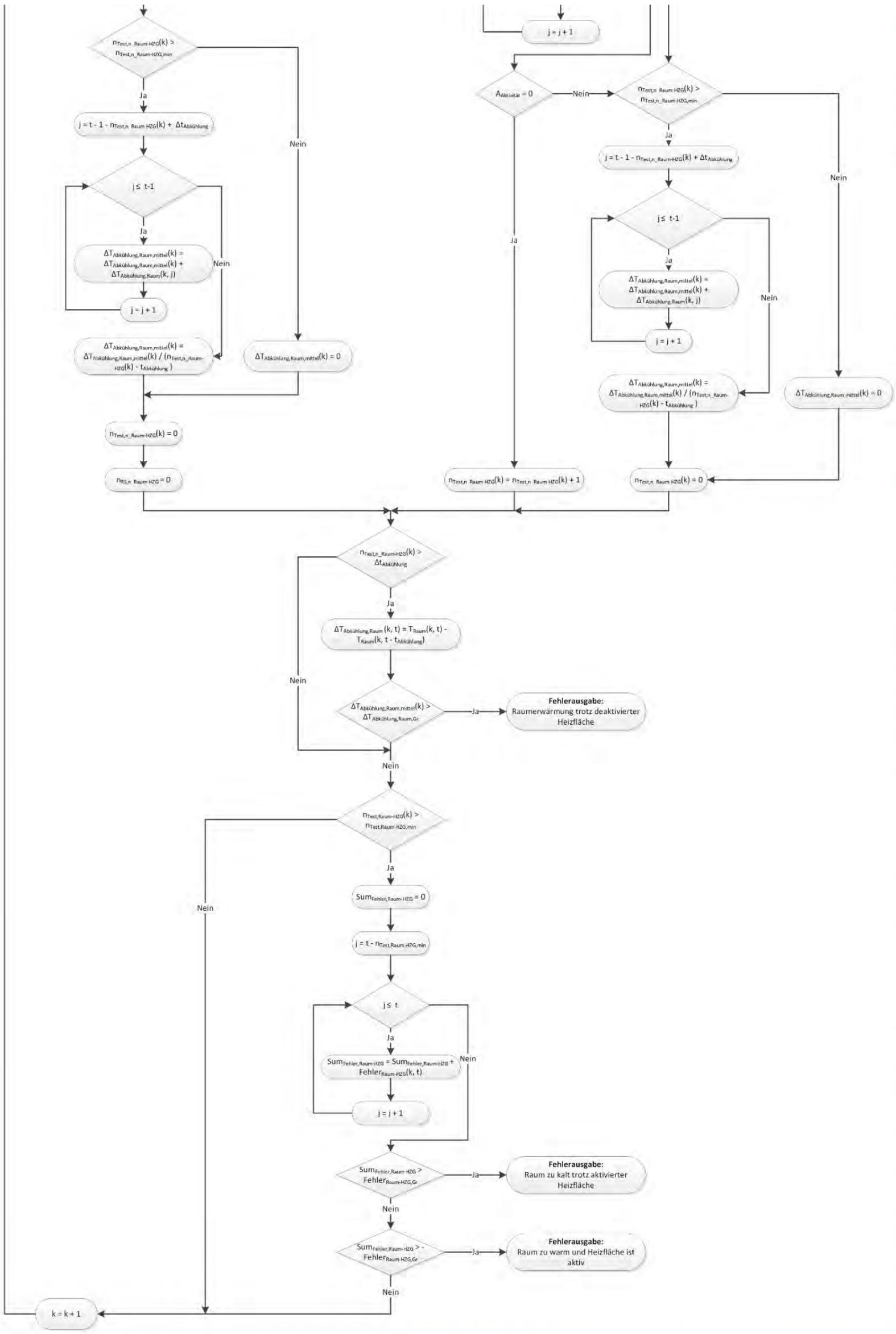
FED aus Recherche Druckhaltung

Ursache	AP	Bemerkung	Messwerte und Methode	Quelle	nötige GA-Effizienzklasse DIN EN 15232	nötiger Automationsgrad DIN EN 18599-11	In Versuchsanlage möglich?
Druckhaltung: keine Wasserabgabe möglich	M	Die Druckhaltung kann kein Wasser abgeben, der statische Druck in der Anlage sinkt	statischer Druck nicht mehr im erforderlichen Wertebereich	[Sewe (2018) S.58]	Erkennen von Störungen an gebäudetechnischen Anlagen: B		nein
		Durch niedrigen statischen Druck kann Luft in die Anlage gelangen	Verringerte geförderte Volumenströme und vermehrte Fließgeräusche	[Bonin (2018) S. 44]	Informationen Energieverbrauch: C		bedingt
Druckhaltung: keine Wasseraufnahme möglich	M	Die Druckhaltung kann kein Wasser aufnehmen, der statische Druck in der Anlage steigt	statischer Druck nicht mehr im erforderlichen Wertebereich	[Sewe (2018) S.58]	Erkennen von Störungen an gebäudetechnischen Anlagen: B		nein
Kappenventil: geschlossen	M	Kann je nach Anlagenzustand zu einem zu niedrigen oder hohen statischen Druck führen –	Keine Methode in Fehlerrecherche	keine			

Ursache	AP	Bemerkung	Messwerte und Methode	Quelle	nötige Effizienzklasse EN 15232	GA- Automationsgrad DIN EN 18599-11	In Versuchsanlage möglich?
		keine Eingrenzung mit beschriebenen Methoden möglich					

A5-5: Fehlererkennung an den Heizflächen eines Raumes
 Programmablaufplan des Algorithmus zur Prüfung der Raumheizung





Programmablaufplan des Algorithmus zur Prüfung der Raumheizung

```

'Variablen: Prüfung Raumheizung für Heizbetrieb und nicht Heizbetrieb
'-----
Dim k_Raum                'Laufvariable für Raumindex
Dim j_RaumHZG            'Laufvariable für Summierung allgemein

Dim Summe_Aktivitaet     'Variable zur Aufsummierung der Aktivität im Raum (Bewegungsmelder und
                          Fensteröffnung) innerhalb von 3h

Dim t_Aktivitaet_min     'Variable bestimmt wie lange der Raum nicht belegt sein sollte, bevor ein
                          Test der deaktivierten Raumheizung durchgeführt wird
t_Aktivitaet_min = 180

Dim Zeit                 'Aktuelle Uhrzeit

Dim Zeit_nHZG_Start     'Startzeit der Tests zur Inaktivität der Raumheizung
Dim Zeit_nHZG_End     'Endzeit der Tests zur Inaktivität der Raumheizung
Zeit_nHZG_Start=22.5/24 'Test der Inaktivität der Raumheizung soll frühestens 22:30 beginnen, da
                          dann die Sonne keine Wärme eintragen sollte
Zeit_nHZG_End= 4.5/24  'Test der Inaktivität der Raumheizung soll spätestens 4:30 enden, da bis
                          dahin die Sonne keine Wärme eintragen sollte

Dim dT_Raum_min         'Minstdifferenz Raumtemperatur zur Außentemperatur zur Sicherstellung des
                          Temperaturgefälles zur Raumauskühlung
dT_Raum_min=10

Dim t_e_Raum            'Zeitraum über den die Differenz der Regeldifferenzen berechnet wird(2h)
t_e_Raum = 120

Dim dt_e_Raum_gr       'Änderung der Regeldifferenz über die Zeit ab der ein fehlerhafter Zustand
                          vermutet werden kann
dt_e_Raum_gr = 0

Dim e_Raum_Max         'Regeldifferenz ab der ein fehlerhafter Zustand vermutet werden kann
e_Raum_Max = 2

Dim T_Raum_Frostschutz 'Raumtemperatur bei deren Unterschreitung ein Fehler vermutet wird
T_Raum_Frostschutz = 7

Dim t_Abkuehlung       'Zeitraum über den die Raumabkühlung berechnet wird; tau ca 208h, dT 0,1K,
                          dT innen zu außen 10K
t_Abkuehlung = 126

Dim n_Test_RaumHZG_min 'Mindestlaufzeit eines Tests der aktiven Raumheizung
n_Test_RaumHZG_min = 240

Dim n_Test_nRaumHZG_min 'Mindestlaufzeit eines Tests der inaktiven Raumheizung; t_Abkuehlung+120
n_Test_nRaumHZG_min = 246

Dim dt_Abkuehlung_Raum_gr 'gemittelte Mindestauskühlung des Raumes über den Zeitraum des Tests
                          der deaktivierten Raumheizung; Wert kleiner NULL für Auskühlung,
                          aber 0,05 festgelegt für nennenswerten Regelverstoß
dt_Abkuehlung_Raum_gr = 0.05

Dim Sum_Fehler_RaumHZG  'Variable zur Aufsummierung der möglichen fehlerhaften Zustände während der
                          Raumheizung innerhalb von 4h

Dim n_Test_RaumHZG()    'Feld mit raumweisen Variablen, die mit jeder Minute hochgezählt wird in der
                          ein Test der aktivierten Raumheizung durchgeführt werden kann
Dim n_Test_nRaumHZG()  'Feld mit raumweisen Variablen, die mit jeder Minute hochgezählt wird in der
                          ein Test der deaktivierten Raumheizung durchgeführt werden kann
Dim n_RS_nRaumHZG()    'Feld mit raumweisen Variablen, die mit jeder Minute hochgezählt wird in der
                          der Raum keine Heizanforderung hat

Redim n_Test_RaumHZG(n_Raum) 'Felder erhalten die Dimension der untersuchten Raumanzahl (n_Raum)
Redim n_Test_nRaumHZG(n_Raum)
Redim n_RS_nRaumHZG(n_Raum)

Dim dT_Abkuehlung_Raum_mittel() 'Feld mit raumweisen Variablen, in der die mittlere Raumabkühlung
                          während des Tests der deaktivierten Raumheizung berechnet wird
Redim dT_Abkuehlung_Raum_mittel(n_Raum)

Dim e_Raum()            'Feld zur Berechnung der Regeldifferenz während einer Heizanforderung
Dim e_2h_Raum()        'Feld zur Berechnung des Zeitverhaltens der Regeldifferenz über 2 Stunden
Dim Fehlerhaft_RaumHZG() 'Feld zum Vermerk eines eventuell fehlerhaften Zustands
Dim Indikator_RaumHZG() 'Feld mit Indikator der einen gefunden Fehler anzeigen soll

Dim dT_Abkuehlung_Raum() 'Variable zur Berechnung der Raumabkühlung während der Test der
                          deaktivierten Raumheizung durchgeführt wird

Redim e_Raum(n_Raum, iAnzahl) 'Felder werden auf Größe Dimensioniert; n_Raum: Anzahl der
                          untersuchten Räume; iAnzahl: ist die Anzahl der Zeitschritte i
Redim e_2h_Raum(n_Raum, iAnzahl)
Redim Fehlerhaft_RaumHZG(n_Raum, iAnzahl)
Redim Indikator_RaumHZG(n_Raum, iAnzahl)

Redim dT_Abkuehlung_Raum(n_Raum, iAnzahl)

'alle Zähler für Tests und Heizanforderung werden zu Beginn auf NULL gesetzt
for i=1 to n_Raum

```

```

n_Test_RaumHZG(i)=0
n_Test_nRaumHZG(i)=0
n_RS_nRaumHZG(i)=0

Next

'Prozedur zur Prüfung der Raumheizung; wird für jeden Zeitschritt i aufgerufen
'-----

'Bestimmung aktuelle Uhrzeit; Diadem Datum wird in Sekunden gezählt,
daher Umrechnung in Tag-> Nachkommastelle für Bestimmung aktuelle Uhrzeit
Zeit = Datum(i)/(60*60*24) - int(Datum(i)/(60*60*24))

'Vorgehen für alle Räume zur aktuellen Zeit i; k_Raum: Index für Raumspezifische Felder;
n_Raum: Anzahl der untersuchten Räume
For k_Raum=1 to n_Raum

  'Besteht im Raum eine Heizanforderung?
  If A_Raum_HZG(k_Raum, i)=-1 Then
    'Wenn ja: Raum soll beheizt werden
    n_Test_RaumHZG(k_Raum) = n_Test_RaumHZG(k_Raum) + 1          'Zähler zum Test
                                                                    der aktiven
                                                                    Raumheizung +1

    'Berechnung aktuelle Regeldifferenz
    e_Raum(k_Raum, i) = T_Raum_soll(k_Raum,i) - T_Raum(k_Raum,i)
    'Ist der Zähler zum Test der aktiven Raumheizung größer als 2h?
    If n_Test_RaumHZG(k_Raum) > t_e_Raum Then
      'Wenn ja: Berechnung unterschied von aktueller
      Regeldifferenz zur Regeldifferenz vor 2h
      e_2h_Raum(k_Raum,i) = e_Raum(k_Raum, i) - e_Raum(k_Raum,
      i - t_e_Raum)

    Else
      'Wenn nein: Unterschied Regeldifferenz wird nicht Berechnet
      und ist Null(neutral)
      e_2h_Raum(k_Raum,i) = 0

    End If
    'Ist die aktuelle Regeldifferenz recht groß und vergrößert sie sich
    über die Zeit, oder wird die Frostschutztemperatur unterschritten?
    If (e_Raum(k_Raum, i) > e_Raum_Max AND e_2h_Raum(k_Raum,i) >
    dt_e_Raum_gr) OR T_Raum(k_Raum,i) < T_Raum_Frostschutz Then
      'Wenn ja: Vermerk eines möglichen fehlerhaften Zustands
      Fehlerhaft_RaumHZG(k_Raum, i) = 1

    Else
      'Ist die aktuelle Regeldifferenz klein (groß im negativen Bereich)
      ist der Raum zu warm und eine Heizanforderung besteht
      (regelungstechnischer Fehler); keine Betrachtung zeitl. Verlauf von
      Regeldifferenz, denn wenn Heizung an, dann e_2h_Raum(k_Raum,i)
      kleiner als NULL bis Selbstregeleffekt(dann keinen Änderung von
      e_2h_Raum(k_Raum,i) mehr möglich)
      If e_Raum(k_Raum, i) <= (-1) * e_Raum_Max AND A_Raum_Fenster(k_Raum,
      i) = 0 Then
        'Wenn ja: Vermerk eines fehlerhaften Zustands mit MINUS
        EINS
        Fehlerhaft_RaumHZG(k_Raum, i) = - 1

      Else
        'Wenn nein: Vermerk eines fehlerfreien Zustands
        Fehlerhaft_RaumHZG(k_Raum, i) = 0

      End If

    End If

    'Fand im Zeitschritt zuvor (i-1) ein Test der deaktivierten Raumheizung
    statt und liegen Daten für 4h(n_Test_nRaumHZG_min) vor?
    If n_Test_nRaumHZG(k_Raum) > n_Test_nRaumHZG_min Then
      'Wenn ja: Berechnung mittlere Raumabkühlung für den letzten Test der
      deaktivierten Raumheizung (bis i-1)
      For j_RaumHZG= i - 1- n_Test_nRaumHZG(k_Raum) + t_Abkuehlung to i-1
        dt_Abkuehlung_Raum_mittel(k_Raum)= dt_Abkuehlung_Raum_mittel(k_Raum)
        + dt_Abkuehlung_Raum(k_Raum,j_RaumHZG)
      Next
      dt_Abkuehlung_Raum_mittel(k_Raum) =
      dt_Abkuehlung_Raum_mittel(k_Raum) / (n_Test_nRaumHZG(k_Raum) -
      t_Abkuehlung)

    Else
      'Wenn nein: mittlere Abkühlung wird nicht berechnet und ist Null
      (neutral)
      dt_Abkuehlung_Raum_mittel(k_Raum) = 0

    End If

    'Zähler für keine Heizanforderung und Zähler für Test der deaktivierten Raumheizung
    wird NULL gesetzt
    n_Test_nRaumHZG(k_Raum)=0
    n_RS_nRaumHZG(k_Raum)=0

  Else

    'Wenn nein: Raum soll nicht beheizt werden

    n_Test_RaumHZG(k_Raum) = 0          'Zähler zum Test der aktiven Raumheizung wird NULL
                                        gesetzt
    n_RS_nRaumHZG(k_Raum)= n_RS_nRaumHZG(k_Raum) + 1 'Zähler für Raum ohne
                                                        Heizanforderung +1
  End If
End For

```

```

'Bedingungen zum Test der deaktivierten Raumheizung erfüllt? (Außentemperatur <<
Raumtemperatur, scheint keine Sonne (Hier abhängig von Uhrzeit), wird der Raum nicht
durch die RLT beheizt)
If T_Raum(k_Raum, i) - T_AUL(i) > dT_Raum_min AND (Zeit>Zeit_nHZG_Start Or Zeit <
Zeit_nHZG_Ende) AND ( A_ZUV(i)=0 OR ( A_ZUV(i)=-1 AND T_ZUL(i)<T_Raum(k_Raum, i)))
Then
    'Wenn ja: besteht schon seit 3h oder länger keine Heizanforderung?
    If n_RS_nRaumHZG(k_Raum)>t_Aktivitaet_min Then
        'Wenn ja: Aufsummieren der Daten des Bewegungsmelders und
        Fensteröffnung der letzten 3h
        Summe_Aktivitaet=0
        For j_RaumHZG=i-t_Aktivitaet_min to i
            Summe_Aktivitaet = Summe_Aktivitaet +
            A_Raum_Bewegung(k_Raum, j_RaumHZG) +
            A_Raum_Fenster(k_Raum, j_RaumHZG)
        Next

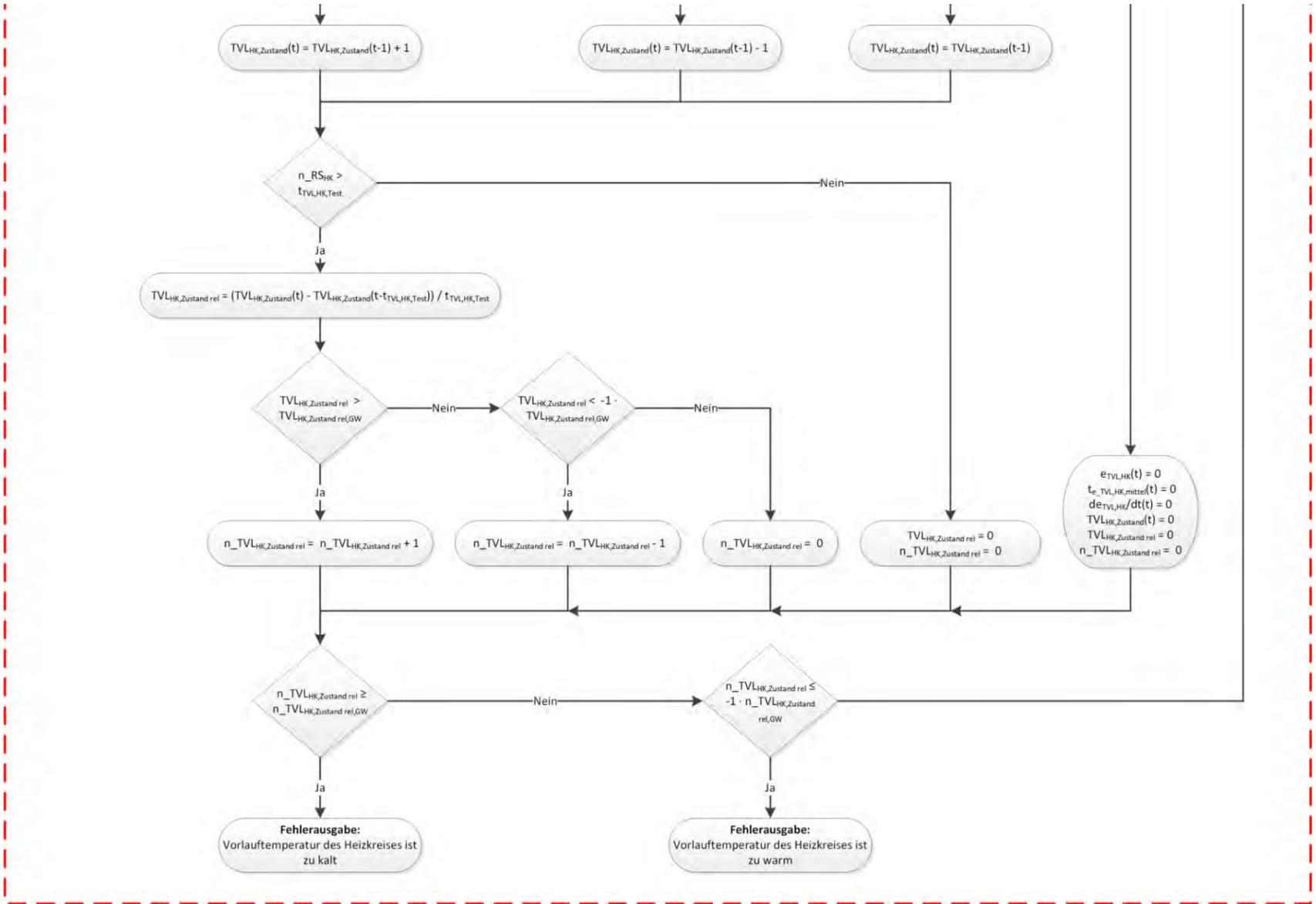
        'War in den letzten 3h keine Aktivität im Raum?
        If Summe_Aktivitaet=0 Then
            'Wenn ja (keine Aktivität im Raum): Zähler für Test der
            deaktivierten Raumheizung +1
            n_Test_nRaumHZG(k_Raum) = n_Test_nRaumHZG(k_Raum) + 1
        Else
            'Wenn nein (Aktivität im Raum): wurde evtl. ein ablaufender
            Test der deaktivierten Raumheizung durch eine Raumaktivität
            unterbrochen (liegen genügend Daten für um die mittlere
            Raumabkühlung zu berechnen vor)?
            If n_Test_nRaumHZG(k_Raum)> n_Test_nRaumHZG_min Then
                'Wenn ja (es liegen genügend Daten vor): Berechnung
                mittlere Raumabkühlung für den letzten Test der
                deaktivierten Raumheizung (bis i-1)
                For j_RaumHZG=i-1-n_Test_nRaumHZG(k_Raum)+
                t_Abkuehlung to i-1
                    dT_Abkuehlung_Raum_mittel(k_Raum) =
                    dT_Abkuehlung_Raum_mittel(k_Raum) +
                    dT_Abkuehlung_Raum (k_Raum, j_RaumHZG)
                Next
                dT_Abkuehlung_Raum_mittel(k_Raum) =
                dT_Abkuehlung_Raum_mittel(k_Raum) /
                (n_Test_nRaumHZG(k_Raum)- t_Abkuehlung)
            Else
                'Wenn nein: mittlere Abkühlung wird nicht berechnet und ist
                Null (neutral)
                dT_Abkuehlung_Raum_mittel(k_Raum) = 0
            End If
            'Aktivität im Raum: es wird der Zähler des Tests der
            deaktivierten Heizung gleich NULL gesetzt
            n_Test_nRaumHZG(k_Raum) = 0
        End If
    Else
        'Wenn nein (Raum noch nicht länger als 3h ohne Heizanforderung): wurde evtl.
        ein ablaufender Test der deaktivierten Raumheizung unterbrochen (sollte an
        der Stelle nicht der Fall sein??)
        If n_Test_nRaumHZG(k_Raum)> n_Test_nRaumHZG_min Then
            'Wenn ja (es liegen genügend Daten vor): Berechnung mittlere
            Raumabkühlung für den letzten Test der deaktivierten Raumheizung
            (bis i-1)
            For j_RaumHZG=i-1-n_Test_nRaumHZG(k_Raum)+ t_Abkuehlung
            to i-1
                dT_Abkuehlung_Raum_mittel(k_Raum) =
                dT_Abkuehlung_Raum_mittel(k_Raum) +
                dT_Abkuehlung_Raum(k_Raum, j_RaumHZG)
            Next
            dT_Abkuehlung_Raum_mittel(k_Raum) =
            dT_Abkuehlung_Raum_mittel(k_Raum) /
            (n_Test_nRaumHZG(k_Raum)- t_Abkuehlung)
        Else
            'Wenn nein: mittlere Abkühlung wird nicht berechnet und ist
            Null (neutral)
            dT_Abkuehlung_Raum_mittel(k_Raum) = 0
        End If
        'Raum noch nicht länger als 3h ohne Heizanforderung: es wird der
        Zähler des Tests der deaktivierten Heizung gleich NULL gesetzt
        n_Test_nRaumHZG(k_Raum) = 0
    End If
Else
    'Wenn nein (Bedingungen zum Test der deaktivierten Raumheizung NICHT erfüllt): wurde
    evtl. ein ablaufender Test der deaktivierten Raumheizung durch zu hohe
    Außentemperaturen, mögliche Sonneneinstrahlung (Uhrzeit) oder die RLT unterbrochen
    (liegen genügend Daten für um die mittlere Raumabkühlung zu berechnen vor)?
    If n_Test_nRaumHZG(k_Raum)> n_Test_nRaumHZG_min Then
        'Wenn ja (es liegen genügend Daten vor): Berechnung mittlere
        Raumabkühlung für den letzten Test der deaktivierten Raumheizung
        (bis i-1)
        For j_RaumHZG=i-1-n_Test_nRaumHZG(k_Raum)+ t_Abkuehlung to i-1
            dT_Abkuehlung_Raum_mittel(k_Raum) =
            dT_Abkuehlung_Raum_mittel(k_Raum) +
            dT_Abkuehlung_Raum (k_Raum, j_RaumHZG)
        Next
    End If
End If

```

```

dt_Abkuehlung_Raum_mittel(k_Raum) =
dt_Abkuehlung_Raum_mittel(k_Raum) / (n_Test_nRaumHZG(k_Raum) -
t_Abkuehlung)
Else
'Wenn nein: mittlere Abkühlung wird nicht berechnet und ist Null
(neutral)
dt_Abkuehlung_Raum_mittel(k_Raum) = 0
End If
'Außentemperatur zu hoch oder Sonneneinstrahlung möglich: es wird der Zähler
des Tests der deaktivierten Heizung gleich NULL gesetzt
n_Test_nRaumHZG(k_Raum) = 0
End If
End If
'Sind genügend Messwerte für Test der Inaktivität der Raumheizung vorhanden um die Abkühlung
über den Zeitraum t_Abkuehlung (126min) zu berechnen?
If n_Test_nRaumHZG(k_Raum) > t_Abkuehlung Then
'Wenn ja: Abkühlung gleich aktuelle Raumtemperatur minus Raumtemperatur vor 2h
dt_Abkuehlung_Raum (k_Raum,i)=T_Raum(k_Raum, i)-T_Raum(k_Raum, i - t_Abkuehlung)
Else
End If
End If
'Wurde eine mittlere Abkühlung bei der Beendigung der Tests der deaktivierten Raumheizung
berechnet und ist diese größer als dt_Abkuehlung_Raum_gr (0,05k)?
If dt_Abkuehlung_Raum_mittel(k_Raum) > dt_Abkuehlung_Raum_gr Then
'Wenn ja: Der Raum erwärmt sich ohne Heizanforderung -> Fehlerindikator nimmt der
Wert MINUS EINS an
Indikator_RaumHZG(k_Raum,i)=-1
Else
'Wenn nein: Es konnte kein Test der deaktivierten Raumheizung durchgeführt werden,
oder es wurde eine Abkühlung festgestellt -> Fehlerindikator nimmt der Wert NULL an
Indikator_RaumHZG(k_Raum,i)=0
End If
End If
'Ist die Raumheizung bereit 4h oder länger aktiv?
If n_Test_RaumHZG(k_Raum) > n_Test_RaumHZG_min Then
'Wenn ja: Zählen der vermuteten fehlerhaften Zustände der letzten 4h
Sum_Fehler_RaumHZG = 0
For j_RaumHZG = i - n_Test_RaumHZG_min to i
Sum_Fehler_RaumHZG = Sum_Fehler_RaumHZG +
Fehlerhaft_RaumHZG(k_Raum, j_RaumHZG)
Next
'Wurde in den letzten 4h dauerhaft ein Fehler zu kalt vermutet?
If Sum_Fehler_RaumHZG > 240 Then
'Wenn ja: Der Raum ist dauerhaft zu kalt (große Regeldifferenz) und erwärmt
sich nicht -> Fehlerindikator nimmt der Wert EINS an
Indikator_RaumHZG(k_Raum,i)= 1
Else
'Wurde in den letzten 4h dauerhaft ein Fehler zu warm vermutet?
If Sum_Fehler_RaumHZG < -240 Then
'Wenn ja: Der Raum ist dauerhaft zu warm (negative Regeldifferenz)
-> Fehlerindikator nimmt der Wert MINUS Zwei an;
regelungstechnischer Fehler
Indikator_RaumHZG(k_Raum,i)= -2
Else
'Wenn nein: Der Raum ist nicht dauerhaft zu kalt (große
Regeldifferenz) bzw. erwärmt sich und ist nicht dauerhaft zu warm
-> Fehlerindikator nimmt der Wert Null an
Indikator_RaumHZG(k_Raum,i)= 0
End If
End If
End If
Else
End If
Next

```

Umsetzung des Algorithmus zur Prüfung der Vorlauftemperatur

```
'Variablen Prüfung der Vorlauftemperatur im Heizbetrieb
'-----

Dim n_RS_FBH           'Zähler wie lang der Fußbodenheizkreis aktiv ist

Dim e_TVL_FBH          'Regeldifferenz Vorlauftemperatur im Heizkreis der Fußbodenheizung
Dim e_TVL_FBH_mittel   'Fenstermittelwert der Regeldifferenz Vorlauftemperatur über
                        'Zeitraum t_e_TVL_HK_mittel
Dim de_TVL_FBH_dt      'zeitliche Veränderung der Regeldifferenz über Zeitraum
                        't_de_TVL_HK_dt

ReDim e_TVL_FBH(iAnzahl)
ReDim e_TVL_FBH_mittel(iAnzahl)
ReDim de_TVL_FBH_dt(iAnzahl)

Dim e_TVL_FBH_Gr       'Grenzwert für Regeldifferenz Vorlauftemperatur
e_TVL_FBH_Gr = 3       'empirisch ermittelt

Dim T_VL_Max           'maximal zulässige Vorlauftemperatur
T_VL_Max = 55         '55°C wegen Bautenschutz bei Fußbodenheizung

Dim de_TVL_FBH_dt_Gr   'Grenzwert für zeitliche Veränderung der Regeldifferenz
de_TVL_FBH_dt_Gr = 0

Dim t_e_TVL_FBH_mittel 'Zeitraum(Fensterlänge) über den der Fenstermittelwert der
                        'Regeldifferenz e_TVL_HK_mittel berechnet wird
                        'Fenstermittelwert nutzt Daten einer Stunde
t_e_TVL_FBH_mittel = 60

Dim t_de_TVL_FBH_dt    'Zeitraum über den Regelabweichung differenziert wird
t_de_TVL_FBH_dt = 6    'in Daten schwingt die TVL einmal in ca. 6 min

Dim TVL_FBH_Zustand    'Vermerk des Zustands der Vorlauftemperatur anhand aktueller
                        'e_TVL_HK, e_TVL_HK_mittel und de_TVL_HK_dt; TVL zu kalt: 1; TVL zu
                        'warm: -1

ReDim TVL_FBH_Zustand(iAnzahl)
TVL_FBH_Zustand(0)=0  'Startzustand ist fehlerfrei

Dim TVL_FBH_Zustand_rel 'relative Fehlerhäufigkeit im untersuchten Zeitraum t_TVL_Test

Dim TVL_FBH_Zustand_Gr  'Grenzwert der relativen Fehlerhäufigkeit in Zeitraum t_TVL_Test
TVL_FBH_Zustand_Gr = 0.5

Dim TVL_FBH_Zaehler_Zustand 'zählen der Grenzwertverletzungen von TVL_FBH_Zustand_rel gegen
TVL_FBH_Zustand_Gr

Dim t_TVL_Test          'Zeitraum in dem die relative Fehlerhäufigkeit berechnet wird
t_TVL_Test = 180

Dim Indikator_TVL_FBH   'Indikator Zeigt einen Fehler der Vorlauftemperatur
                        'des Heizkreises an

'Prozedur zur Prüfung der Vorlauftemperatur im Heizbetrieb;
'wird später für jeden Zeitschritt i aufgerufen
'-----

'Ist der Fußbodenheizkreis aktiv?
If RS_FBH(i) = 1 Then
  'Wenn ja: Zähler für Heizkreisaktivität +1
  n_RS_FBH = n_RS_FBH + 1
Else
  'Wenn nein: Zähler für Heizkreisaktivität gleich NULL
  n_RS_FBH = 0
End If

'Heizkreis aktiv?
If n_RS_FBH > 0 Then

  'Wenn ja: Berechnung aktuelle Regeldifferenz
  e_TVL_FBH(i) = T_VL_FBH_soll(i) - T_VL_FBH(i)

  'Heizkreis lang genug aktiv um zeitliche Veränderung der Regeldifferenz zu berechnen?
  If n_RS_FBH > t_de_TVL_FBH_dt Then

    'Wenn ja: Berechnung zeitliche Veränderung der Regeldifferenz
    de_TVL_FBH_dt(i) = e_TVL_FBH(i) - e_TVL_FBH(i - t_de_TVL_FBH_dt)

    'Heizkreis lang genug aktiv um Fenstermittelwert der Regeldifferenz rekursiv
    'zu berechnen?
    If n_RS_FBH > t_e_TVL_FBH_mittel Then
      'Wenn ja: Rekursive Berechnung Fenstermittelwert
      e_TVL_FBH_mittel(i) = e_TVL_FBH_mittel(i-1) + 1/t_e_TVL_FBH_mittel
      *(e_TVL_FBH(i) - e_TVL_FBH(i - t_e_TVL_FBH_mittel))
    Else
      'Wenn nein: Berechnung des Fenstermittelwerts erfolgt über verfügbare
      'Fensterlänge n_RS_HK
      e_TVL_FBH_mittel(i)=0
    End If
  End If
End If
```

```

        For j=i-n_RS_FBH to i
            e_TVL_FBH_mittel(i)= e_TVL_FBH_mittel(i) + e_TVL_FBH(j)
        next
        e_TVL_FBH_mittel(i) = e_TVL_FBH_mittel(i)/n_RS_FBH
    End If

Else
    'Wenn nien: Veränderung der Regeldifferenz und Fenstermittelwert der Regeldifferenz
    gleich NULL
    de_TVL_FBH_dt(i) = 0
    e_TVL_FBH_mittel(i) = 0
End If

'Zuordnung von Zustand nach berechneten Regeldifferenzen

'Bedingungen für eine zu kalte Vorlauftemperatur erfüllt?
If (e_TVL_FBH(i)> e_TVL_FBH_Gr AND e_TVL_FBH_mittel(i) > e_TVL_FBH_Gr
AND de_TVL_FBH_dt(i) >= de_TVL_FBH_dt_Gr)
OR (e_TVL_FBH(i)> 2 * e_TVL_FBH_Gr AND e_TVL_FBH_mittel(i) > 2 * e_TVL_FBH_Gr) Then

    'Wenn ja: Zustand wird vermerkt indem vorherige Zustand um EINS erhöht wird
    TVL_FBH_Zustand(i) = TVL_FBH_Zustand(i-1) + 1

Else
    'Wenn nein: Bedingungen für eine zu warme Vorlauftemperatur erfüllt?
    If (e_TVL_FBH(i)< (-1) * e_TVL_FBH_Gr AND e_TVL_FBH_mittel(i) < (-1) * e_TVL_FBH_Gr
    AND de_TVL_FBH_dt(i) <= (-1) * de_TVL_FBH_dt_Gr)
    OR (e_TVL_FBH(i)< (-2) * e_TVL_FBH_Gr AND e_TVL_FBH_mittel(i) < (-2) * e_TVL_FBH_Gr)
    OR (T_VL_FBH(i) > T_VL_Max) Then

        'Wenn ja: Zustand wird vermerkt indem vorherige Zustand um EINS vermindert
        wird
        TVL_FBH_Zustand(i) = TVL_FBH_Zustand(i-1) - 1

    Else
        'Wenn nein: kein fehlerhafter Zustand; vorheriger Zustand wird zum aktuellen
        Zustand
        TVL_FBH_Zustand(i) = TVL_FBH_Zustand(i-1) + 0

    End If

End If

'Ist der Fußbodenheizkreis lang genug aktiv um TVL_FBH_Zustand(i) im Zeitraum t_TVL_Test
auszuwerten?
If n_RS_FBH > t_TVL_Test Then

    'Wenn ja: Berechnung relativer Fehlerhäufigkeit im Zeitraum
    TVL_FBH_Zustand_rel = (TVL_FBH_Zustand(i) - TVL_FBH_Zustand(i - t_TVL_Test)) /
    t_TVL_Test

    'Wird der Grenzwert der relativen Fehlerhäufigkeit für TVL zu kalt überschritten und
    ist aktuell die Bedingung für einen zu kalten Zustand erfüllt?
    If TVL_FBH_Zustand_rel > TVL_FBH_Zustand_Gr AND ((e_TVL_FBH(i) > e_TVL_FBH_Gr AND
    de_TVL_FBH_dt(i) >= de_TVL_FBH_dt_Gr) OR (e_TVL_FBH(i)> 2 * e_TVL_FBH_Gr) Then
        'Wenn ja: Vermerk der Überschreitung in einem Zähler
        TVL_FBH_Zaehler_Zustand = TVL_FBH_Zaehler_Zustand + 1

    Else
        'Wenn nein: Wird der Grenzwert der relativen Fehlerhäufigkeit für TVL zu
        warm überschritten und ist aktuell die Bedingung für einen zu warmen Zustand
        erfüllt?
        If TVL_FBH_Zustand_rel < (-1) * TVL_FBH_Zustand_Gr And ((e_TVL_FBH(i)< (-1) *
        e_TVL_FBH_Gr AND e_TVL_FBH_mittel(i) < (-1) * e_TVL_FBH_Gr AND
        de_TVL_FBH_dt(i) <= (-1) * de_TVL_FBH_dt_Gr) OR (e_TVL_FBH(i)< (-2) *
        e_TVL_FBH_Gr AND e_TVL_FBH_mittel(i) < (-2) * e_TVL_FBH_Gr) OR (T_VL_FBH(i) >
        T_VL_Max)) Then
            'Wenn ja: Vermerk der Überschreitung in einem Zähler
            TVL_FBH_Zaehler_Zustand = TVL_FBH_Zaehler_Zustand - 1

        Else
            'Wenn nein: Zähler wir auf NULL gesetzt
            TVL_FBH_Zaehler_Zustand = 0

        End If

    End If

Else
    'Wenn nein (Heizkreis kürzer als t_TVL_Test aktiv): Zähler und relative
    Fehlerhäufigkeit werden als fehlerfrei gesetzt
    TVL_FBH_Zustand_rel = 0
    TVL_FBH_Zaehler_Zustand = 0

End If

Else
    'Wenn nein (Heizkreis nicht aktiv): Variablen werden als fehlerfrei gesetzt
    e_TVL_FBH(i) = 0
    de_TVL_FBH_dt(i) = 0
    e_TVL_FBH_mittel(i) = 0
    TVL_FBH_Zustand(i) = 0
    TVL_FBH_Zustand_rel = 0
    TVL_FBH_Zaehler_Zustand = 0

End If

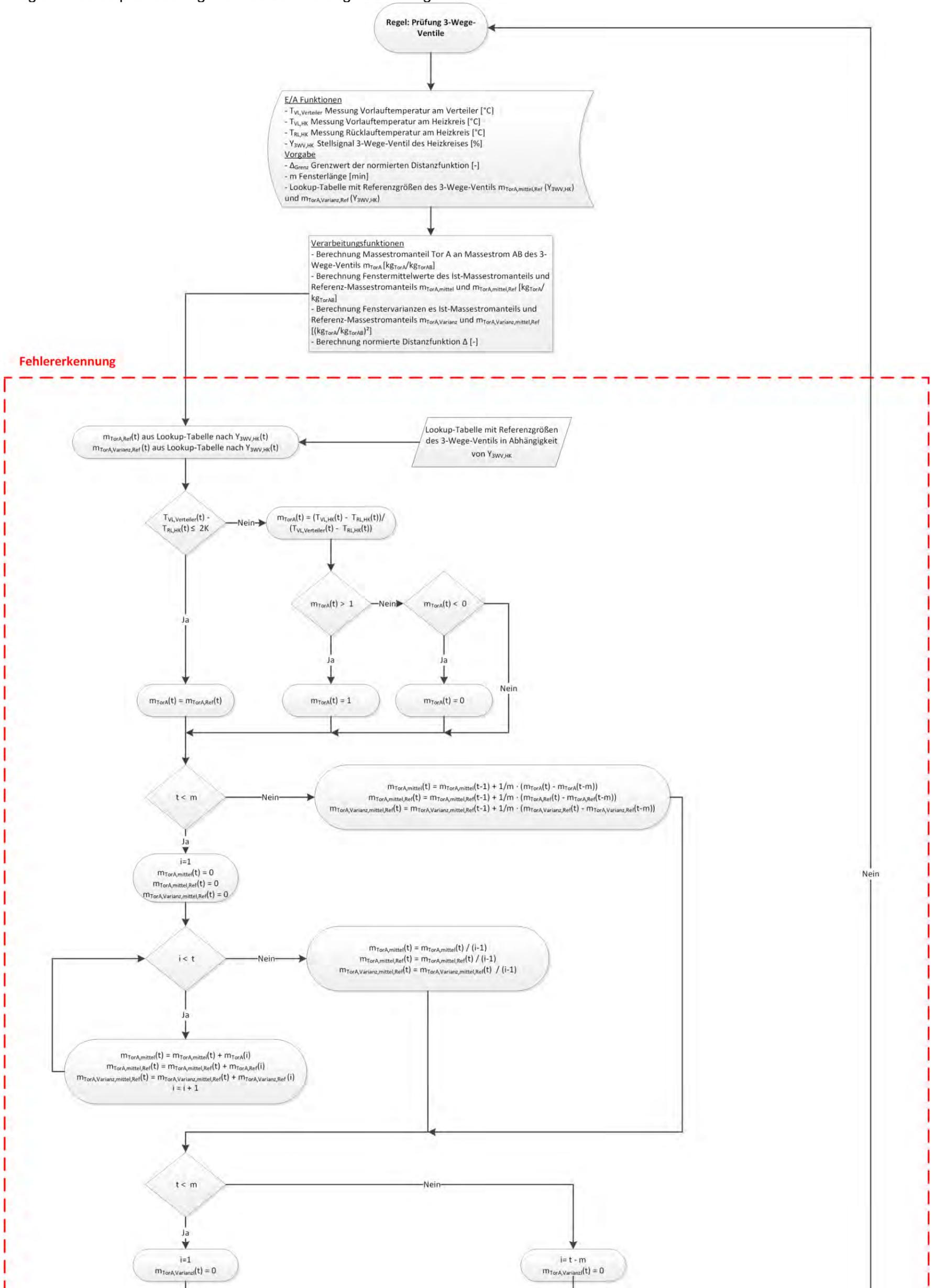
'Wurde der Grenzwert der relativen Fehlerhäufigkeit (für zu kalt) 30 min in Folge überschritten?
If TVL_FBH_Zaehler_Zustand>=30 Then

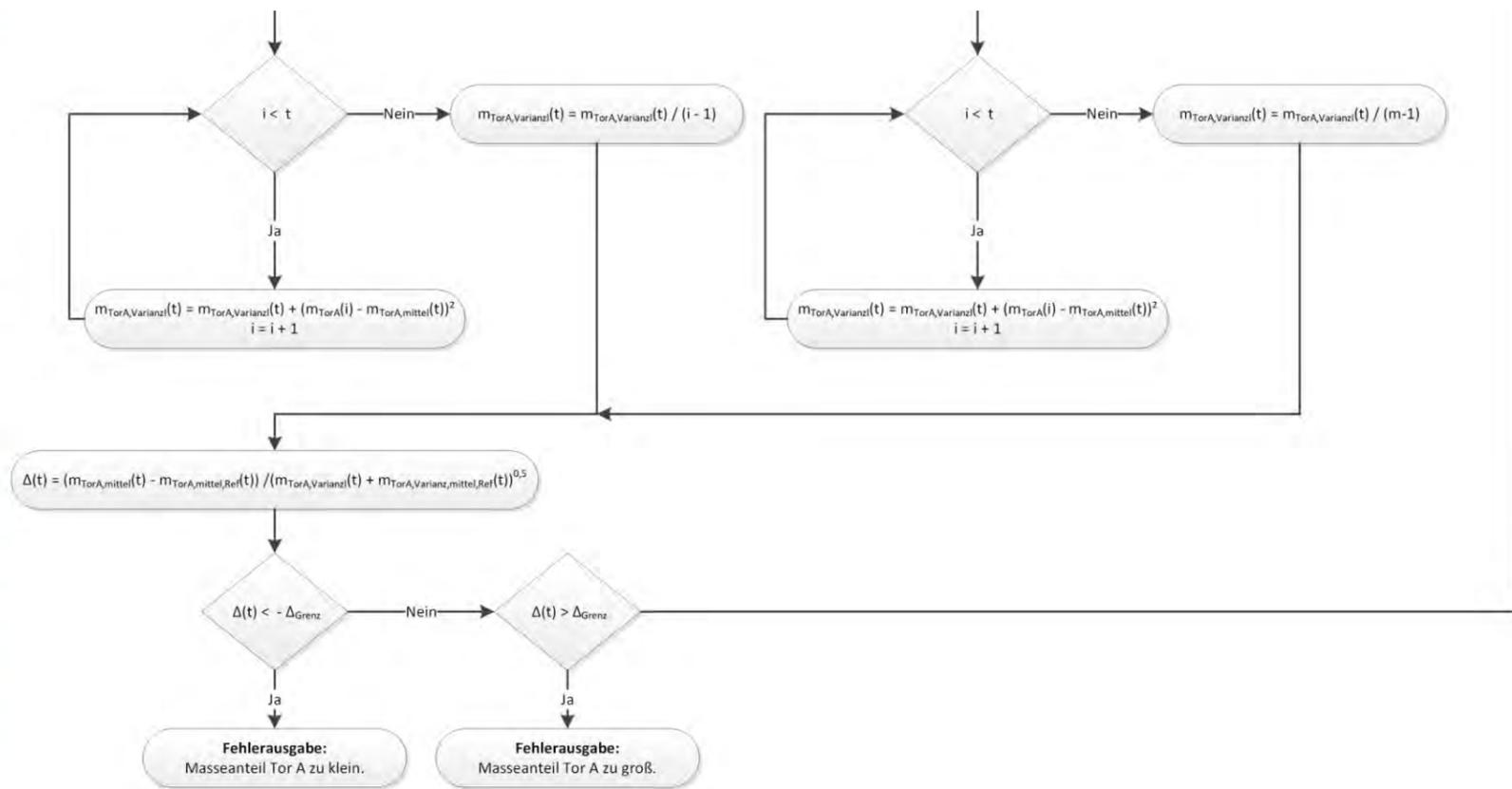
```

```
'Wenn ja: Fehlerindikator nimmt den Wert EINS an. Die Vorlauftemperatur des Heizkreises ist zu kalt
Indikator_TVL_FBH = 1
Else
'Wenn nein: Wurde der Grenzwert der relativen Fehlerhäufigkeit (für zu warm) 30 min in Folge überschritten?
If TVL_FBH_Zaehler_Zustand<=-30 Then
'Wenn ja: Fehlerindikator nimmt den Wert MINUS EINS an. Die Vorlauftemperatur des Heizkreises ist zu warm
Indikator_TVL_FBH = -1
Else
'Wenn nein: Fehlerindikator nimmt den Wert NULL an. Die Vorlauftemperatur des Heizkreises wurde als nicht fehlerhaft bewertet
Indikator_TVL_FBH = 0
End If
End If
```

A5-7: Fehlererkennung am 3-Wege-Misch-Ventil

Programmablaufplan des Algorithmus zur Prüfung des 3-Wege-Ventils





Umsetzung des Algorithmus zur Prüfung des 3-Wege-Ventils

```
'Variablen zur Prüfung des 3-Wege-Beimisch-Ventils durch des Massestromanteil des Tor A (vom
Verteiler) am Gesamtmassestrom des Tor AB (der FBH)
-----

dim m_Vert
Redim m_Vert(iAnzahl)                                'Feld für berechneten Massestromanteil des
                                                       Verteilers (Tor A)

dim m_Vert_mittel
Redim m_Vert_mittel(iAnzahl)                        'Feld für Fenstermittelwert vom Massestromanteil
                                                       des Verteilers (Tor A)

dim m_Vert_Varianz
Redim m_Vert_Varianz(iAnzahl)

dim m_Vert_Ref
Redim m_Vert_Ref(iAnzahl)                          'Feld für Referenz-Massestromanteil des Verteilers
                                                       (Tor A) aus Lookup

dim m_Vert_mittel_Ref
Redim m_Vert_mittel_Ref(iAnzahl)                   'Feld für Fenstermittelwert vom Referenz-
                                                       Massestromanteil des Verteilers

dim m_Vert_Varianz_Ref
Massestromanteil
Redim m_Vert_Varianz_Ref(iAnzahl)                  'Feld für Fenstervarianz des Referenz-
                                                       des Verteilers (Tor A) aus Lookup

dim m_Vert_Varianz_Ref_mittel
Redim m_Vert_Varianz_Ref_mittel(iAnzahl)          'Feld für gemittelte Fenstervarianz des Referenz-
                                                       Massestromanteil vom Verteiler

dim m_Vert_Distanz
Redim m_Vert_Distanz(iAnzahl)
dim m_Vert_Distanz_normiert
Redim m_Vert_Distanz_normiert(iAnzahl)            'Feld für Ergebnis der Distanzfunktion
                                                       'Feld für Ergebnis der normierten Distanzfunktion

dim Indikator_3WV_FBH
Redim Indikator_3WV_FBH(iAnzahl)                   'Indikator eines Fehlers am 3-Wege-Ventils

dim dT_VL_Vert_RL_FBH
                                                       'Minstdifferenz zwischen
                                                       Verteilervorlauftemperatur (T_VL_TorA bzw.
                                                       T_VL_Vert) und Rücklauftemperatur des Heizkreises
                                                       (T_RL_TorB bzw. T_RL_FBH) ab der der
                                                       Massestromanteil (m_Vert) berechnet wird

dT_VL_Vert_RL_FBH = 2

dim m
                                                       'genutzte Fensterlänge zur Berechnung
                                                       Fenstermittelwerte und Fenstervarianzen
m = 180

dim m_Vert_Distanz_normiert_Gr
m_Vert_Distanz_normiert_Gr = 3.2                   'Grenzwert für normierte Distanzfunktion

'Lookup mit 11 Mittelwerten und Varianzen in Abhängigkeit der Klasse
dim m_Vert_mittel_Lookup
Redim m_Vert_Lookup(11)
dim m_Vert_Varianz_Lookup
Redim m_Vert_Varianz_Lookup(11)

m_Vert_Lookup(0)=0.00985800652646688
m_Vert_Lookup(1)=0.0356313589417884
m_Vert_Lookup(2)=0.0605543455833089
m_Vert_Lookup(3)=0.172357939812906
m_Vert_Lookup(4)=0.500084779939398
m_Vert_Lookup(5)=0.603343746419108
m_Vert_Lookup(6)=0.740166395981868
m_Vert_Lookup(7)=0.855219497881785
m_Vert_Lookup(8)=0.946207600791395
m_Vert_Lookup(9)=0.975068801269295
m_Vert_Lookup(10)=1.00117603306307

m_Vert_Varianz_Lookup(0)=0.046395381701195^2
                                                       'In Lookup war Standardabweichung:
                                                       Standardabweichung hoch 2 ist die Varianz
m_Vert_Varianz_Lookup(1)=0.10345177454057^2
m_Vert_Varianz_Lookup(2)=0.0948511547542373^2
m_Vert_Varianz_Lookup(3)=0.133408726243384^2
m_Vert_Varianz_Lookup(4)=0.277243553547983^2
m_Vert_Varianz_Lookup(5)=0.246007886138341^2
m_Vert_Varianz_Lookup(6)=0.247652504696072^2
m_Vert_Varianz_Lookup(7)=0.266814931731919^2
m_Vert_Varianz_Lookup(8)=0.239342034751068^2
m_Vert_Varianz_Lookup(9)=0.171126433231171^2
m_Vert_Varianz_Lookup(10)=0.236703006425388^2

'Prüfung des 3-Wege-Ventils für jeden Zeitpunkt i in Anlage
-----

'Referenzwerte aus Lookup zuweisen
```

```

m_Vert_Varianz_Ref(i)=m_Vert_Varianz_Lookup(int(Y_3WV_FBH(i)/10) + Round(Y_3WV_FBH(i)/10 -
int(Y_3WV_FBH(i)/10) + 1) -1)

m_Vert_Ref(i)=m_Vert_Lookup(int(Y_3WV_FBH(i)/10) + Round(Y_3WV_FBH(i)/10 -
int(Y_3WV_FBH(i)/10) + 1) -1)
'aktueller Referenzwerte des Massestromanteils und Varianz in Abhängigkeit vom Stellsignal
aus Lookup auswählen; Adressierung der Lookup per Runden des Stellsignals;
leider kann vbs kein kaufmännisches Runden daher:
'int(Y_3WV_FBH(i)/10) + Round(Y_3WV_FBH(i)/10 - int(Y_3WV_FBH(i)/10) + 1) -1:
es wird aus dem Stellsignal von 0 bis 100% eine Ganzzahl zwischen 0 und 10 generiert, die
Funktion "Round" in vbs bevorzugt gerade Zahlen. bspw.: Round(1,5)=2 ; Round(2,5)=2

'Berechnung aktueller Massestromanteil an FB-Heizkreis

'Ist die T_VL im Verteiler um 2K höher als die T_RL der FBH und die Pumpe an?
Dient zur Verkleinerung des Messfehlereinflusses auf Berechnung
If T_VL_Vert(i) - T_RL_FBH(i)<dT_VL_Vert_RL_FBH OR A_PU_FBH(i) = 0 Then

    m_Vert(i)= m_Vert_Ref(i)           'kein großer Unterschied zwischen T_VL_Vert und
                                        T_RL_FBH bzw. Pumpe aus: aktuellen
                                        Mischungsverhältnis wird nicht geprüft und wird als
                                        fehlerfrei angenommen

Else
    'Unterschied zwischen T_VL_Vert und T_RL_FBH
    genügend groß
    'Berechnung Massestromanteil des Verteilers an FBH:
    m_Vert(i)= (T_VL_FBH(i) - T_RL_FBH(i))/(T_VL_Vert(i) - T_RL_FBH(i))

    'Wenn Ergebnis größer 1 dann EINS, wenn Ergebnis kleiner 0 dann NULL
    If m_Vert(i) > 1 Then
        m_Vert(i)=1
    ElseIf m_Vert(i) < 0 Then
        m_Vert(i) = 0
    Else
        End If

End If

'Berechnung aktueller Fenstermittelwerte der Massestromanteile Tor A (Ist und Referenz) sowie
aktuelle Fenstervarianz der Referenzwerte

'Ist die Anlage kürzer als die vorgegebene Fensterlänge in Betrieb?
If i<=m Then

'Wenn ja: geschlossene Berechnung der Fenstermittelwerte
m_Vert_mittel(i)=0           'Variablen für aktuelle Zeit NULL setzen
m_Vert_mittel_Ref(i)=0
m_Vert_Varianz_Ref_mittel(i)=0

for j=1 to i
    'Aufsummieren der Variablen von Anfang
    Anlagenbetrieb bis zum aktuellen Zeitpunkt i

    m_Vert_mittel(i)=m_Vert_mittel(i) + m_Vert(j)
    m_Vert_mittel_Ref(i)=m_Vert_mittel_Ref(i)+ m_Vert_Ref(j)

    m_Vert_Varianz_Ref_mittel(i)= m_Vert_Varianz_Ref_mittel(i)
    + m_Vert_Varianz_Ref(j)

Next

'Summen durch Anzahl der Zeitschritte teilen: Ergebnis ist arithmetisches Mittel
m_Vert_mittel(i)=m_Vert_mittel(i) / (j-1)
m_Vert_mittel_Ref(i)=m_Vert_mittel_Ref(i) / (j-1)

m_Vert_Varianz_Ref_mittel(i)=m_Vert_Varianz_Ref_mittel(i) / (j-1)

Else
'Wenn nein: Genügend Zeitschritte um mit Fenstergröße zu arbeiten,
Anwendung rekursive Berechnung

m_Vert_mittel(i)=m_Vert_mittel(i-1) + 1/m * (m_Vert(i)-m_Vert(i-m))
m_Vert_mittel_Ref(i)= m_Vert_mittel_Ref(i-1) + 1/m * (m_Vert_Ref(i)-m_Vert_Ref(i-m))

m_Vert_Varianz_Ref_mittel(i) = m_Vert_Varianz_Ref_mittel(i-1) +
1/m * (m_Vert_Varianz_Ref(i)-m_Vert_Varianz_Ref(i-m))

End If

'Berechnung aktueller Fenstervarianz des Massestromanteils Tor A (Ist)

'Ist die Anlage kürzer als die vorgegebene Fensterlänge in Betrieb?
If i < m Then
'Wenn ja: Geschlossene Berechnung der Fenstervarianz

m_Vert_Varianz(i)=0           'Variable für aktuelle Zeit NULL setzen

for j=1 to i
    'Aufsummieren der Variablen von Anfang
    Anlagenbetrieb bis zum aktuellen Zeitpunkt i

m_Vert_Varianz(i)= m_Vert_Varianz(i) + (m_Vert(j) - m_Vert_mittel(i))^2

```

```

Next
'Summe durch Anzahl der Zeitschritte teilen: Ergebnis ist Varianz
m_Vert_Varianz(i)=m_Vert_Varianz(i)/(j-1)

Else
'Wenn nein: Genügend Zeitschritte um mit Fenstergröße zu arbeiten,
Anwendung rekursive Berechnung oder geschlossen mit fester Fensterlänge

'Geschlossene Berechnung:
m_Vert_Varianz(i)=0          'Variable für aktuelle Zeit NULL setzen

for j=i-m to i              'Aufsummieren der Variablen von Anfang des
                            Zeitfensters bis zum aktuellen Zeitpunkt i

    m_Vert_Varianz(i)= m_Vert_Varianz(i) + (m_Vert(j) - m_Vert_mittel(i))^2

Next
'Summe durch (Fensterlänge -1) teilen: Ergebnis ist Varianz
m_Vert_Varianz(i)=m_Vert_Varianz(i)/(m - 1)

End If

'Berechnung der Distanzfunktionen

m_Vert_Distanz(i)=m_Vert_mittel(i)-m_Vert_mittel_Ref(i)

m_Vert_Distanz_normiert(i)= 2^0.5 * m_Vert_Distanz(i)/
(m_Vert_Varianz_Ref_mittel(i)+ m_Vert_Varianz(i))^0.5

'Ist das Ergebnis der normierten Distanzfunktion größer als der Grenzwert?
If m_Vert_Distanz_normiert(i)>m_Vert_Distanz_normiert_Gr Then

    'Wenn ja: Fehlerindikator gleich EINS
    -> Massestromanteil durch Tor A zu groß
    Indikator_3WV_FBH(i)=1

Else

    'Wenn nein: Ist das Ergebnis der normierten Distanzfunktion kleiner
    als -(MINUS) Grenzwert
    If m_Vert_Distanz_normiert(i)<(-1)*m_Vert_Distanz_normiert_Gr Then

        'Wenn ja: Fehlerindikator gleich MINUS EINS
        -> Massestromanteil durch Tor A zu klein
        Indikator_3WV_FBH(i)=-1

    Else

        'Wenn nein: Fehlerindikator gleich NULL
        -> Massestromanteil durch Tor A okay
        Indikator_3WV_FBH(i)=0

    End If

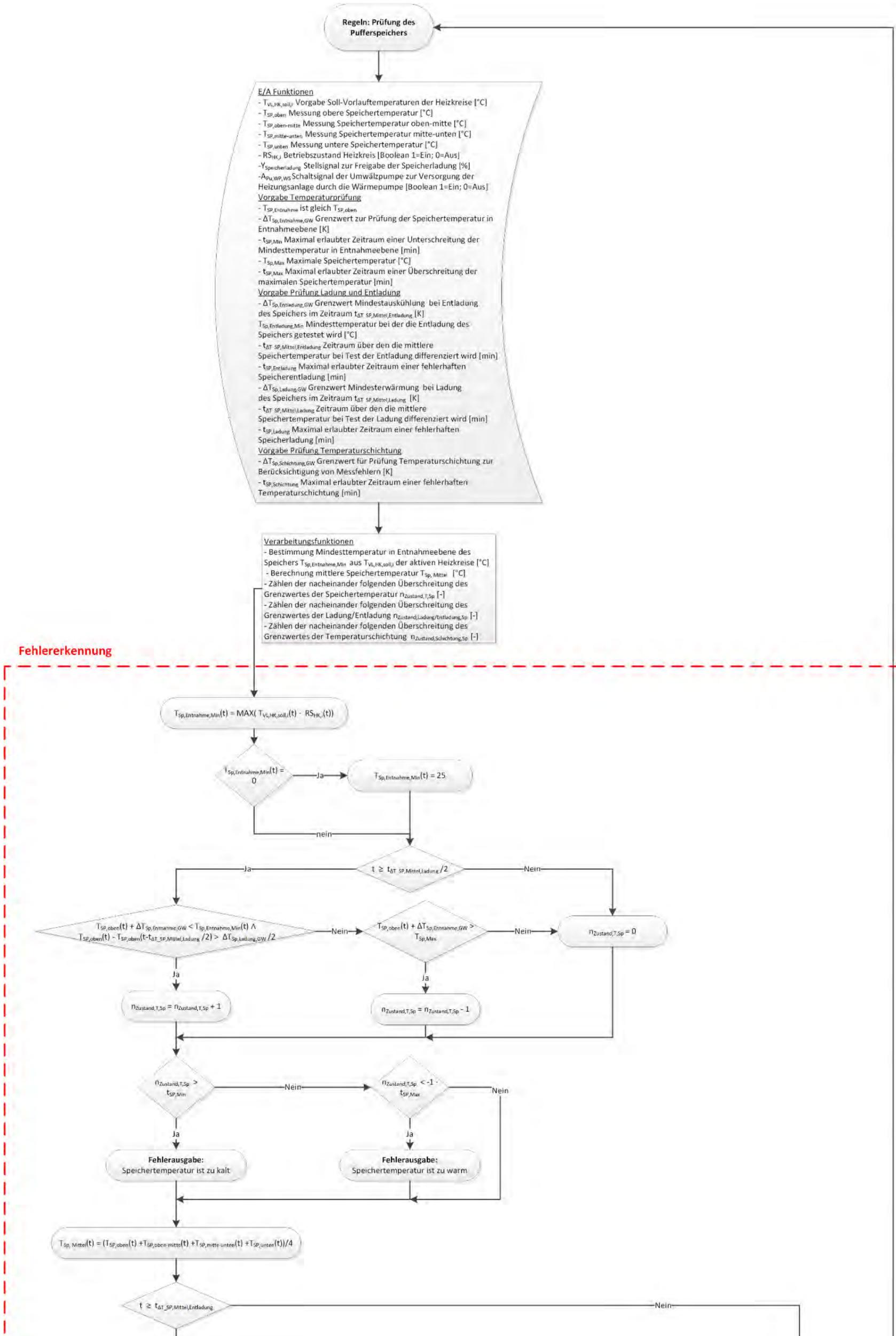
End If

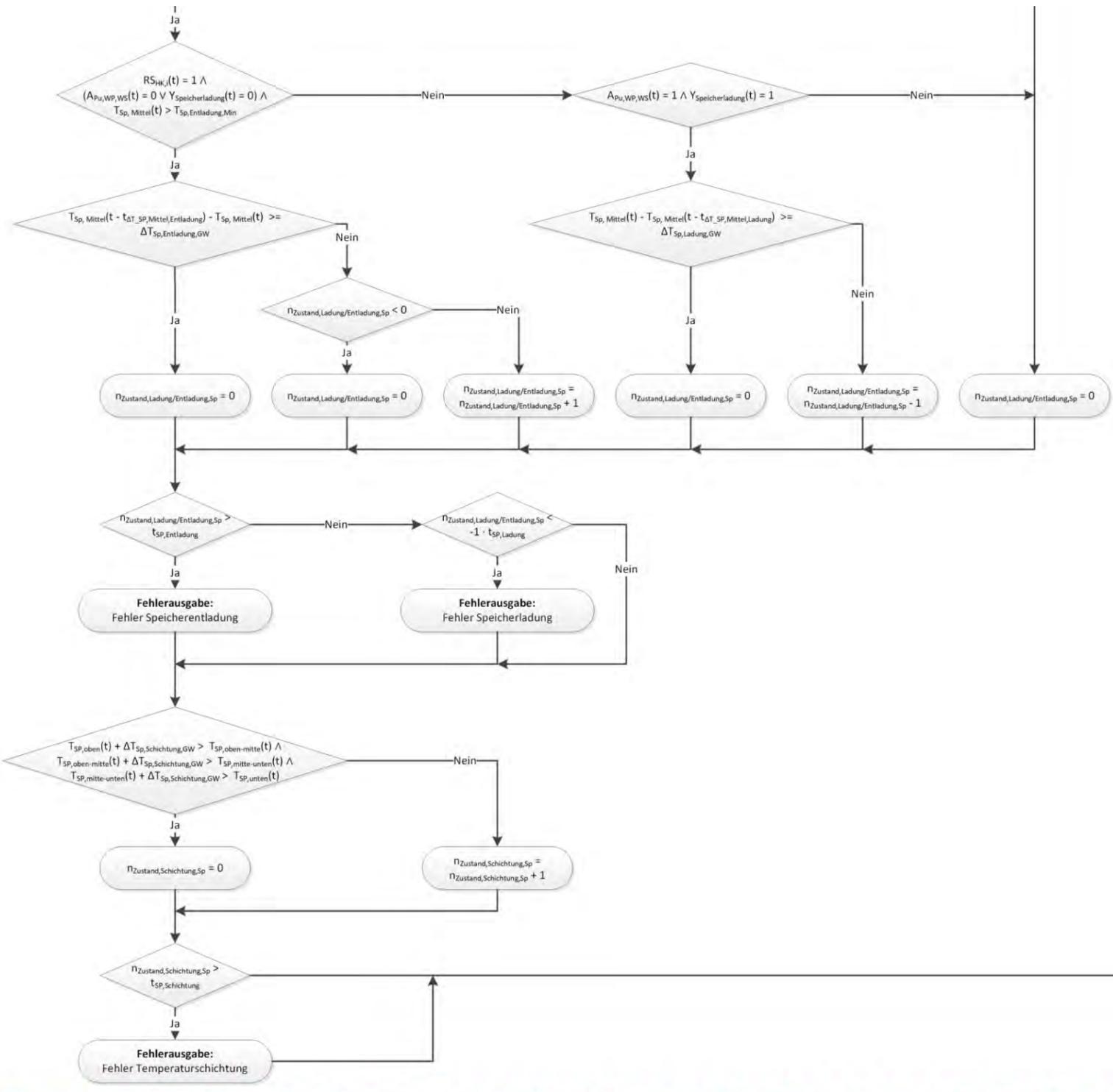
End If

```

A5-8: Fehlererkennung am Speicher

Programmablaufplan des Algorithmus zur Prüfung des Pufferspeichers





Umsetzung des Algorithmus zur Prüfung des Pufferspeichers

```

'Variablen Prüfung des linken Pufferspeichers
'-----

'Temperaturprüfung Min und Max
Dim T_SP_Li_Oben_Min                                'Mindest-Temperatur des Speichers in Entnahmeebene; Wird
                                                    anhand von Soll-VL-Temperaturen der angeschlossenen
                                                    Heizkreise bestimmt
Dim t_SP_Li_Min                                     'Maximal erlaubte Dauer der Unterschreitung von
t_SP_Li_Min = 180                                  T_SP_Li_Oben_Min in min

Dim T_SP_Li_Oben_Max                                'Maximale Temperatur des Speichers in Entnahmeebene; ist
T_SP_Li_Oben_Max = 50                              gleich maximale TVL der WP

Dim t_SP_Li_Max                                     'Maximal erlaubte Dauer der Überschreitung von
t_SP_Li_Max = 1                                    T_SP_Li_Oben_Max in min

Dim dT_SP_Li_Oben_GW                                'Grenzwert um den t_SP_Li_Min unter- bzw. T_SP_Li_Oben_Max
dT_SP_Li_Oben_GW = 3                              überschritten werden darf bevor der Zustand als fehlerhaft
                                                    gewertet wird

Dim n_Zustand_T_SP_Li                              'Variable zur Feststellung der Dauer eines fehlerhaften
                                                    Zustandes; 0 bedeutet fehlerfrei

Dim Indikator_SP_Li_Temperatur                      'Indikator gleich EINS wenn Speicher zu kalt; Indikator
                                                    gleich MINUS EINS wenn Speicher zu warm;

'Prüfung Laden und Entladen
Dim T_SP_Li_Mittel                                  'Variable zur Berechnung der mittleren Speichertemperatur
ReDim T_SP_Li_Mittel(iAnzahl)

Dim dT_SP_Li_Entladung_GW                           'Grenzwert beim Test der Speicher-Entladung; 0K -> wird der
dT_SP_Li_Entladung_GW = 0.5                       Speicher überhaupt kälter

Dim dT_SP_Li_Ladung_GW                              'Grenzwert beim Test der Speicher-Ladung; 0K Speicher wird
dT_SP_Li_Ladung_GW = 0.0                          nicht kälter

Dim t_dT_SP_Li_Mittel_Ladung                       'Zeit über welche die mittlere Speichertemperatur beim Test
t_dT_SP_Li_Mittel_Ladung = 30                     der Speicher-Ladung differenziert wird

Dim T_SP_Li_Entladung_Min                           'Minimum der mittleren Speichertemperatur bei der die
T_SP_Li_Entladung_Min = 30                         Speicher-Entladung noch getestet wird

Dim t_dT_SP_Li_Mittel_Entladung                     'Zeit über welche die mittlere Speichertemperatur beim Test
t_dT_SP_Li_Mittel_Entladung = 60                  der Speicher-Entladung differenziert wird

Dim t_SP_Li_Entladung                               'Maximal erlaubte Zeit ununterbrochener fehlerhafter
t_SP_Li_Entladung = 60                            Speicher-Entladezustände

Dim t_SP_Li_Ladung                                  'Maximal erlaubte Zeit ununterbrochener fehlerhafter
t_SP_Li_Ladung = 60                                Speicher-Ladezustände

Dim n_Zustand_Ladung_Entladung_SP_Li               'Variable zur Bestimmung der fehlerhaften Lade- und
                                                    Entlade-Zustände
Dim Indikator_SP_Li_Ladung_Entladung               'Indikator zum Anzeigen eines Fehlers während des Ladens
                                                    oder Entladens; 1: Fehler beim Entladen; -1: Fehler beim
                                                    Laden; 0: kein Fehler

'Prüfung Schichtung
Dim dT_Sp_Li_Schichtung_GW                         'Grenzwert um den die untere Speicherschicht wärmer als die
dT_Sp_Li_Schichtung_GW = 1.4                     obere sein darf (Berücksichtigung von Messfehlern der
                                                    Temperatursensoren)

Dim t_SP_Li_Schichtung                             'Maximal erlaubte Dauer einer fehlerhaften
t_SP_Li_Schichtung = 15                           Temperaturschichtung

Dim n_Zustand_Schichtung_SP_Li                     'Variable zur Feststellung der Dauer eines fehlerhaften
                                                    Zustandes; 0 bedeutet fehlerfrei
Dim Indikator_SP_Li_Schichtung                     'Indikator gleich EINS wenn Temperaturschichtung
                                                    fehlerhaft;

'Prüfung des linken Speichers; wird später für jeden Zeitschritt i aufgerufen
'-----

'Temperaturprüfung Min und Max
'-----

'Bestimmung Mindest-Speichertemperatur in Entladeebene aus Soll-Vorlauftemperaturen und Aktivität der
angeschlossenen Heizkreise
' Ist FBH Kreis aktiv und die Soll-Vorlauftemperatur des Lufterhitzerkreises kleiner?
If T_VL_FBH_Soll(i) * A_PU_FBH(i) * (-1) >= T_VL_LE_Soll(i) * A_PU_LE(i) * (-1) Then
    T_SP_Li_Oben_Min = T_VL_FBH_Soll(i)            'Wenn ja: Mindest-Speichertemperatur =
                                                    Soll-Vorlauftemperatur der FBH
Else

```

```

'Wenn nein: Ist der Lufterhitzer-Heizkreis aktiv?
If A_PU_LE(i) = -1 Then
    T_SP_Li_Oben_Min = T_VL_LE_Soll(i)'Wenn ja: Mindest-Speichertemperatur =
    Soll-Vorlaufstemperatur des Lufterhitzers
Else
    T_SP_Li_Oben_Min = 25 'Wenn nein: kein Heizkreis aktiv und
    Mindest-Speichertemperatur =
    25°C(empirisch)
End If
End If
'Ist die Anlage lang genug im Betrieb um die Differenz zu berechnen?
If i > t_dT_SP_Li_Mittel_Ladung/2 Then

    'Wird die Mindest-Speichertemperatur in Entladeebene unterschritten und steigt diese
    nicht an?
    If T_Sp_Li_Oben(i) + dT_SP_Li_Oben_GW < T_SP_Li_Oben_Min AND T_Sp_Li_Oben(i) -
    T_SP_Li_Oben(i- t_dT_SP_Li_Mittel_Ladung/2) <= dT_SP_Li_Ladung_GW/2 Then

        n_Zustand_T_SP_Li = n_Zustand_T_SP_Li + 1 'Wenn ja: Variable zur
        Feststellung der Dauer eines
        fehlerhaften Zustandes +1
    Else
        'Wenn nein: Wird die Maximale-Speichertemperatur überschritten
        If T_Sp_Li_Oben(i) - dT_SP_Li_Oben_GW > T_SP_Li_Oben_Max Then
            n_Zustand_T_SP_Li = n_Zustand_T_SP_Li - 1 'Wenn ja: Variable zur
            Feststellung der Dauer
            eines fehlerhaften
            Zustandes -1
        Else
            n_Zustand_T_SP_Li = 0 'Wenn nein: Speichertemperatur
            fehlerfrei und Variable zur
            Feststellung der Dauer eines
            fehlerhaften Zustandes gleich 0
        End If
    End If
Else
    n_Zustand_T_SP_Li = 0 'Wenn nein (Anlage noch nicht lang genug in Betrieb):
    Speichertemperatur wird als fehlerfrei angenommen und
    Variable zur Feststellung der Dauer eines fehlerhaften
    Zustandes gleich 0
End If

'Ist der Speicher dauerhaft zu kalt?
If n_Zustand_T_SP_Li > t_SP_Li_Min Then

    Indikator_SP_Li_Temperatur = 1 'Wenn ja: Indikator = 1
Else
    'Wenn nein: Ist der Speicher dauerhaft zu warm?
    If n_Zustand_T_SP_Li < (-1)*t_SP_Li_Max Then
        Indikator_SP_Li_Temperatur = -1 'Wenn ja: Indikator = -1
    Else
        Indikator_SP_Li_Temperatur = 0 'Wenn nein: Speichertemperatur fehlerfrei
        und Indikator = 0
    End If
End If

'Prüfung Ladung/Entladung
-----

'Berechnung mittlere Speichertemperatur
T_SP_Li_Mittel(i) = (T_Sp_Li_Oben(i) + T_Sp_Li_Mitte_Oben(i) + T_Sp_Li_Mitte_Unten(i) +
T_Sp_Li_Unten(i))/4

'Anlage lang genug in Betrieb für Test?
If i >= t_dT_SP_Li_Mittel_Entladung Then

    'Reiner Entladebetrieb des Speichers? (Keine Ladung des Speichers und nennenswerte Entnahme
    über mindestens einen Heizkreis und Speicher warm)
    If (Y_2WV_WW_Vorrang(i) = 0 Or A_PU_WP_WS(i)=0) And ((A_PU_FBH(i)=-1 And Y_3WV_FBH(i)
    >= 40) Or (A_PU_LE(i)=-1 And Y_3WV_LE(i) >= 40)) And T_SP_Li_Mittel(i)>30 Then

        'Wenn ja: Nimmt die mittlere Speichertemperatur ab?
        If T_SP_Li_Mittel(i - t_dT_SP_Li_Mittel_Entladung) - T_SP_Li_Mittel(i) >=
        dT_SP_Li_Entladung_GW Then

            n_Zustand_Ladung_Entladung_SP_Li = 0 'Wenn ja: Variable zur
            Feststellung der Dauer
            eines fehlerhaften
            Zustandes gleich 0
        Else
            'Wenn nein (mittlere Speichertemperatur nimmt nicht ab): Gab es zuvor einen
            fehlerhaften Ladezustand?

            If n_Zustand_Ladung_Entladung_SP_Li < 0 Then

                'Wenn ja: Variable zur Feststellung der Dauer eines
                fehlerhaften Zustandes gleich 0
                n_Zustand_Ladung_Entladung_SP_Li = 0
            Else

```

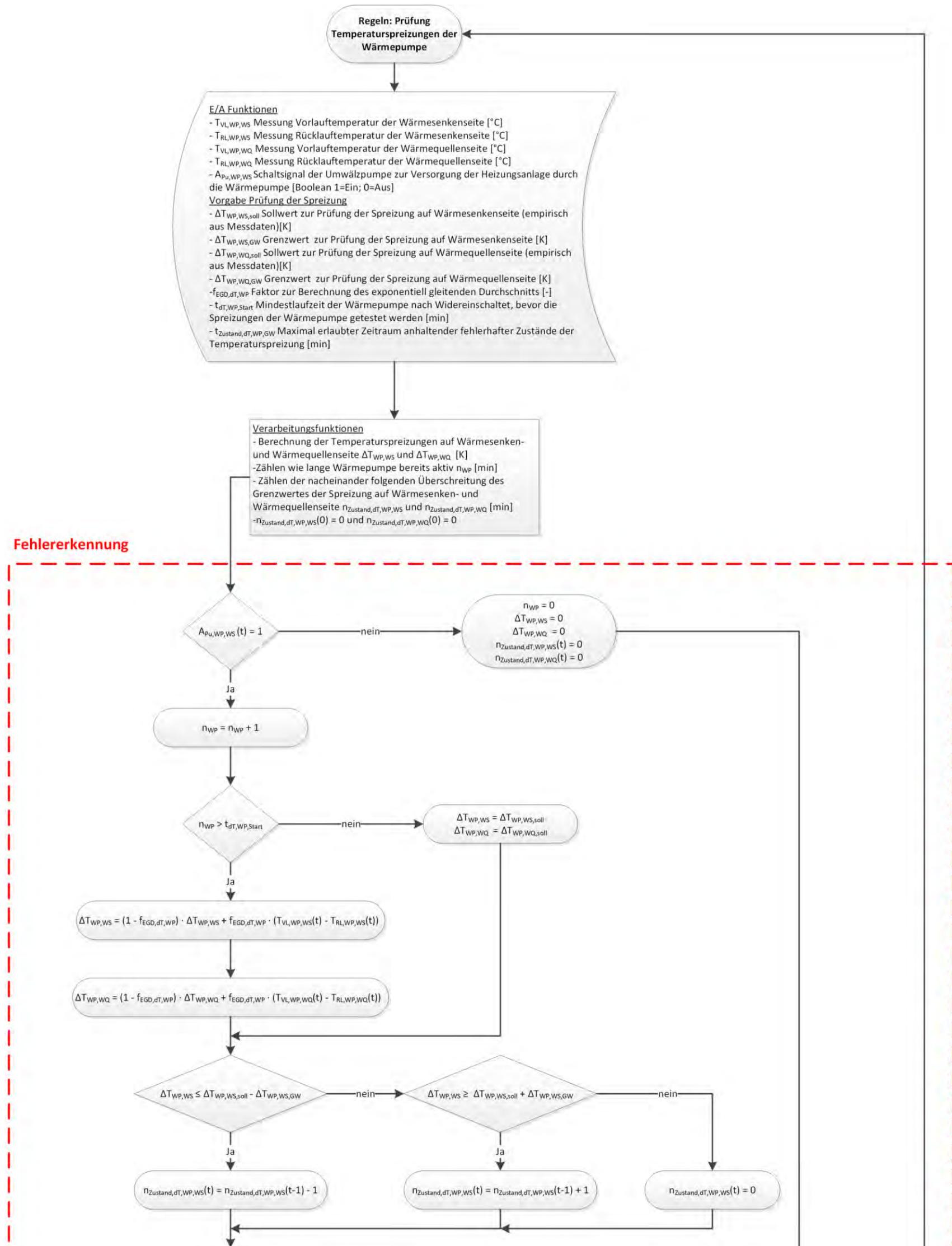
```

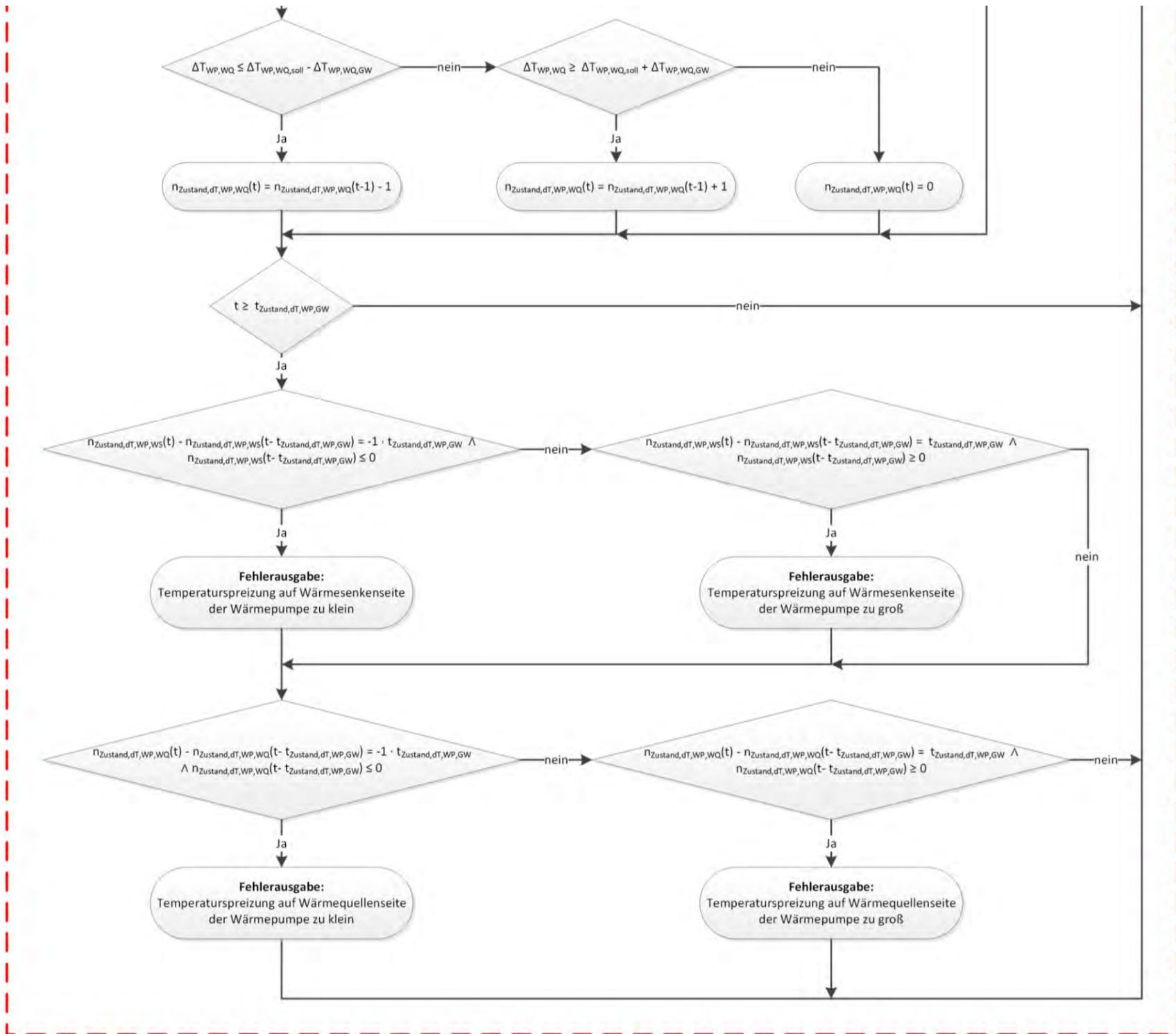
'Wenn nein: Variable zur Feststellung der Dauer eines
fehlerhaften Zustandes +1
n_Zustand_Ladung_Entladung_SP_Li =
n_Zustand_Ladung_Entladung_SP_Li + 1
End If
End If
Else
'Wenn nein (Speicher wird nicht nur entladen): Wird der Speicher geladen?
If Y_2WV_WW_Vorrang(i) = -1 And A_PU_WP_WS(i) = -1 Then
'Wenn ja: Nimmt die mittlere Speichertemperatur zu?
If T_SP_Li_Mittel(i) - T_SP_Li_Mittel(i - t_dT_SP_Li_Mittel_Ladung)
>= dt_SP_Li_Ladung_GW Then
'Wenn ja (Speichertemperatur nimmt zu): Variable zur
Feststellung der Dauer eines fehlerhaften Zustandes gleich 0
n_Zustand_Ladung_Entladung_SP_Li = 0
Else
'Wenn nein: Variable zur Feststellung der Dauer eines fehlerhaften
Zustandes -1
n_Zustand_Ladung_Entladung_SP_Li =
n_Zustand_Ladung_Entladung_SP_Li - 1
End If
Else
'Speicher wird nicht geladen und befindet sich nicht im reinen
Entladezustand: Variable zur Feststellung der Dauer eines fehlerhaften
Zustandes gleich 0
n_Zustand_Ladung_Entladung_SP_Li = 0
End If
End if
Else
'Anlage noch nicht lang genug in Betrieb um Test durchzuführen: Variable zur Feststellung der
Dauer eines fehlerhaften Zustandes gleich 0
n_Zustand_Ladung_Entladung_SP_Li = 0
End If
'Gibt es einen dauerhaften Fehler der Entladung des Speichers?
If n_Zustand_Ladung_Entladung_SP_Li >= t_SP_Li_Entladung Then
Indikator_SP_Li_Ladung_Entladung = 1 'Wenn ja: Fehlerindikator gleich EINS
Else
'Wenn nein: Gibt es einen dauerhaften Fehler der Ladung des Speichers?
If n_Zustand_Ladung_Entladung_SP_Li <= t_SP_Li_Ladung * (-1) Then
Indikator_SP_Li_Ladung_Entladung = -1 'Wenn ja: Fehlerindikator gleich
MINUS EINS
Else
Indikator_SP_Li_Ladung_Entladung = 0 'Wenn nein: Fehlerindikator gleich
NULL
End If
End If
'Prüfung Temperaturschichtung
'-----
'Ist die jede Pufferspeicherschicht wärmer als die darunterliegende?
If T_Sp_Li_Oben(i) + dt_Sp_Li_Schichtung_GW > T_Sp_Li_Mitte_Oben(i) AND
T_Sp_Li_Mitte_Oben(i) + dt_Sp_Li_Schichtung_GW > T_Sp_Li_Mitte_Unten(i) AND
T_Sp_Li_Mitte_Unten(i) + dt_Sp_Li_Schichtung_GW > T_Sp_Li_Unten(i) Then
n_Zustand_Schichtung_SP_Li = 0 'Wenn ja: Variable zur Feststellung der Dauer eines
fehlerhaften Zustandes gleich 0
Else
'Wenn nein: Variable zur Feststellung der Dauer eines fehlerhaften Zustandes +1
n_Zustand_Schichtung_SP_Li = n_Zustand_Schichtung_SP_Li + 1
End If
'Gibt es einen dauerhaften Fehler der Temperaturschichtung im Speicher?
If n_Zustand_Schichtung_SP_Li > t_SP_Li_Schichtung Then
Indikator_SP_Li_Schichtung = -1 'Wenn ja: Fehlerindikator gleich MINUS EINS
Else
Indikator_SP_Li_Schichtung = 0 'Wenn nein: Fehlerindikator gleich NULL
End If

```

A5-9: Fehlererkennung anhand der Wärmepumpenspreizung

Programmablaufplan des Algorithmus zur Prüfung der Temperaturspreizungen der Wärmepumpe auf Wärmesenken- und Wärmequellenseite





Umsetzung des Algorithmus zur Prüfung der Temperaturspreizungen der Wärmepumpe auf Wärmesenken- und Wärmequellenseite

```

'Variablen zur Prüfung der Temperaturspreizungen der Wärmepumpe
'-----

Dim dt_WP_WS          'Variable zur Berechnung der Temperaturspreizung auf Wärmesenkenseite
Dim dt_WP_WS_soll     'Sollwert der Temperaturspreizung auf Wärmesenkenseite
dt_WP_WS_soll = 5.2

Dim dt_WP_WS_GW       'Grenzwert zur Fehlererkennung der Temperaturspreizung auf Wärmesenkenseite
'Festlegung auf 0,25 * Sollwert
dt_WP_WS_GW = 1.3

Dim dt_WP_WQ          'Variable zur Berechnung der Temperaturspreizung auf Wärmequellenseite
Dim dt_WP_WQ_soll     'Sollwert der Temperaturspreizung auf Wärmequellenseite
dt_WP_WQ_soll = 3.7

Dim dt_WP_WQ_GW       'Grenzwert zur Fehlererkennung der Temperaturspreizung auf Wärmequellenseite
'Festlegung auf 0,25 * Sollwert
dt_WP_WQ_GW = 0.93

Dim F_EGD_dt_WP       'Faktor zur Berechnung des exponentiell gleitenden Durchschnitts der
'Temperaturspreizungen
F_EGD_dt_WP = 0.05

Dim n_A_PU_WP_WS      'Zähler zur Bestimmung wie lang die Wärmesenkenseite - und damit auch die
'Wärmepumpe - bereits aktiv ist?
n_A_PU_WP_WS = 0

Dim t_dt_WP_Start     'Variable gibt vor wie viele Minuten die Wärmepumpe aktiv sein soll bevor
' Berechnungen und Tests beginnen
t_dt_WP_Start = 5

Dim n_Zustand_WP_WS   'Variable zum Vermerk des Zustands der Temperaturspreizung auf
'Wärmesenkenseite für jeden Zeitschritt
ReDim n_Zustand_WP_WS(iAnzahl)

Dim n_Zustand_WP_WQ   'Variable zum Vermerk des Zustands der Temperaturspreizung auf
'Wärmequellenseite für jeden Zeitschritt
ReDim n_Zustand_WP_WQ(iAnzahl)

Dim t_Zustand_dt_WP_GW 'Grenzwert maximal zulässiger fehlerhafter Zustände in folge
t_Zustand_dt_WP_GW = 30

Dim Indikator_dt_WP_WS 'Indikator zeigt Fehler auf Wärmesenkenseite an
Dim Indikator_dt_WP_WQ 'Indikator zeigt Fehler auf Wärmequellenseite an

'-----
'Prüfung der Spreizung, wenn Wärmepumpe eingeschaltet; wird für jeden Zeitschritt i aufgerufen
'-----

'Prüfung ob Wärmepumpe aktiv per Schaltsignal Wärmesenken-Pumpe (-1 = EIN)
If A_PU_WP_WS(i)<0 Then

    n_A_PU_WP_WS = n_A_PU_WP_WS + 1      'Wenn WP aktiv, Zähler für Aktivität der WP +1

    'Ist WP länger als t_dt_WP_Start (5min) aktiv?
    If n_A_PU_WP_WS >= t_dt_WP_Start Then
        'Wenn ja: Berechnung der Spreizungen als exponentiell gleitender Durchschnitt
        dt_WP_WS = (1-F_EGD_dt_WP) * dt_WP_WS + F_EGD_dt_WP * (T_VL_WP(i) - T_RL_WP(i))
        dt_WP_WQ = (1-F_EGD_dt_WP) * dt_WP_WQ + F_EGD_dt_WP * (T_VL_WP_WQ(i) - T_RL_WP_WQ(i))

    Else
        'Wenn nein: Spreizung wird als fehlerfrei angenommen
        dt_WP_WS = dt_WP_WS_soll
        dt_WP_WQ = dt_WP_WQ_soll

    End If

    'Bewertung Spreizung auf Wärmesenkenseite
    'Ist die aktuelle Spreizung zu klein?
    If dt_WP_WS <= dt_WP_WS_soll - dt_WP_WS_GW Then
        n_Zustand_WP_WS(i) = n_Zustand_WP_WS(i-1) - 1      'Wenn ja: Vermerk eines
'fehlerhaften Zustands durch -1

    Else
        'Wenn nein: Ist die aktuelle Spreizung zu groß?
        If dt_WP_WS >= dt_WP_WS_soll + dt_WP_WS_GW Then
            n_Zustand_WP_WS(i) = n_Zustand_WP_WS(i-1) + 1      'Wenn ja: Vermerk eines
'fehlerhaften Zustands
'durch +1

        Else
            'Wenn nein (Spreizung weder zu groß noch zu klein): Zustand ist fehlerfrei
            n_Zustand_WP_WS(i) = 0

        End If

    End If

End If

```

```

'Bewertung Spreizung auf Wärmequellenseite
'Ist die aktuelle Spreizung zu klein?
If dT_WP_WQ <= dT_WP_WQ_soll - dT_WP_WQ_GW Then
    n_Zustand_WP_WQ(i) = n_Zustand_WP_WQ(i-1) - 1      'Wenn ja: Vermerk eines
                                                        fehlerhaften Zustands durch -1
Else
    'Wenn nein: Ist die aktuelle Spreizung zu groß?
    If dT_WP_WQ >= dT_WP_WS_soll + dT_WP_WQ_GW Then
        n_Zustand_WP_WQ(i) = n_Zustand_WP_WQ(i-1) + 1  'Wenn ja: Vermerk eines
                                                        fehlerhaften Zustands
                                                        durch +1
    Else
        'Wenn nein (Spreizung weder zu groß noch zu klein): Zustand ist fehlerfrei
        n_Zustand_WP_WQ(i) = 0
    End If
End If

Else
    'Wärmepumpe ist nicht aktiv: Spreizung gleich 0K und keine fehlerhaften Zustände
    n_A_PU_WP_WS = 0
    dT_WP_WS = 0
    dT_WP_WQ = 0
    n_Zustand_WP_WS(i) = 0
    n_Zustand_WP_WQ(i) = 0
End If

'Ist der Prüfalgorithmus länger als t_Zustand_dT_WP_GW aktiv?
If i > t_Zustand_dT_WP_GW Then

    'Wenn ja: Auswertung der Zustände der Wärmesenken- und Wärmequellenseite

    'Wärmesenke: Gibt es im betrachteten Zeitraum mehr als MINUS t_Zustand_dT_WP_GW fehlerhafte zu
    Zustände UND war die Spreizung vor t_Zustand_dT_WP_GW nicht zu groß?
    If n_Zustand_WP_WS(i) - n_Zustand_WP_WS(i-t_Zustand_dT_WP_GW) = (-1) * t_Zustand_dT_WP_GW
    And n_Zustand_WP_WS(i-t_Zustand_dT_WP_GW) <= 0 Then

        Indikator_dT_WP_WS = 1      'Wenn ja: Spreizung WS wird als zu klein bewertet

    Else
        'Wenn nein (Wärmesenken-Spreizung nicht zu klein): Gibt es im betrachteten Zeitraum mehr als
        t_Zustand_dT_WP_GW fehlerhafte zu Zustände UND war die Spreizung vor t_Zustand_dT_WP_GW nicht
        zu klein?
        If n_Zustand_WP_WS(i) - n_Zustand_WP_WS(i-t_Zustand_dT_WP_GW) = t_Zustand_dT_WP_GW
        And n_Zustand_WP_WS(i-t_Zustand_dT_WP_GW) >= 0 Then

            Indikator_dT_WP_WS = -1  'Wenn ja: Spreizung WS wird als zu groß bewertet

        Else
            Indikator_dT_WP_WS = 0   'Wenn nein: Spreizung WS wird als okay bewertet
        End If
    End If

    'Wärmequelle: Gibt es im betrachteten Zeitraum mehr als MINUS t_Zustand_dT_WP_GW fehlerhaft zu
    Zustände UND war die Spreizung vor t_Zustand_dT_WP_GW nicht zu groß?
    If n_Zustand_WP_WQ(i) - n_Zustand_WP_WQ(i-t_Zustand_dT_WP_GW) = (-1) * t_Zustand_dT_WP_GW
    And n_Zustand_WP_WQ(i-t_Zustand_dT_WP_GW) <= 0 Then

        Indikator_dT_WP_WQ = 1      'Wenn ja: Spreizung WQ wird als zu klein bewertet

    Else
        'Wenn nein (Wärmequellen-Spreizung nicht zu klein): Gibt es im betrachteten Zeitraum mehr als
        t_Zustand_dT_WP_GW fehlerhaft zu Zustände UND war die Spreizung vor t_Zustand_dT_WP_GW nicht
        zu klein?
        If n_Zustand_WP_WQ(i) - n_Zustand_WP_WQ(i-t_Zustand_dT_WP_GW) = t_Zustand_dT_WP_GW
        And n_Zustand_WP_WQ(i-t_Zustand_dT_WP_GW) >= 0 Then

            Indikator_dT_WP_WQ = -1  'Wenn ja: Spreizung WQ wird als zu groß bewertet

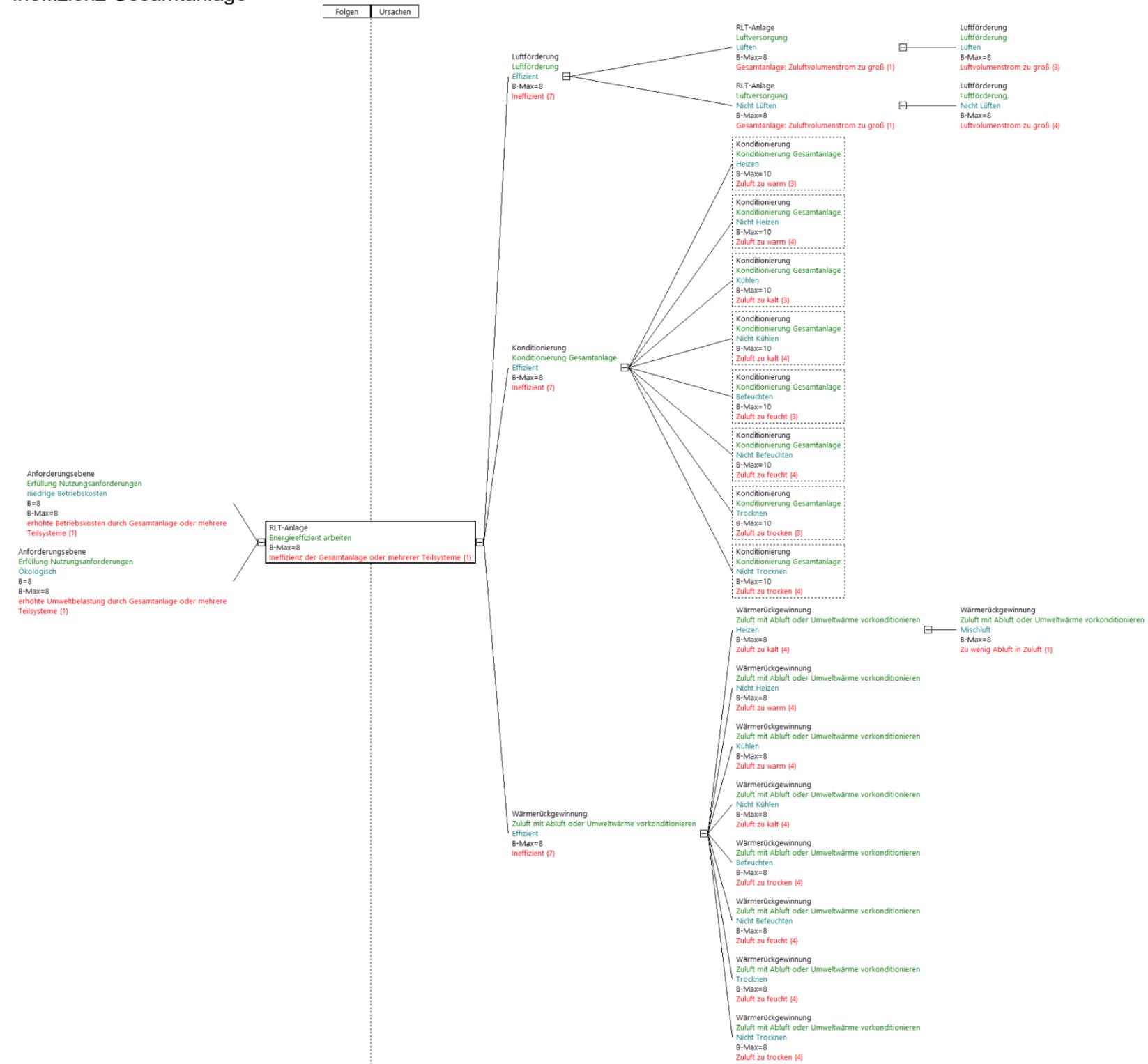
        Else
            Indikator_dT_WP_WQ = 0   'Wenn nein: Spreizung WQ wird als okay bewertet
        End If
    End If

Else
    'Wenn nein (Prüfalgorithmus nicht länger als t_Zustand_dT_WP_GW aktiv): Spreizung wird als
    fehlerfrei bewertet
    Indikator_dT_WP_WS = 0
    Indikator_dT_WP_WQ = 0
End If

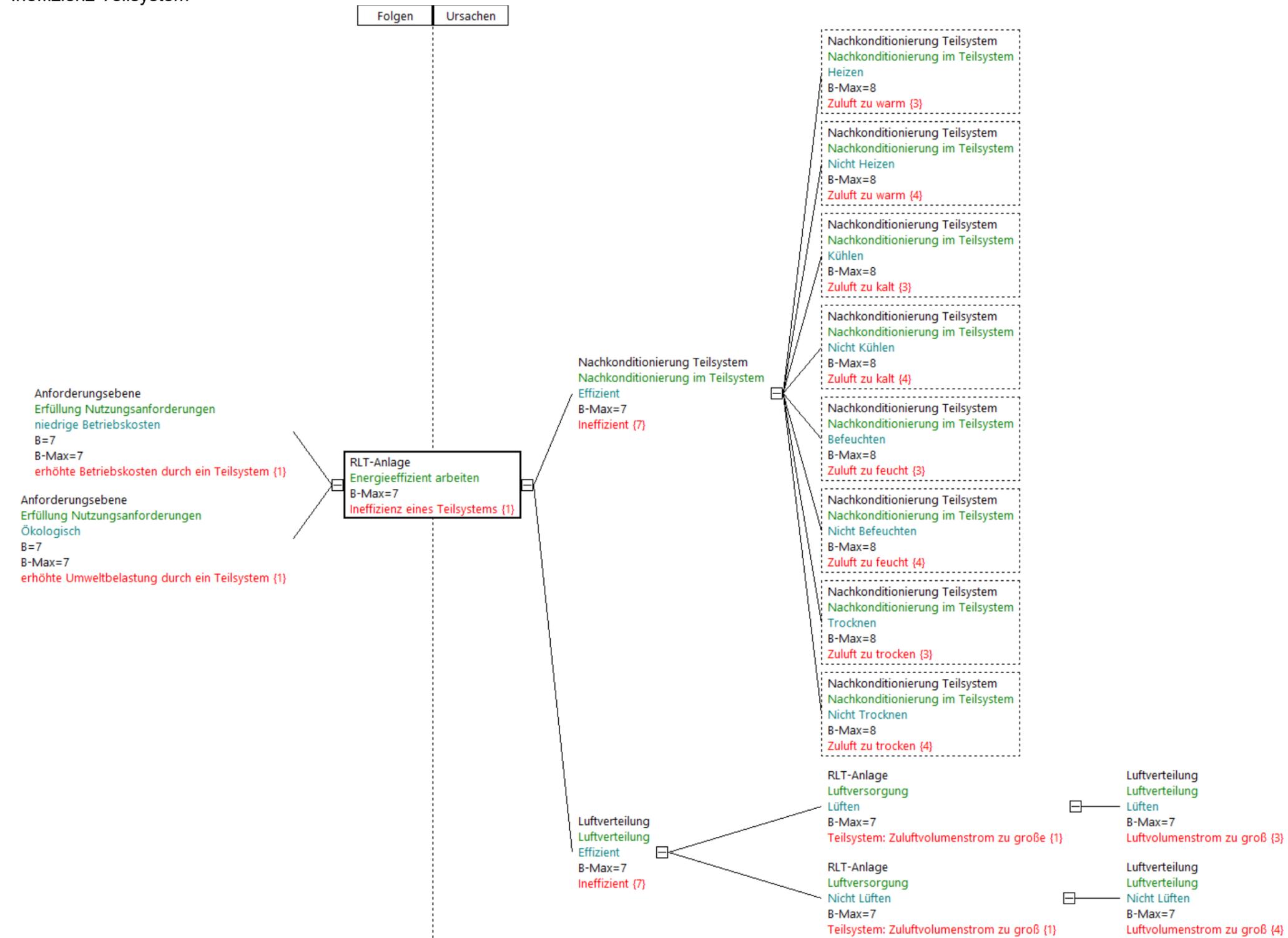
```

A6 RLT-Anlage

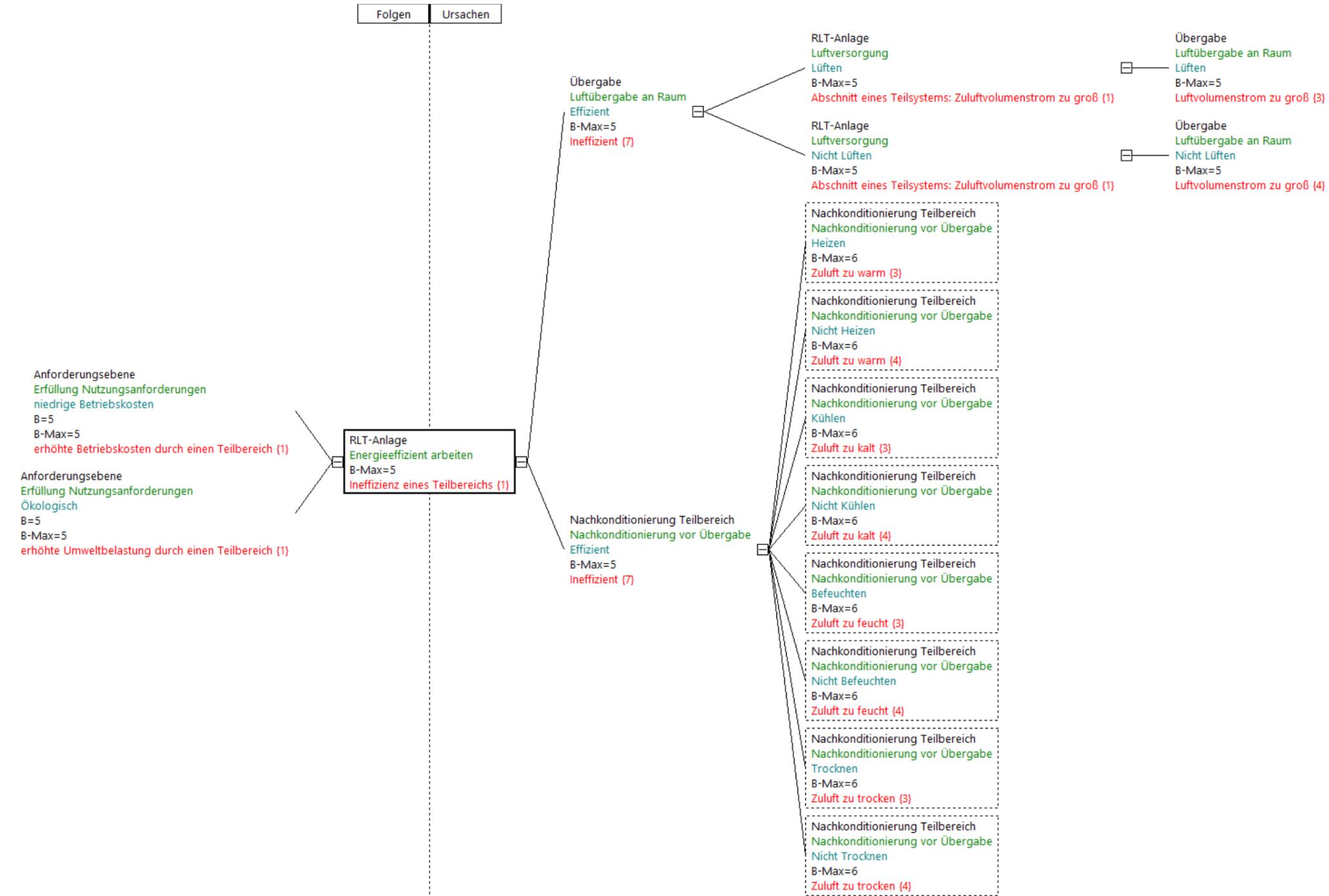
A6-1: Fehlernetz der RLT-Grundstruktur Ineffizienz Gesamtanlage



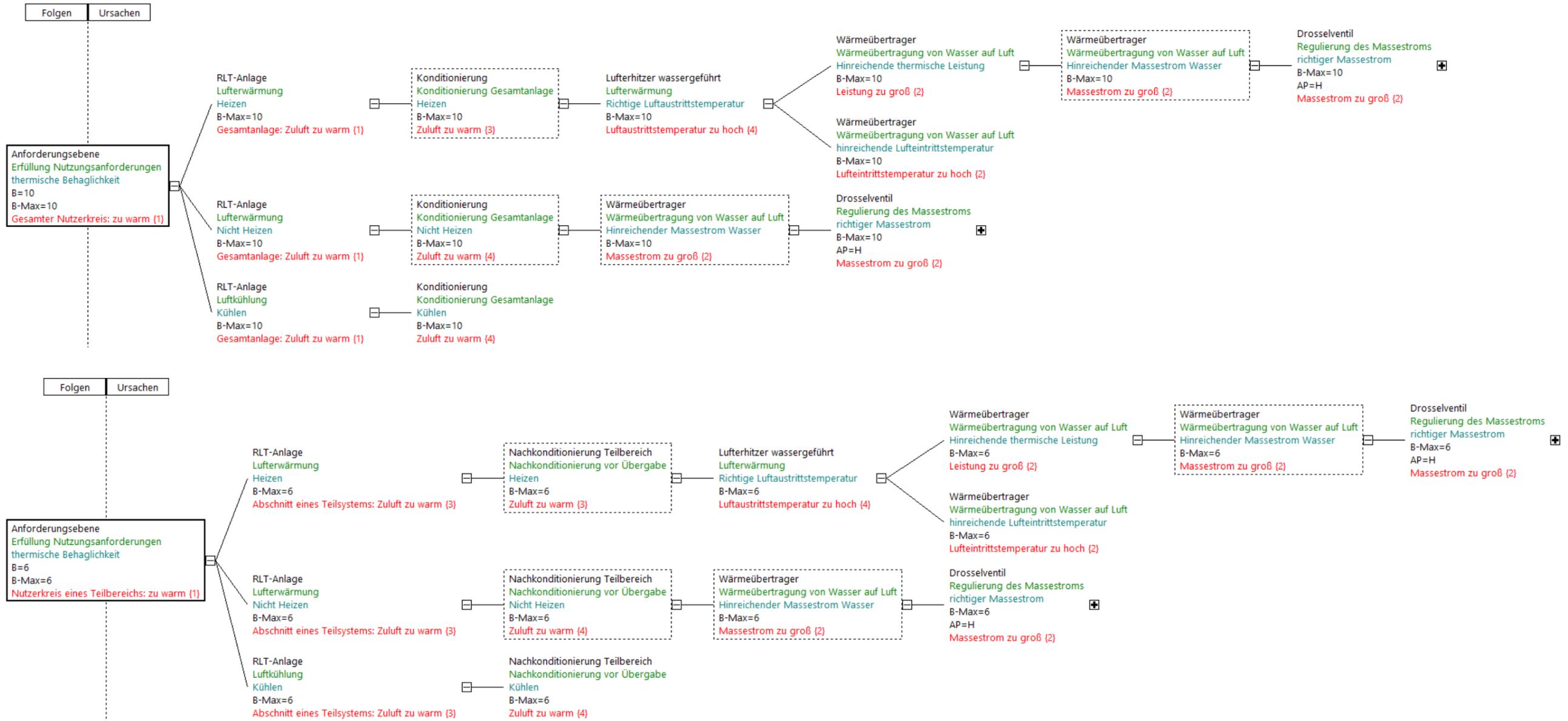
Ineffizienz Teilsystem



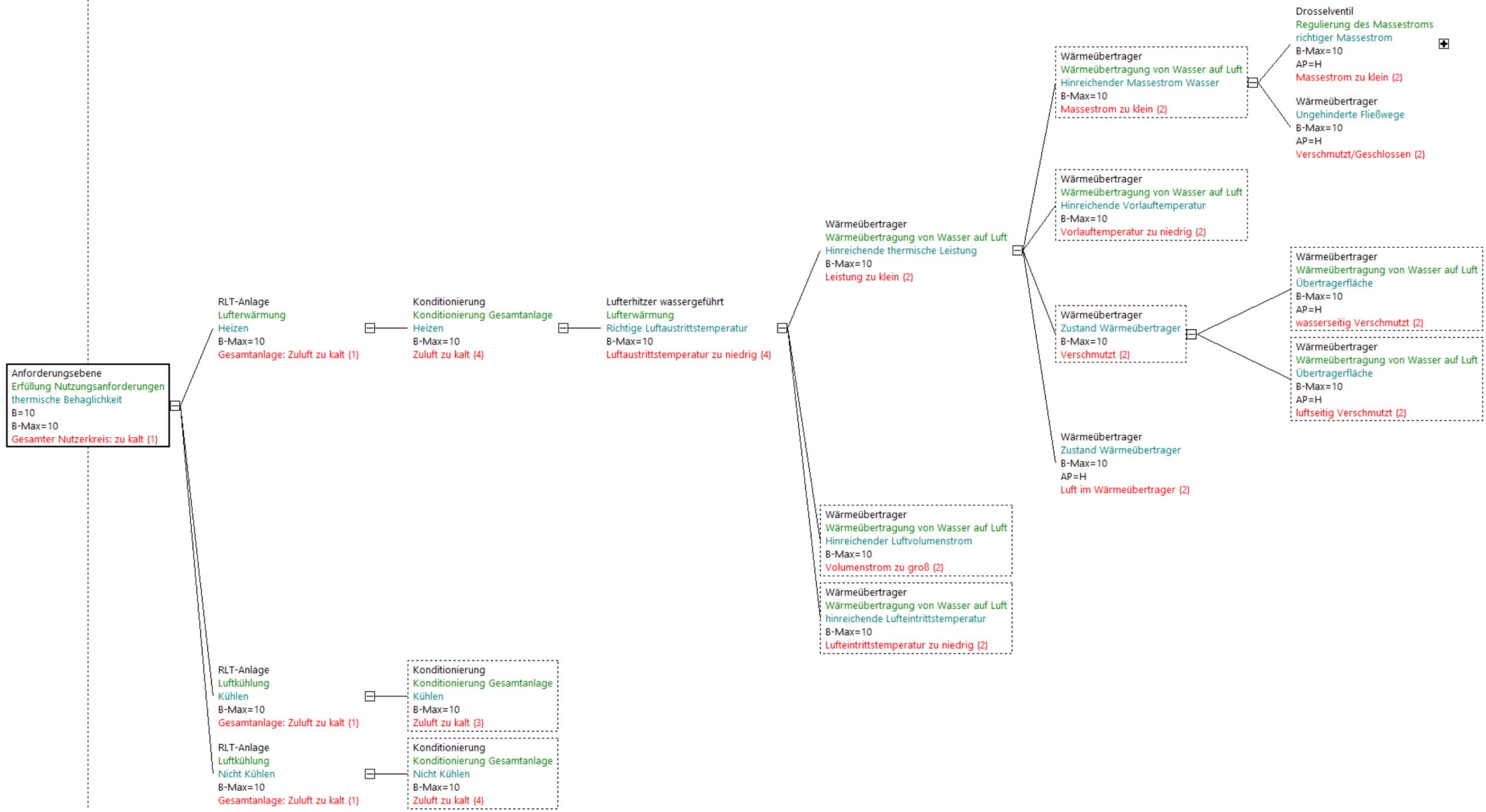
Ineffizienz Teilbereich

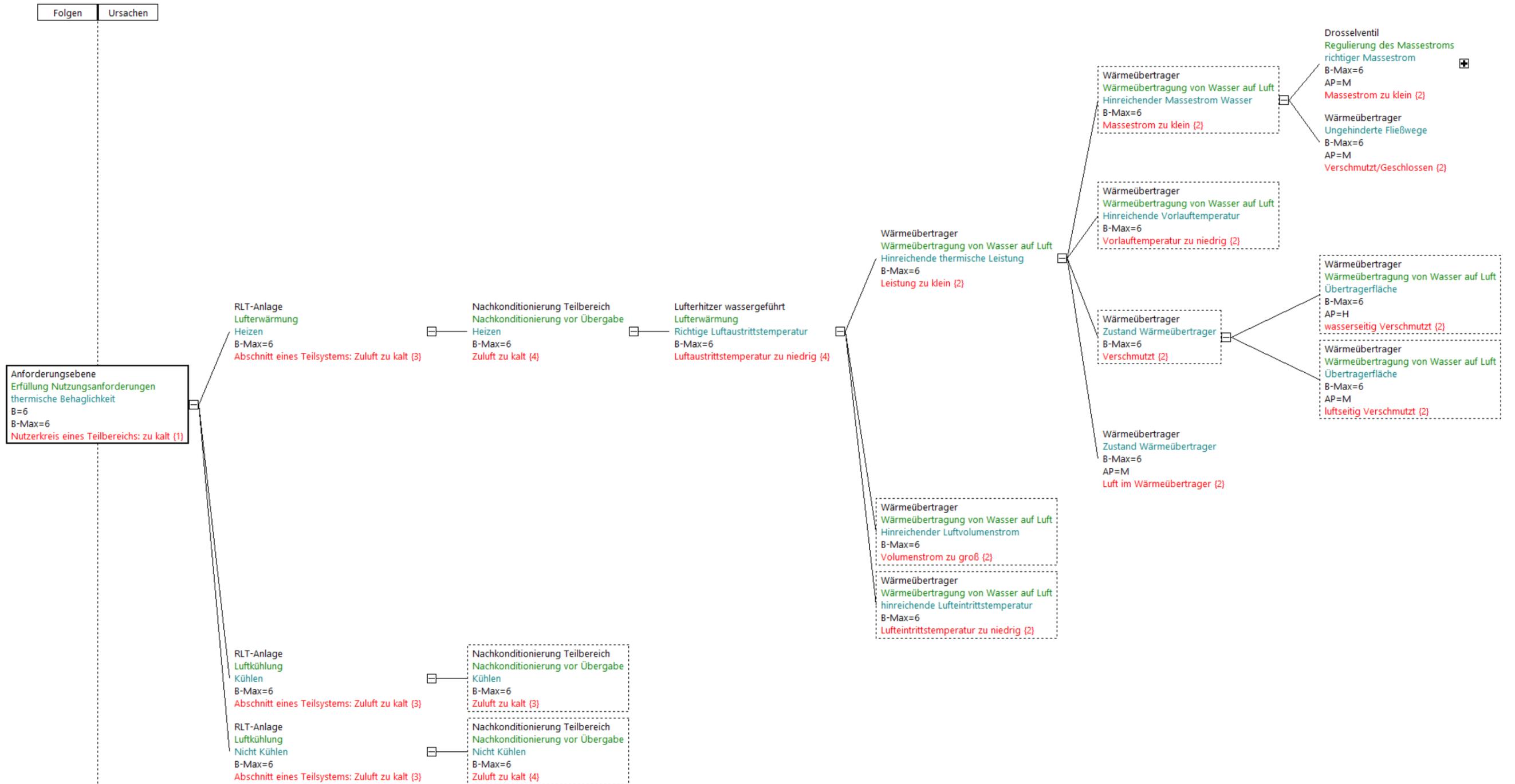


A6-2: Fehlernetze der RLT-Versuchsanlage



Folgen Ursachen

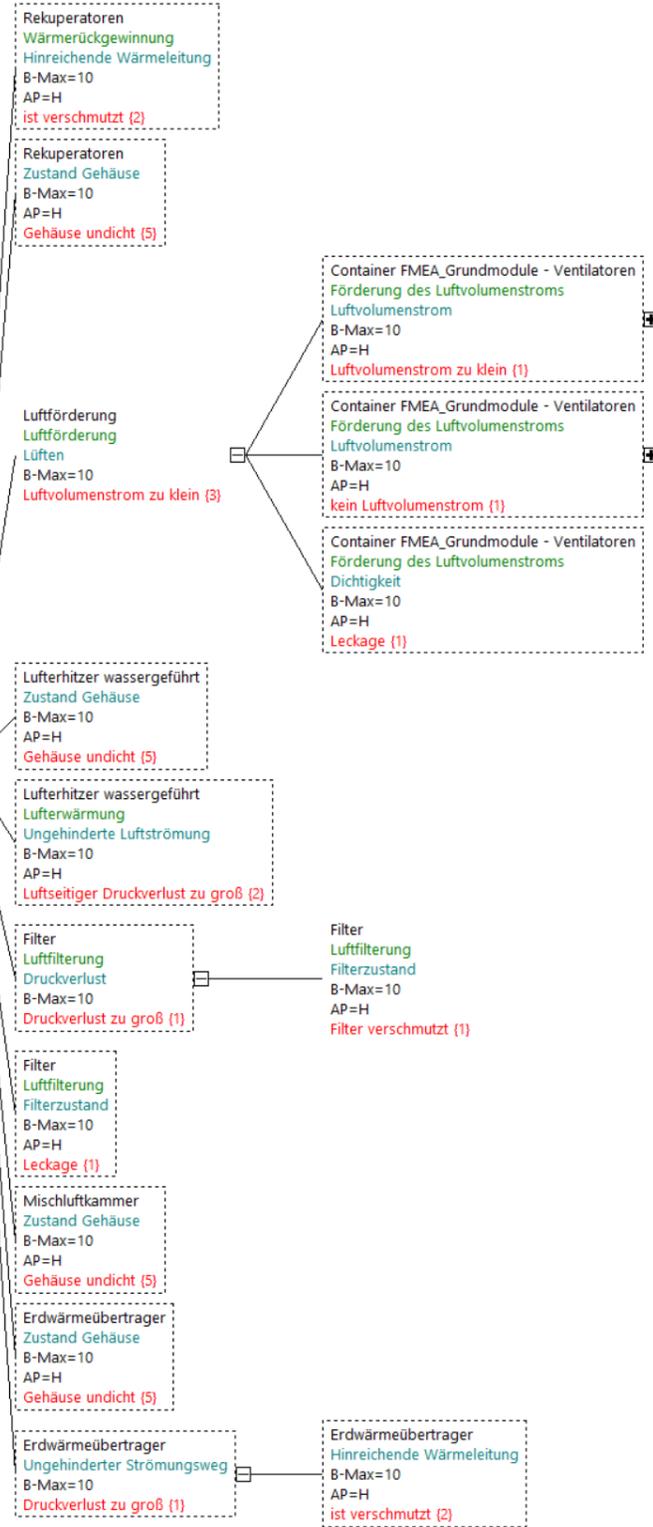


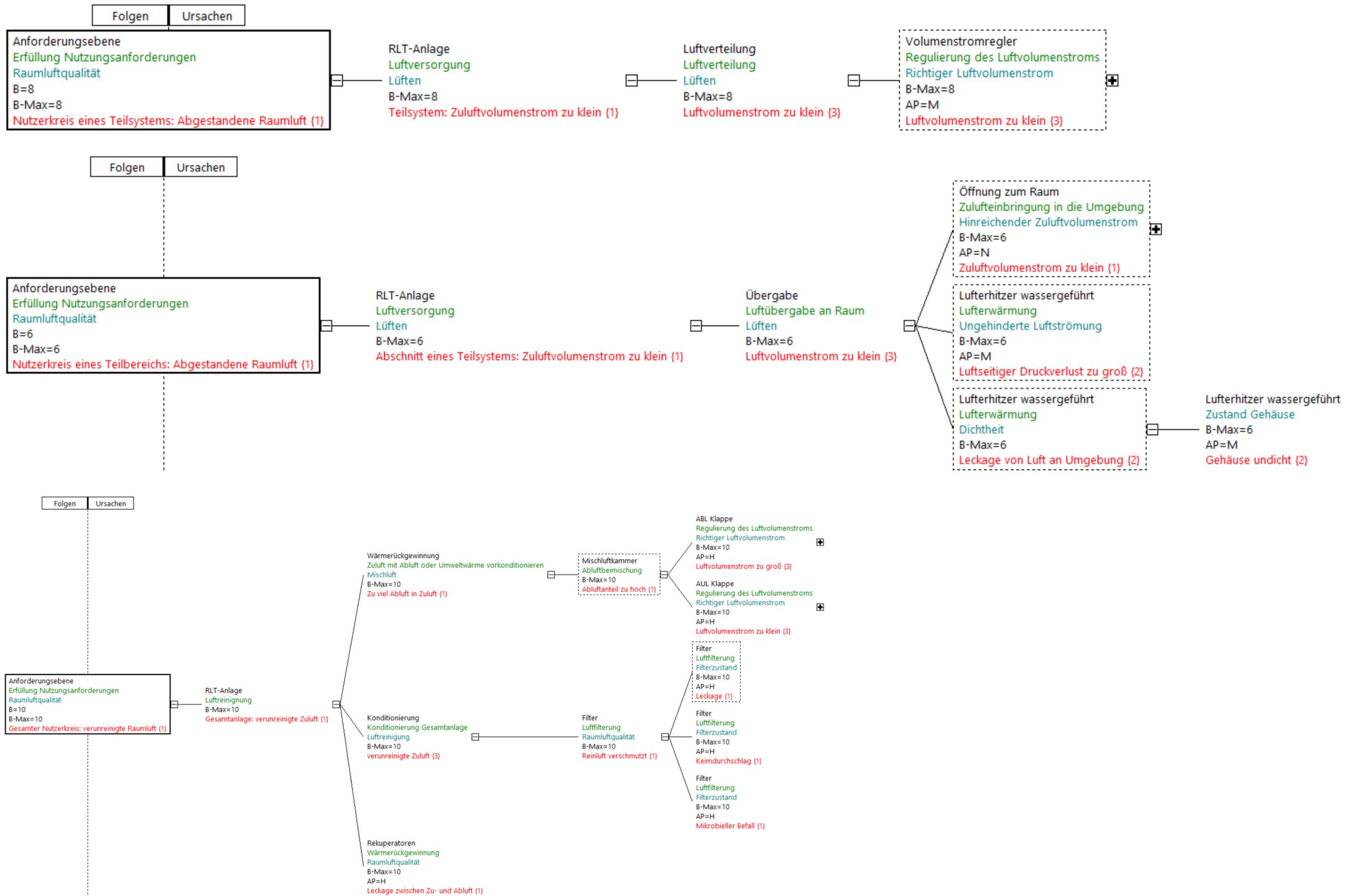


Folgen Ursachen

Anforderungsebene
 Erfüllung Nutzungsanforderungen
 Raumluftqualität
 B=10
 B-Max=10
 Gesamter Nutzerkreis: Abgestandene Raumluft (1)

RLT-Anlage
 Luftversorgung
 Lüften
 B-Max=10
 Gesamtanlage: Zuluftvolumenstrom zu klein (1)

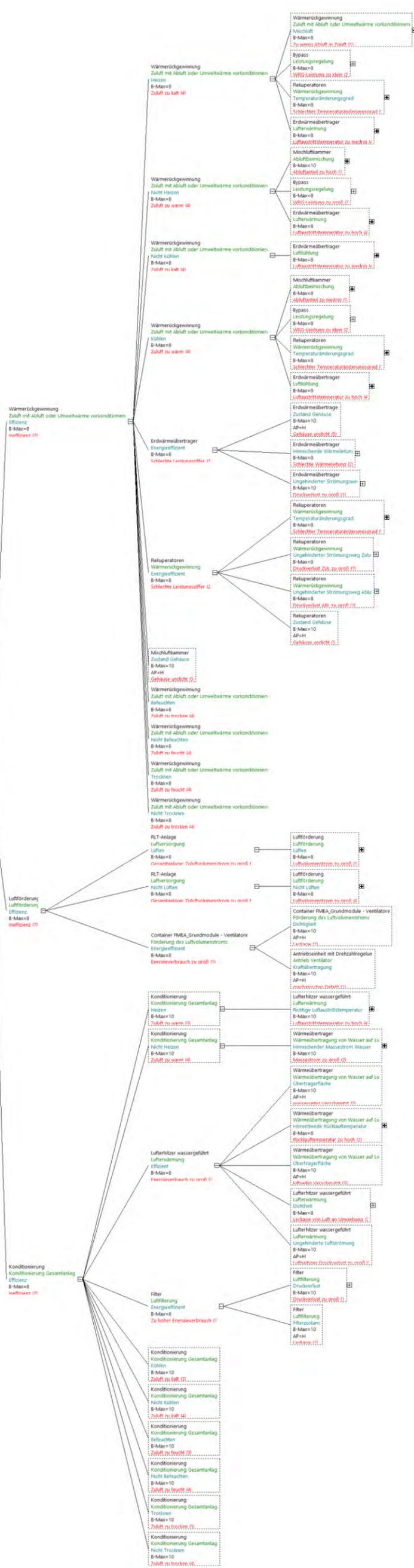


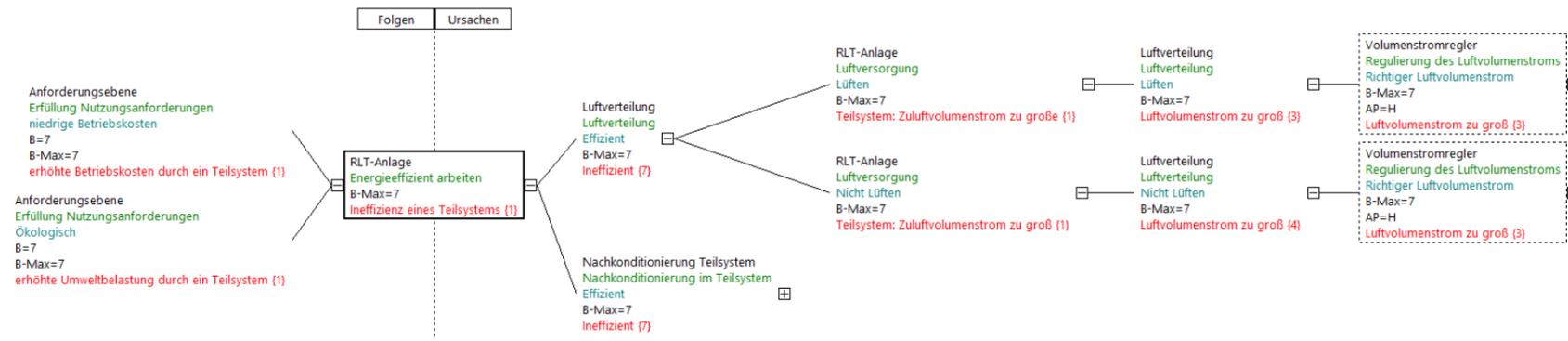


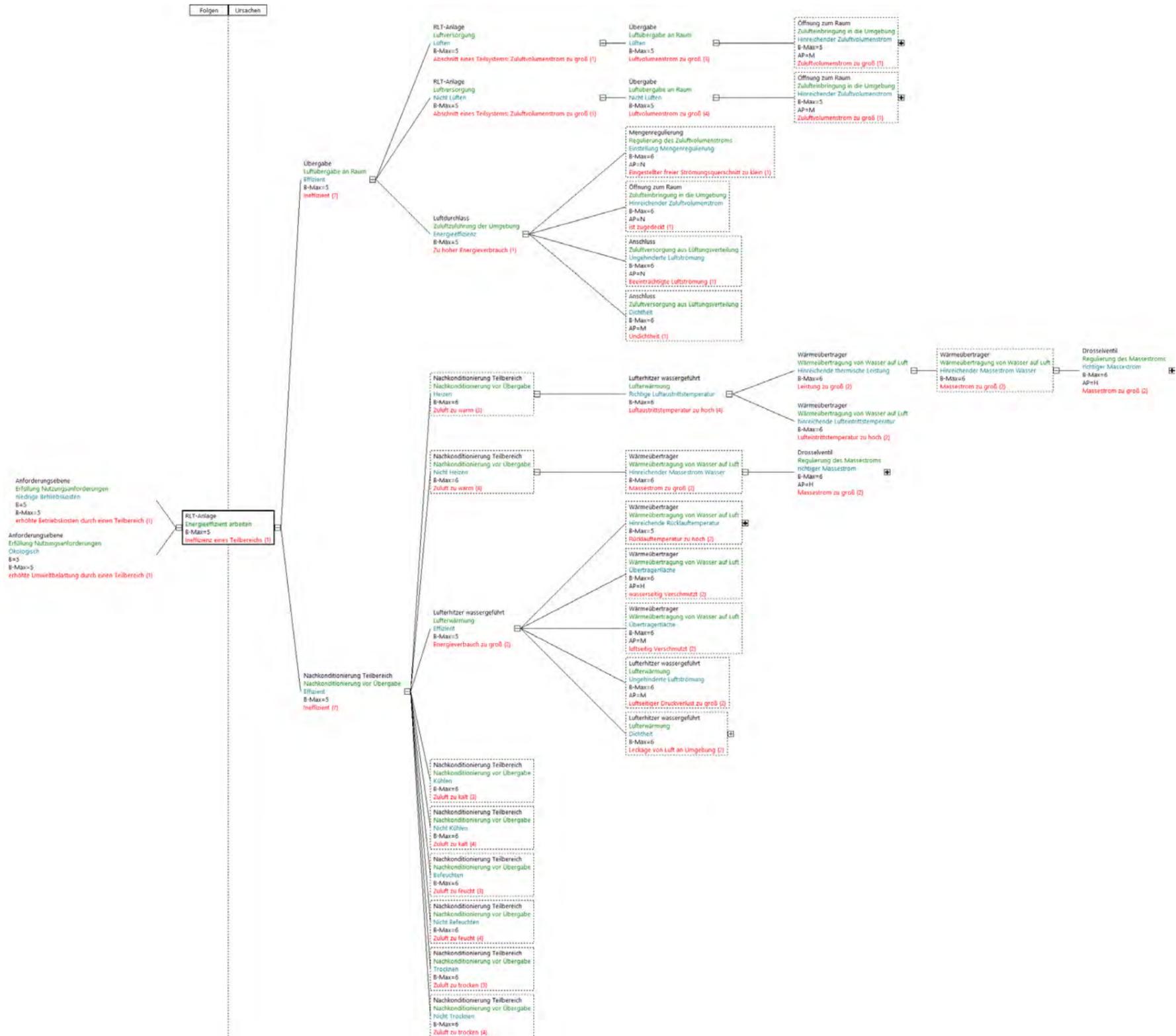
Anforderungsebene
Erfüllung Nutzungsanforderungen
niedrige Betriebskosten
B=8
B-Max=8
erhöhte Betriebskosten durch Gesamtanlage oder mehrere Teilsysteme (I)

Anforderungsebene
Erfüllung Nutzungsanforderungen
ökologisch
B=8
B-Max=8
erhöhte Umweltbelastung durch Gesamtanlage oder mehrere Teilsysteme (I)

RT-Anlage
Energieeffizient arbeiten
B-Max=8
Ineffizienz der Gesamtanlage oder mehrerer Teilsysteme (I)







A6-3: Fehlerbewertung mit Aufgabenpriorität

Fehlerbewertung Luftverteilung: Ventilator

Fehlerfolge	B	Ursache	H	E	AP	Bemerkung
Gesamter Nutzerkreis: Abgestandene Raumluft	10	Ventilator: Luftvolumenstrom zu klein	7	2	H	
		Ventilator: Luftleckage	7	2	H	eine große Leckage die den Fehler verursachen kann sollte schnell bemerkbar sein
Ineffizienz Gesamtanlage	8	Ventilator: Luftvolumenstrom zu groß	7	7	H	
		Ventilator: mechanischer Defekt	7	7	H	
		Ventilator: Luftleckage	7	7	H	

Fehlerbewertung zentrale Konditionierung: Lufterhitzer

Fehlerfolge	B	Ursache	H	E	AP	Bemerkung
Gesamter Nutzerkreis: zu warm	10	Drosselventil: Massestrom zu groß	5	7	H	Es handelt sich um einen Funktionseinschränkenden Fehler, aber der Nutzer kann durch geöffnete Fenster meist leicht gegensteuern und beschwert sich weniger. Daher ist E mit 7 bewertet.
Gesamter Nutzerkreis: zu kalt	10	Drosselventil: Massestrom zu klein	5	2	H	Fehlerursachen können ggf. durch hydraulische Schaltung ausgeglichen werden, indem Vorlauftemperatur in Abhängigkeit zur ZUL-Temperatur angehoben wird. Im Extremfall entsteht jedoch der Fehler zu kalt.
		Erhitzer: Fließweg verschmutzt/geschlossen	5	2	H	
		Erhitzer: wasserseitig verschmutzt	5	7	H	
		Erhitzer: luftseitig verschmutzt	5	4	H	
		Erhitzer: nicht entlüftet	5	7	H	
Ineffizienz Gesamtanlage	8	Drosselventil: Massestrom zu groß	5	7	H	

Fehlerfolge	B	Ursache	H	E	AP	Bemerkung
		Erhitzer: wasserseitig verschmutzt	5	7	H	Einfluss ist wahrscheinlich gering.
		Erhitzer: luftseitig verschmutzt	5	4	H	Entdeckung bei Wartung.
		Erhitzer: Gehäuse undicht - Luftleckage	5	7	H	
Gesamter Nutzerkreis: Abgestandene Raumluft	10	Erhitzer: Gehäuse undicht - Luftleckage	5	2	H	Bei Regelung Volumenstrom konstant oder Leistungsgrenze bei flacher werdenden Systemkennlinien bei Druckregelungen.
		Erhitzer: luftseitig verschmutzt	5	4	H	Entdeckung bei Wartung

Fehlerbewertung zentrale Konditionierung: Luftfilter

Fehlerfolge	B	Ursache	H	E	AP	Bemerkung
Gesamter Nutzerkreis: verunreinigte Raumluft	10	Filter: Verschmutzt/Keimdurchschlag/mikrobieller Befall	5	4	H	Entdeckung bei Wartung
		Filter: Leckage	5	4	H	
Ineffizienz Gesamtanlage	8	Filter: Leckage	5	4	H	
		Filter: Verschmutzt	5	4	H	

Fehlerbewertung Wärmerückgewinnung: Erdwärmeübertrager

Fehlerfolge	B	Ursache	H	E	AP	Bemerkung
Ineffizienz Gesamtanlage	8	Bypass: zu weit geöffnet	8	7	H	mögliches Potential wird nicht ausgeschöpft
		Bypass: zu weit geschlossen	8	7	H	Luft wird zu stark vorkonditioniert. Andere Komponenten müssen ggf. Behaglichkeitsfehler vermeiden
		Wärmeübertrager: verschmutzt	5	7	H	
		Wärmeübertrager: Luftleckage an Umgebung	3	7	M	
Gesamter Nutzerkreis: Abgestandene Raumluft	10	Wärmeübertrager: Luftleckage an Umgebung	3	2	M	Je nach Lage und Reglungart möglich. In Versuchsanlage auszuschließen da EWT auf Saugseite des ZUL-Ventilators.

Fehlerfolge	B	Ursache	H	E	AP	Bemerkung
		Wärmeübertrager: verschmutzt	5	2	H	Steilere Systemkennlinie. Verminderter Luftvolumenstrom bei druckgeregelten Ventilatoren.

Fehlerbewertung Wärmerückgewinnung: Mischluftkammer

Fehlerfolge	B	Ursache	H	E	AP	Bemerkung
Ineffizienz Gesamtanlage	8	ABL-Klappe: Volumenstrom zu klein	5	7	H	mögliches Potential wird nicht ausgeschöpft
		ABL-Klappe: Volumenstrom zu groß	5	7	H	Luft wird zu stark vorkonditioniert. Andere Komponenten müssen ggf. Behaglichkeitsfehler vermeiden. Gesamter Nutzerkreis mit beeinträchtigter Raumluftqualität möglich.
		ZUL-Klappe: Volumenstrom zu groß	5	7	H	mögliches Potential wird nicht ausgeschöpft
		ZUL-Klappe: Volumenstrom zu klein	5	7	H	Luft wird zu stark vorkonditioniert. Andere Komponenten müssen ggf. Behaglichkeitsfehler vermeiden. Gesamter Nutzerkreis mit beeinträchtigter Raumluftqualität möglich.
		Mischluftkammer: Luftleckage an Umgebung	5	7	H	
Gesamter Nutzerkreis: verunreinigte Raumluft	10	ABL-Klappe: Volumenstrom zu groß	5	2	H	
		ZUL-Klappe: Volumenstrom zu klein	5	2	H	
Gesamter Nutzerkreis: Abgestandene Raumluft	10	Mischluftkammer: Luftleckage an Umgebung	5	2	H	Je nach Lage und Reglungsart möglich

Fehlerbewertung Wärmerückgewinnung: Kreuzstrom-WRG

Fehlerfolge	B	Ursache	H	E	AP	Bemerkung
Ineffizienz Gesamtanlage	8	Bypass: zu weit geöffnet	8	7	H	mögliches Potential wird nicht ausgeschöpft

Fehlerfolge	B	Ursache	H	E	AP	Bemerkung
		Bypass: zu weit geschlossen	8	7	H	Luft wird zu stark vorkonditioniert. Andere Komponenten müssen Behaglichkeitsfehler vermeiden
		Wärmeübertrager: verschmutzt	8	4	H	sollte bei Wartung auffallen
		Wärmeübertrager: vereist	8	7	H	Abtauung funktioniert nicht
		Wärmeübertrager: Luftleckage an Umgebung	5	7	H	
Gesamter Nutzerkreis: verunreinigte Raumluft	10	Leckage zwischen Zu- und Abluft	5	2	H	
Gesamter Nutzerkreis: Abgestandene Raumluft	10	Wärmeübertrager: Luftleckage an Umgebung	5	2	M	Je nach Lage und Reglungsart möglich. In Versuchsanlage auszuschließen da EWT auf Saugseite des Ventilators.
		Wärmeübertrager: verschmutzt	5	2	H	Steilere Systemkennlinie. Verminderter Luftvolumenstrom bei druckgeregelten Ventilatoren.

Fehlerbewertung Luftverteilung: Volumenstromregler

Fehlerfolge	B	Ursache	H	E	AP	Bemerkung
Nutzerkreis eines Teilsystems: abgestandene Raumluft	8	Volumenstromregler: Luftvolumenstrom zu klein	5	3	M	Fehlerursachen, die dazu führen, dass ein größerer Nutzerkreis nicht mit ausreichend Luft versorgt wird, sollte schnell auffallen (E=3). Die Fehlerursachen haben daher nur eine mittlere Priorität.
Ineffizienz eines Teilsystems	7	Volumenstromregler: Luftvolumenstrom zu groß	5	8	H	Die Fehlerfolge und die Fehlerursachen sind für den Nutzer schwierig zu erkennen, da es bei Funktionsfähigen Übergabesystemen keinen Funktionsverlust gibt (E=8). Die Fehlerursachen sind daher mit einer hohen Priorität bewertet.

Fehlerbewertung Konditionierung Teilbereich: Nacherhitzer

Fehlerfolge	B	Ursache	H	E	AP	Bemerkung	
Nutzerkreis eines Teilbereichs: zu warm	6	Drosselventil: Massestrom zu groß	5	9	H	Es handelt sich um einen Funktionseinschränkenden Fehler, aber der Nutzer kann durch geöffnete Fenster meist leicht gegensteuern und beschwert sich weniger. Daher ist E mit 9 bewertet.	
Nutzerkreis eines Teilbereichs: zu kalt	6	Drosselventil: Massestrom zu klein	5	4	M	Fehlerursachen können ggf. durch hydraulische Schaltung ausgeglichen werden, indem Vorlauftemperatur in Abhängigkeit zur ZUL-Temperatur angehoben wird. Im Extremfall entsteht jedoch der Fehler zu kalt. Der Nutzkreis meldet eine Störung.	
		Erhitzer: Fließweg verschmutzt/ geschlossen	5	4	M		
		Erhitzer: wasserseitig verschmutzt	5	4	M		
		Erhitzer: luftseitig verschmutzt	5	4	M		
		Erhitzer: nicht entlüftet	5	4	M		
Ineffizienz eines Teilbereichs	5	Drosselventil: Massestrom zu groß	5	7	H		
		Erhitzer: wasserseitig verschmutzt	5	7	H		Einfluss ist wahrscheinlich gering.
		Erhitzer: luftseitig verschmutzt	5	4	M		Entdeckung bei Wartung.
		Erhitzer: Gehäuse undicht - Luftleckage	5	7	H		
Nutzerkreis eines Teilbereichs: Abgestandene Raumluft	6	Erhitzer: Gehäuse undicht - Luftleckage	5	4	M	Fehlerursachen kann je nach Regelstrategie zur Unterversorgung eines Bereichs führen.	
		Erhitzer: luftseitig verschmutzt	5	4	M		

Fehlerbewertung Luftübergabe: Luftdurchlass

Fehlerfolge	B	Ursache	H	E	AP	Bemerkung
Nutzerkreis eines Teilbereichs: abgestandene Raumluft	6	Luftdurchlass: Luftvolumenstrom zu klein	4	4	N	Fehlerursachen, die dazu führen, dass der Nutzerkreis nicht mit ausreichend Luft versorgt wird, sollte schnell auffallen (E=4). Die Fehlerursachen haben daher nur eine mittlere Priorität.
		Luftdurchlass: ist zugedeckt/Beeinträchtigte Luftströmung	4	4	N	
Ineffizienz eines Teilbereichs	5	Volumenstromregler: Luftvolumenstrom zu groß	4	9	M	Die Fehlerfolge und die Fehlerursachen sind für den Nutzer schwierig zu erkennen, da es bei Funktionsfähigen Übergabesystemen keinen Funktionsverlust gibt (E=9). Die Fehlerursachen sind daher mit einer mittleren Priorität bewertet.
		Luftdurchlass: ist zugedeckt/Beeinträchtigte Luftströmung	4	9	M	
		Luftdurchlass: Luftleckage	4	9	M	

A6-4: Möglichkeiten zur Fehlerdiagnose aus Recherche und nötige Sensorausstattung

FED-Recherche Luftverteilung: Ventilator

Ursache	AP	Beschreibung	Messwerte und Methode	Quelle	nötige GA-Effizienzklasse DIN EN 15232	nötiger Automationsgrad DIN EN 18599-11	In Versuchsanlage möglich?
Ventilator: Luftvolumenstrom zu klein	H	Förderleistung Ventilator sinkt durch Verschmutzung oder Defekt	Differenzdruck und Volumenstrom über Ventilator Messen und mit Referenzwert vergleichen	[Ebel et. al. (2003) S.172] [Görres et. al. (2007) S. 93] [Großklos et. al. (2008) S.86]	RLT Luftvolumenstromregelung: A mit zusätzlicher Volumenstrommessung	RLT Luftvolumenstromregelung: mind. B – drehzahlgeregelte Ventilatoren mit zusätzlicher Volumenstrommessung	nein: keine Volumenstrommessung
		Heizlast wird über Zuluft gedeckt. Am Luftherhitzer wird kein Wärmeverbrauch gemessen. Ursache: kein Luftvolumenstrom wurde gefördert	Wärmeverbrauch Luftherhitzer prüfen	[Fisch et. al. (2005) S. 57-58]	Informationen Energieverbrauch: C oder HZG Wärmeverteilung: A mit Rücklauftemperatur	HZG Wärmeverteilung: A mit Rücklauftemperatur	nein: keine Wärmemengenmessung
		Vergrößerungen des Öffnungsgrad von Volumenstromregler	Messen und vergleichen von Öffnungsgrad und Volumenstrom	[Hauser et. al. (2004) S.71-72]	RLT Luftvolumenstromregelung mit VSR: A zusätzliche	RLT Luftvolumenstromregelung mit VSR: B zusätzliche	nein: keine Volumenstrommessung

Ursache	AP	Beschreibung	Messwerte und Methode	Quelle	nötige GA-Effizienzklasse DIN EN 15232	nötiger Automationsgrad DIN EN 18599-11	In Versuchsanlage möglich?
		rn erhöhen den Luftvolumenstrom nicht. Ursache: bringt nicht die nötige Leistung			Ermittlung Volumenstrom über VSR	Ermittlung Volumenstrom über VSR	
Ventilator: Luftleckage	H	Ventilator nimmt durch geöffnete Wartungstür an Zentralgerät zu hohe Leistung auf	Stromverbrauch Ventilator erfassen und mit Referenzwert vergleichen	[AMEV (2008) Anhang Kap. 6.2 S.81]	Informationen Energieverbrauch: C		nein: keine Messung el. Energie an Ventilatoren
Ventilator: Luftvolumenstrom zu groß	H	Ventilator fördert nicht bedarfsgerecht	Einschaltdauer, Betriebsrückmeldung, el. Leistungsaufnahme oder Luftvolumenstrom des Ventilators mit Anwesenheit, Daten aus Vorjahren, Betriebs- oder Nutzungszeiten vergleichen und prüfen	[Wagner et. al. (2006) S.79] [Kleber et. al. (2009)]	RLT Luftvolumenstromregelung: C – Zeitabhängig	RLT Luftvolumenstromregelung: C – Zeitabhängig	ja: Betriebsmeldung und Differenzdruck Ventilator vorhanden

Ursache	AP	Beschreibung	Messwerte und Methode	Quelle	nötige GA-Effizienzklasse DIN EN 15232	nötiger Automationsgrad DIN EN 18599-11	In Versuchsanlage möglich?
		Ventilator nimmt durch Veränderung des Luftleitungsnetzes zu hohe Leistung auf, da versucht wird Drucksollwert zu halten Ursachen: Wartungstüren geöffnet, Fehlende Filter, Leckagen und	Stromverbrauch Ventilator erfassen und mit Referenzwert vergleichen	[AMEV (2008) Anhang Kap. 6.2 S.81]	Informationen Energieverbrauch: C		nein: keine Messung el. Energie an Ventilatoren
		Vordruck an Volumenstromreglern war unnötig hoch. Drehzahl wurde gesenkt bis nötiger Minimalvordruck an schlechtesten Messstelle erreicht	Benötigter Vordruck an Komponente Messen und mit Referenz/Minimalwert vergleichen	[Röther et. al. (2015) S. 35]	RLT Luftvolumenstromregelung: A mit drehzahlgeregelten Ventilatoren und VSR mit Schlechtpunktmessung	RLT Luftvolumenstromregelung: B mit drehzahlgeregelten Ventilatoren und VSR mit Schlechtpunktmessung	bedingt: keine separate Druckmessung an jeder ZUL-Klappe
Ventilator: mechanischer Defekt	H	Verschlechterung des Ventilatorwirkungsgrades und	Keine Methode in Fehlerrecherche	keine			

Ursache	AP	Beschreibung	Messwerte und Methode	Quelle	nötige GA-Effizienzklasse DIN EN 15232	nötiger Automationsgrad DIN EN 18599-11	In Versuchsanlage möglich?
		verringertes Luftvolumenstrom möglich					

FED-Recherche zentrale Konditionierung: Luftherhitzer

Fehler	AP	Beschreibung	Messwerte und Methode	Quelle	nötige GA-Effizienzklasse DIN EN 15232	nötiger Automationsgrad DIN EN 18599-11	In Versuchsanlage möglich?
Drosselventil: Massestrom zu groß	H	Sollte ähnlich zu „Drosselventil: Massestrom zu klein“, bzw. nicht intermittierender Komponenten	Keine Methode in Fehlerrecherche	keine			nein: keine Wärmemengen- oder Volumenstrommessung
Drosselventil: Massestrom zu klein	H	Ventil ist auf Grund eines Fehlers geschlossen	Vergleich Soll- und Ist-Volumenstrom, WMZ	[Hyvfirinen et. al. (1996) Kap. 3.1.2]	Informationen Energieverbrauch: C oder HZG Wärmeverteilung: A mit Rücklauftemperatur	HZG Wärmeverteilung: A mit Rücklauftemperatur	nein: keine Wärmemengen- oder Volumenstrommessung
Erhitzer: Fließweg verschmutzt/geschlossen	H	Sollte ähnlich zu „Drosselventil: Massestrom zu klein“	Keine Methode in Fehlerrecherche	keine			nein: keine Wärmemengen- oder Volumenstrommessung
Erhitzer: wasserseitig verschmutzt	H		Messung Übertragerleistung und Strömungswiderstand und mit Referenzwerten vergleichen	[Deeskow et. al. (2010) S.25]	Informationen Energieverbrauch: C mit zusätzlicher Differenzdruckmessung oder HZG	HZG Wärmeverteilung: A mit Rücklauftemperatur	nein: keine Wärmemengen-, Volumenstrom- oder Druckverlustmessung

Fehler	AP	Beschreibung	Messwerte und Methode	Quelle	nötige GA-Effizienzklasse DIN EN 15232	nötiger Automationsgrad DIN EN 18599-11	In Versuchsanlage möglich?
					Wärmeverteilung: A mit Rücklauf Temperatur		
		Regelung versucht schlechten Wärmeübergang durch höhere VL-Temperatur oder Massestrom auszugleichen → RL-Temperatur steigt an	Massestrom und RL-Temperatur messen und mit Referenzwert vergleichen	[Hyvfirinen et. al. (1996) Kap. 3.1.2]	HZG Wärmeverteilung: A mit Rücklauf Temperatur	HZG Wärmeverteilung: A mit Rücklauf Temperatur	bedingt: nur Messung RL-Temperatur
Erhitzer: luftseitig verschmutzt	H	Siehe wasserseitige Verschmutzung	Messung Übertragerleistung und Strömungswiderstand und mit Referenzwerten vergleichen	[Deeskow et. al. (2010) S.25]	Informationen Energieverbrauch: C mit zusätzlicher Differenzdruckmessung oder HZG Wärmeverteilung: A mit Rücklauf Temperatur	HZG Wärmeverteilung: A mit Rücklauf Temperatur	nein: keine Wärmemengen-, Volumenstrom- oder Druckverlustmessung
			Massestrom und RL-Temperatur messen	[Hyvfirinen et. al.]	Informationen Energieverbrauch: C oder	HZG Wärmeverteilung: A	nein: nur Messung einer gemeinsamen RL-

Fehler	AP	Beschreibung	Messwerte und Methode	Quelle	nötige GA-Effizienzklasse DIN EN 15232	nötiger Automationsgrad DIN EN 18599-11	In Versuchsanlage möglich?
			und mit Referenzwert vergleichen	(1996) Kap. 3.1.2]	HZG Wärmeverteilung: A mit Rücklauftemperatur	mit Rücklauftemperatur	Temperatur, keine Volumen-/Massestrommessung vorhanden
Erhitzer: nicht entlüftet	H	Sollte ähnlich zu „Verschmutzt“ sein	Keine Methode in Fehlerrecherche	keine			nein: keine Wärmemengen-, Volumenstrom- oder Druckverlustmessung
Erhitzer: Gehäuse undicht - Luftleckage	H	Sollte mit „Ventilator: Luftleckage“ möglich sein, jedoch keine Eingrenzung auf Lufterhitzer möglich	Keine Methode in Fehlerrecherche	keine			nein: keine Messung el. Energie an Ventilatoren
Zuluft zu warm (allgemein)			Messwert/Fühler (Vergleich Soll- und Ist-ZUL-Temperatur)	[Grob et. al. (2002) Anhang A S. 185-187]	RLT Regelung der Temperatur der Raumluft: D oder RLT Regelung der Zulufttemperatur: C	RLT Wärmeübergabe: C (bei Zulufttemperaturregelung)	ja
Zuluft zu kalt (allgemein)			Messwert/Fühler (Vergleich Soll- und Ist-ZUL-Temperatur)	[Grob et. al. (2002)	RLT Regelung der Temperatur der Raumluft: D	RLT Wärmeübergabe: C (bei	ja

Fehler	AP	Beschreibung	Messwerte und Methode	Quelle	nötige GA-Effizienzklasse DIN EN 15232	nötiger Automationsgrad DIN EN 18599-11	In Versuchsanlage möglich?
				Anhang A S. 185-187]	oder RLT Regelung der Zulufttemperatur: C	Zulufttemperaturregelung)	
		Zeigt das Stellsignal des LE-Ventils eine Öffnung an und unterschreitet die ZUL-Temperatur den Sollwert	Stellsignal LE-Ventil, Soll- und Ist-ZUL-Temperatur	[House et.al. (2001) Regel 3]	RLT Regelung der Temperatur der Raumluft: D oder RLT Regelung der Zulufttemperatur: C	RLT Wärmeübergabe: C (bei Zulufttemperaturregelung)	ja
Zuluft zu warm (nicht intermittierend)		Der Lufterhitzer erwärmt die ZUL obwohl er ausgeschaltet sein sollte	Vergleich Lufteintritts- und Luftaustrittstemperatur des LE in Abhängigkeit zum nötigen Betriebszustand	[Gropp et. al. (2003) S. 144]		RLT Luftheizung: A 2 + Monitoring	ja
			Vergleich Wärmeverbrauch mit Betriebszustand	[Feist et. al. (2003) S.111] [Stockinger et. al. (2010) S.82]	Informationen Energieverbrauch: C oder HZG Wärmeverteilung: A mit Rücklauftemperatur	HZG Wärmeverteilung: A mit Rücklauftemperatur	nein: keine Wärmemengenummessung am LE

FED-Recherche zentrale Konditionierung: Luftfilter

Ursache	A P	Beschreibung	Messwerte und Methode	Quelle	nötige Effizienzklasse EN 15232	GA-DIN	nötiger Automationsgrad DIN EN 18599-11	In Versuchsanlage möglich?
Filter: Verschmutzt/Keimdurchschlag/mikrobieller Befall	H	Schimmelpilzanzahl leicht erhöht – Ursache jedoch nicht genau eingegrenzt	Messung Keime in Luft, Kulturen Anlegen und mit Grenzwerten vergleichen	[Niekamp et. al. (2017) S. 35-36 und Anhang 4]				nein: ungeeignet
		Entdeckung bei Wartung						nein: wird bei Wartung erkannt
Filter: Leckage	H	Sollte mit „Ventilator: Luftleckage“ möglich sein, jedoch keine Eingrenzung auf Luftfilter möglich	Keine Methode in Fehlerrecherche	keine				nein: keine Messung el. Energie an Ventilatoren
Filter: Verschmutzt	H	Bewirkt höheren Druckverlust und verringert Volumenstrom	Druckverlust messen und mit Referenzwert vergleichen	[Ebel et. al. (2003) S. 64-65 und Abb 4.2.7-3]				bedingt ja: es gibt Druckwächter

FED-Recherche Wärmerückgewinnung: Erdwärmeübertrager

Ursache	AP	Beschreibung	Messwerte und Methode	Quelle	nötige GA-Effizienzklasse DIN EN 15232	nötiger Automationsgrad DIN EN 18599-11	In Versuchsanlage möglich?
Bypass: zu weit geöffnet	H	Leistungsregelung per Bypass (ZUL-Strom in Teillastfall aus Volumenstrom Bypass und EWÜ gemischt). Sich ergebende Temperatur am Eintritt der nächsten Komponente ermitteln. Sollte EWÜ in Vollast muss Temperatur aus EWÜ der Lufteintrittstemperatur an nachfolgender Komponente entsprechen	Vergleich Temperatúraustritt WÜ, Außentemperatur und Temperatureintritt in nächste Komponente	[Gropp et. al. (2003) S. 139] [Kerschberger et. al. (2002) S. 170]	EWÜ nicht in Norm aber in etwa wie RLT Regelung der Wärmerückgewinnung: A mit zusätzlicher Eintrittstemperatur der nächsten Komponente	RLT Wärmeübertrager: B mit zusätzlicher Eintrittstemperatur der nächsten Komponente	nein: Austrittstemperatur aus EWT wird erst nach Zusammenführung mit Luft aus Bypass gemessen
Bypass: zu weit geschlossen	H	In bespielen wird Luft vorerwärmt obwohl Gebäude im Kühlbetrieb; andere Komponenten müssen Fehler ausgleichen – Bypass	Außentemperatur und Lufttemperatur nach EWÜ miteinander vergleichen und mit erforderten Betriebszustand abgleichen	[Wille et. al. (2004) S. 37-39] [Gropp et. al. (2003) S. 138]	EWÜ nicht in Norm aber in etwa wie RLT Regelung der Wärmerückgewinnung: A	RLT Wärmeübertrager: B	nein: Bypass-Klappe momentan nur händisch bedienbar

Ursache	AP	Beschreibung	Messwerte und Methode	Quelle	nötige GA-Effizienzklasse DIN EN 15232	nötiger Automationsgrad DIN EN 18599-11	In Versuchsanlage möglich?
		arbeitet nicht intermittierend		[Pafferott et. al. (2002) S. 18]			
Wärmeübertrager: verschmutzt	H	Vorgehen wie bei Luftherhitzer	Messung Übertragerleistung und Strömungswiderstand und mit Referenzwerten vergleichen	[Deesko w et. al. (2010) S.25]	EWÜ nicht in Norm aber in etwa wie RLT Regelung der Wärmerückgewinnung: A mit Messung Druckdifferenz über EWT, Feuchte und Volumenstrom	RLT Wärmeübertrager: B mit Messung Druckdifferenz über EWT, Feuchte und Volumenstrom	nein: keine Wärmemengen-, Volumenstrom- oder Druckverlustmessung
Wärmeübertrager: Luftleckage an Umgebung	M	Sollte mit „Ventilator: Luftleckage“ möglich sein, jedoch keine Eingrenzung auf EWÜ möglich	Keine Methode in Fehlerrecherche	keine			nein

FED-Recherche Wärmerückgewinnung: Mischluftkammer

Ursache	AP	Beschreibung	Messwerte und Methode	Quelle	nötige GA-Effizienzklasse DIN EN 15232	nötiger Automationsgrad DIN EN 18599-11	In Versuchsanlage möglich?
ABL-Klappe: Volumenstrom zu klein	H	Sollte Ähnlich zu „Bypass zu weit geöffnet“ des EWÜ möglich sein	Messung Ablufttemperatur, Außentemperatur und Eintrittstemperatur in nächste Komponente. Gemessene Eintrittstemperatur mit berechneter Eintrittstemperatur (aus Außen- und ABL-Temperatur und Mischungsverhältnis) vergleichen.	keine	RLT Regelung der Außenluftströmung: A	RLT Luftverteilung: A mit Optimierung auf niedrige Betriebskosten	ja
		ABL-Klappe zu weit geschlossen und ZUL-Klappe zu weit geöffnet im Betriebszustand „Aufheizen ohne Belegung“	Messwert für Raumluftqualität oder Nutzungszeiten mit Klappenstellungen abgleichen	[Bollin et. al. (2008) S.67]	RLT Regelung der Außenluftströmung: A	RLT Luftverteilung: A mit Optimierung auf niedrige Betriebskosten	nein: Klappenstellung wird nicht gemessen
ABL-Klappe: Volumenstrom zu groß	H	Sollte Ähnlich zu „Bypass: zu weit geschlossen“ des EWÜ sein	Außentemperatur und Lufttemperatur nach Mischluftkammer miteinander vergleichen und in	keine	RLT Regelung der Außenluftströmung: A	RLT Luftverteilung: A mit Optimierung	ja

Ursache	AP	Beschreibung	Messwerte und Methode	Quelle	nötige GA-Effizienzklasse DIN EN 15232	nötiger Automationsgrad DIN EN 18599-11	In Versuchsanlage möglich?
			Abhängigkeit von Soll-ZUL-Temperatur prüfen. Ggf. weitere Bedarfsabhängigkeiten in Betracht ziehen.			auf niedrige Betriebskosten	
		Ähnliches Vorgehen wie „ABL-Klappe: Volumenstrom zu klein“ sollte denkbar sein.	Messwert für Raumluftqualität oder Nutzungszeiten mit Klappenstellungen abgleichen (z.B. ABL-Klappe komplett geschlossen, wenn freie Kühlung)	keine		RLT Luftverteilung: A mit Optimierung auf niedrige Betriebskosten	nein: Klappenstellung wird nicht gemessen
AUL-Klappe: Volumenstrom zu groß	H	Siehe „ABL-Klappe: Volumenstrom zu klein“			RLT Regelung der Außenluftströmung: A	RLT Luftverteilung: A mit Optimierung auf niedrige Betriebskosten	ja
AUL-Klappe: Volumenstrom zu klein	H	Siehe „ABL-Klappe: Volumenstrom zu groß“			RLT Regelung der Außenluftströmung: A	RLT Luftverteilung: A mit Optimierung auf niedrige Betriebskosten	ja

Ursache	AP	Beschreibung	Messwerte und Methode	Quelle	nötige GA-Effizienzklasse DIN EN 15232	nötiger Automationsgrad DIN EN 18599-11	In Versuchsanlage möglich?
Mischluftkammer: Luftleckage an Umgebung	H	Sollte mit „Ventilator: Luftleckage“ möglich sein, jedoch keine Eingrenzung auf Mischluftkammer möglich	Keine Methode in Fehlerrecherche	keine			nein
Außenluftanteil falsch		Es wird aus den Temperaturen der Luftvolumenströme an der MLK ein AUL-Anteil abgeschätzt und mit dem minimalen geforderten AUL-Anteil verglichen (z.B., wenn LE an)	Temperatur: AUL, ABL und zuluftseitiger Auslass der MLK Abfrage wann AUL-Anteil Minimal sein soll (über Differenz Außentemperatur zur Ablufttemperatur)	[House et.al. (2001) Regel 2 und 18]	RLT Regelung der Außenluftströmung: A	RLT Luftverteilung: A mit Optimierung auf niedrige Betriebskosten	ja
		Kühlung mit AUL-Anteil und das Stellsignal 100%, wenn Außentemperatur zu warm oder zu kalt (Regelungstechnischer Fehler)	Außentemperatur, Stellsignal, Soll-ZUL-Temperatur	[House et.al. (2001) Regel 5 und 8]	RLT Regelung der Außenluftströmung: A	RLT Luftverteilung: A mit Optimierung auf niedrige Betriebskosten	ja, jedoch werden regelungstechnische Fehler nicht betrachtet
		Fehler, wenn Stellsignal 100% und	Temperatur: AUL & zuluftseitiger Austritt	[House et.al.]	RLT Regelung der	RLT Luftverteilung:	ja

Ursache	AP	Beschreibung	Messwerte und Methode	Quelle	nötige GA-Effizienzklasse DIN EN 15232	nötiger Automationsgrad DIN EN 18599-11	In Versuchsanlage möglich?
		AUL-Temperatur nicht gleich zuluftseitiger Austrittstemperatur aus MLK	der MLK Stellsignal MLK	(2001) Regel 10]	Außenluftströmung: A	A mit Optimierung auf niedrige Betriebskosten	

FED-Recherche Wärmerückgewinnung: Kreuzstrom-WRG

Ursache	AP	Beschreibung	Messwerte und Methode	Quelle	nötige GA-Effizienzklasse DIN EN 15232	nötiger Automationsgrad DIN EN 18599-11	In Versuchsanlage möglich?
Bypass: zu weit geöffnet	H	Potenzial der WRG wird nicht voll ausgenutzt	ZUL- und ABL- sowie AUL- und FOL-Temperaturen liegen weit voneinander entfernt	[Feist et. al. (2003) S.120]	RLT Regelung der Wärmerückgewinnung: A	RLT Wärmeübertrager: B oder RLT Luftverteilung: A mit Optimierung auf niedrige Betriebskosten	bedingt ja: ABL-Temperatur wird vor ABL-Ventilator gemessen
		In einem Gebäude kam es immer wieder zu kurzzeitigen ausfällen der WRG. ZUL-seitige Austrittstemperatur ist der Außentemperatur sehr ähnlich	Vergleich Außentemperatur und ZUL-seitige Austrittstemperatur	[Voss & Engelmann (2008) S. 40]	RLT Regelung der Wärmerückgewinnung: A	RLT Wärmeübertrager: B oder RLT Luftverteilung: A mit Optimierung auf niedrige Betriebskosten	ja
		Änderungsgrad verschlechtert sich auf Grund eines zu kleinen ABL-	Temperaturänderungsgrad bestimmen (ZUL- und ABL- sowie AUL- und FOL-	[Lambert z et. al. (2006) S. 210]	RLT Regelung der Wärmerückgewinnung: A	RLT Wärmeübertrager: B oder	ja, wenn Referenztemperatur-

Ursache	AP	Beschreibung	Messwerte und Methode	Quelle	nötige GA-Effizienzklasse DIN EN 15232	nötiger Automationsgrad DIN EN 18599-11	In Versuchsanlage möglich?
		Volumenstroms. Bypass als Ursache denkbar, aber auch andere Komponenten	Temperaturen messen) und mit Herstellerangaben vergleichen			RLT Luftverteilung: A mit Optimierung auf niedrige Betriebskosten	änderungsgrad bestimmbar
Bypass: zu weit geschlossen	H	In bespielen wird Luft vorerwärmt obwohl Gebäude im Kühlbetrieb; andere Komponenten müssen Fehler ausgleichen – Bypass arbeitet nicht intermittierend	ZUL-seitige Austrittstemperatur mit ZUL-Solltemperatur vergleichen	[Wille et. al. (2004) S. 43]	RLT Regelung der Wärmerückgewinnung: A mit RLT Regelung der Zulufttemperatur : C	RLT Wärmeübertrager: B mit RLT Luftheizung: D oder RLT Luftverteilung: A mit Optimierung auf niedrige Betriebskosten	ja
			ABL- und AUL-Temperatur messen und Klappenstellung aus geforderter ZUL-Temperatur ableiten. Diese mit tatsächlicher	[Hausladen et. al. (2007) S. 41]	RLT Regelung der Wärmerückgewinnung: A mit RLT Regelung	RLT Luftverteilung: B mit RLT	nein: Klappenstellung wird nicht gemessen

Ursache	AP	Beschreibung	Messwerte und Methode	Quelle	nötige GA-Effizienzklasse DIN EN 15232	nötiger Automationsgrad DIN EN 18599-11	In Versuchsanlage möglich?
			Klappenstellung vergleichen		der Zulufttemperatur : C	Wärmeübertrager: B	
Wärmeübertrager: verschmutzt	H		Druckverlust in Abhängigkeit vom Volumenstrom messen und mit vorhandenen Werten vergleichen	[Deesko w et. al. (2010) S.25]	RLT Regelung der Wärmerückgewinnung: A mit Messung Druckdifferenz über EWT, Feuchte und Volumenstrom	RLT Wärmeübertrager: B mit Messung Druckdifferenz über EWT, Feuchte und Volumenstrom	nein: keine Wärmemengen-, Volumenstrom- oder Druckverlustmessung
Wärmeübertrager: vereist	H	Ähnlich zu „Wärmeübertrager: verschmutzt“ mit Zusatz kalte Außenluft	Keine Methode in Fehlerrecherche	keine	RLT Regelung der Wärmerückgewinnung Vereisungsschutz: A	RLT Wärmeübertrager: B mit Messung Druckdifferenz über EWT, Feuchte und Volumenstrom	nein
Wärmeübertrager: Luftleckage an Umgebung	H	Sollte mit „Ventilator: Luftleckage“ möglich sein, jedoch keine	Keine Methode in Fehlerrecherche	keine			nein

Ursache	AP	Beschreibung	Messwerte und Methode	Quelle	nötige GA-Effizienzklasse DIN EN 15232	nötiger Automationsgrad DIN EN 18599-11	In Versuchsanlage möglich?
		Eingrenzung auf WRG möglich					
Leckage zwischen Zu- und Abluft	H	ABL hat WÜ korrodiert und Leckage verursacht. Betreiber umging WRG per Bypass um ZUL sauber zu halten.	Fehler fiel bei Bestimmung des Änderungsgrades auf, weil Bypass als Reaktion auf Leckage komplett geöffnet – da händisches Eingreifen des Betreibers nötig, nicht als Erkennungsmethode geeignet	[Feist et. al. (2003) S.120]			nein

FED-Recherche Luftverteilung: Volumenstromregler

Ursache	AP	Beschreibung	Messwerte und Methode	Quelle	nötige Effizienzklasse EN 15232	GA-DIN
Volumenstromregler: Luftvolumenstrom zu klein	M		Ist-Volumenstrom messen und mit Sollwert/Planungswert vergleichen	[Birnbaum et. al. (2007) S.208] [Jagnow & Gebhardt (2018) S.69]	RLT Regelung der Zuluftströmung auf Raumbene: C mit Volumenstrommessung oder RLT Regelung der Temperatur der Raumluf: C (Volumenstromregelung) mit Volumenstrommessung	
		Mit Methode wurde zu großer Volumenstrom entdeckt. Sollte auch bei zu kleinen Volumenströmen funktionieren	Öffnungsgrad des Volumenstromregler in Abhängigkeit von Raumlufzustand/Anwesenheit/Betriebszustand betrachten	[Niekamp et. al. (2017) S. 18-19]	RLT Regelung der Zuluftströmung auf Raumbene: C oder RLT Regelung der Temperatur der Raumluf: C (Volumenstromregelung)	
Volumenstromregler: Luftvolumenstrom zu groß	H	Volumenstromregler geht kaum in die Stellung Grundlüftung	Öffnungsgrad des Volumenstromregler in Abhängigkeit von	[Niekamp et. al. (2017) S. 18-19]	RLT Regelung der Zuluftströmung auf Raumbene: C oder	

Ursache	AP	Beschreibung	Messwerte und Methode	Quelle	nötige GA-Effizienzklasse DIN EN 15232
			Raumluftzustand/Anwesenheit/ Betriebszustand betrachten		RLT Regelung der Temperatur der Raumluft: C (Volumenstromregelun g)
		Mit Methode wurde zu kleiner Volumenstrom entdeckt. Sollte auch bei zu großen Volumenströmen funktionieren	Ist-Volumenstrom messen und mit Sollwert/Planungswert vergleichen	[Birnbaum et. al. (2007) S.208] [Jagnow & Gebhardt (2018) S.69]	RLT Regelung der Zuluftströmung auf Raumebene: C mit Volumenstrommessun g oder RLT Regelung der Temperatur der Raumluft: C (Volumenstromregelun g) mit Volumenstrommessun g

FED-Recherche Luftübergabe: Luftdurchlass

Ursache	AP	Beschreibung	Messwerte und Methode	Quelle	nötige GA-Effizienzklasse DIN EN 15232	nötiger Automationsgrad DIN EN 18599-11	In Versuchsanlage möglich?
Luftdurchlass: Luftvolumenstrom zu klein	N	Nutzung von Messwerten im Raum möglich, jedoch ohne eine Fehlerursache auf den Durchlass einzugrenzen. Volumenstrom-/Druckverlustmessung am Durchlass sehr aufwendig	Keine Methode in Fehlerrecherche	keine			nein
Volumenstromregler: Luftvolumenstrom zu groß	M	Siehe „Luftdurchlass: Luftvolumenstrom zu klein“	Keine Methode in Fehlerrecherche	keine			nein
Luftdurchlass: ist zugedeckt/Beeinträchtigte Luftströmung	M	Nutzer bringen zusätzliche Filter an Auslass an. Spezifische Leistungsaufnahme des Ventilators steigt	Leistungsaufnahme sowie Volumenstrom des Ventilators messen und spez. Leistungsaufnahme Berechnen. Diese mit Werten aus vorangegangenen Perioden vergleichen.	[Großklos et. al. (2008) S.79-80]	Informationen Energieverbrauch: C mit RLT Luftvolumenstromregelung: A mit zusätzlicher	RLT Luftvolumenstromregelung: mind. B – drehzahlregelte Ventilatoren mit zusätzlicher	nein: keine elektrische Leistungsaufnahme

Ursache	AP	Beschreibung	Messwerte und Methode	Quelle	nötige GA-Effizienzklasse DIN EN 15232	nötiger Automationsgrad DIN EN 18599-11	In Versuchsanlage möglich?
			Methode ist allg. für erhöhte Druckverluste geeignet, aber nicht speziell für Luftdurchlässe		Volumenstrommessung	Volumenstrommessung und Leistungsaufnahme	
Luftdurchlass: Luftleckage	M	Sollte mit „Ventilator: Luftleckage“ möglich sein, jedoch keine Eingrenzung auf Luftdurchlass möglich	Keine Methode in Fehlerrecherche	keine			nein

A6-5: Klassifizierung des Betriebszustands

Klassifizierung von Betriebszuständen und Regelungssequenzen der RLT-Versuchsanlage in VBS

```

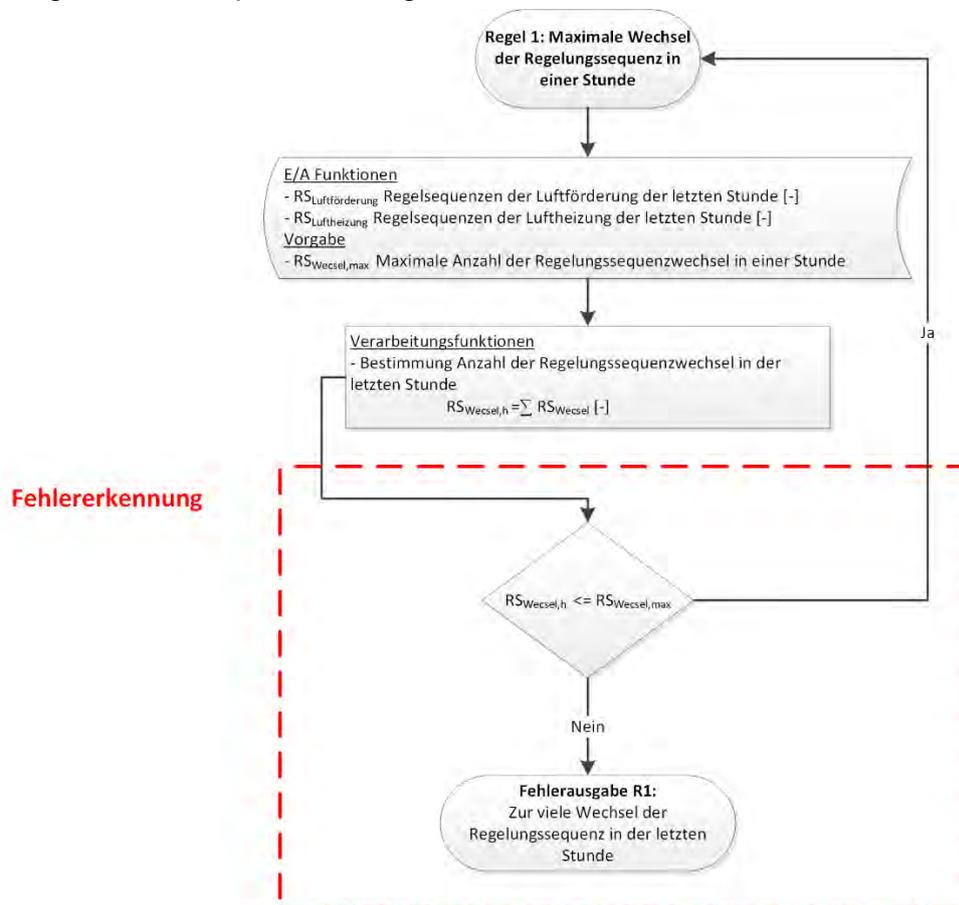
For i=1 to iAnzahl
  If Y_UML(i)=0 And Y_WRG(i)=0 And Y_LE_3WV(i)=0 Then
    RS_HZG(i)=0
  ElseIf Y_UML(i)=0 And Y_WRG(i)>0 And Y_LE_3WV(i)=0 Then
    RS_HZG(i)=1
  ElseIf Y_UML(i)>0 And Y_WRG(i)=100 And Y_LE_3WV(i)=0 Then
    RS_HZG(i)=2
  ElseIf Y_UML(i)>80 And Y_WRG(i)=100 And Y_LE_3WV(i)>0 Then
    RS_HZG(i)=3
  Else
    RS_HZG(i)=4
  End if

  If Y_ZUKzo1(i)>0 OR Y_ZUKzo2(i)>0 Then
    RS_LFTG(i)=1
  Else
    RS_LFTG(i)=0
  End if
Next
  
```

'RLT-Heizung aus
 'RLT-Heizung mit WRG
 'RLT-Heizung mit UML+WRG; Y_WRG muss 100% sein bevor UML aktiv
 'RLT-Heizung mit UML+WRG+LE; Y_WRG muss 100% und Y_UML 80% sein bevor LE aktiv
 'RLT-Heizung Regelsequenz unbekannt
 'Lüftungsbetrieb, wenn ZUL-Klappen für eine Zone > 0%
 'wenn Klappen geschlossen kein Lüftungsbetrieb

A6-6: Fehlererkennung durch Wechsel der Regelungssequenzen

Programmablaufplan der Regel 1



Umsetzung der Regel 1 in VBS

```
'Regel 1 Wechsel Betriebszustand in letzter Stunde Max=6 pro Stunde nach House 2001
'-----

Dim iR1                                     'interne Laufvariable für Regel 1 zur Summierung
Dim RSwechsel                               'Variable die bei einem RS-Wechsel zum Zeitpunkt gleich EINS gesetzt
                                           'wird
Dim RSwechselh                              'Variable zur Summierung der RS-Wechsel in einer Stunde
Dim R1_Indikator                            'Variable die im Fehlerfall gleich EINS gesetzt wird
Redim RSwechsel(iAnzahl)                   'iAnzahl ist die Anzahl der zu untersuchenden Messdaten
RSwechsel(1)=0

Dim RSwechselMax
RSwechselMax = 6                           'Festlegung wie viele Wechsel der Regelungssequenz in einer
                                           'Stunde erlaubt sind

For i=1 to iAnzahl                          'Vorgehen wird für die Gesamtheit der Messdaten ausgeführt

    If i>1 Then                              'Gibt es mehr als
                                           'einen Datensatz?
        If NOT RS_HZG(i)=RS_HZG(i-1) or NOT RS_LFTG(i)=RS_LFTG(i-1) Then 'Gibt es einen
                                           'Regelsequenzwechsel zum
                                           'vorherigen Zeitschritt?

            RSwechsel(i)=1                   ' wenn ja: RSwechsel zum Zeitpunkt
                                           'gleich EINS

        Else
            RSwechsel(i)=0                   ' sonst: RSwechsel zum Zeitpunkt gleich
                                           'NULL

        End if
    End if
    If i>60 Then                              'wenn es Daten für eine Stunde gibt dann
                                           'prüfe ob es in der letzten Stunde mehr
                                           'Wechsel als RSwechselMax gab

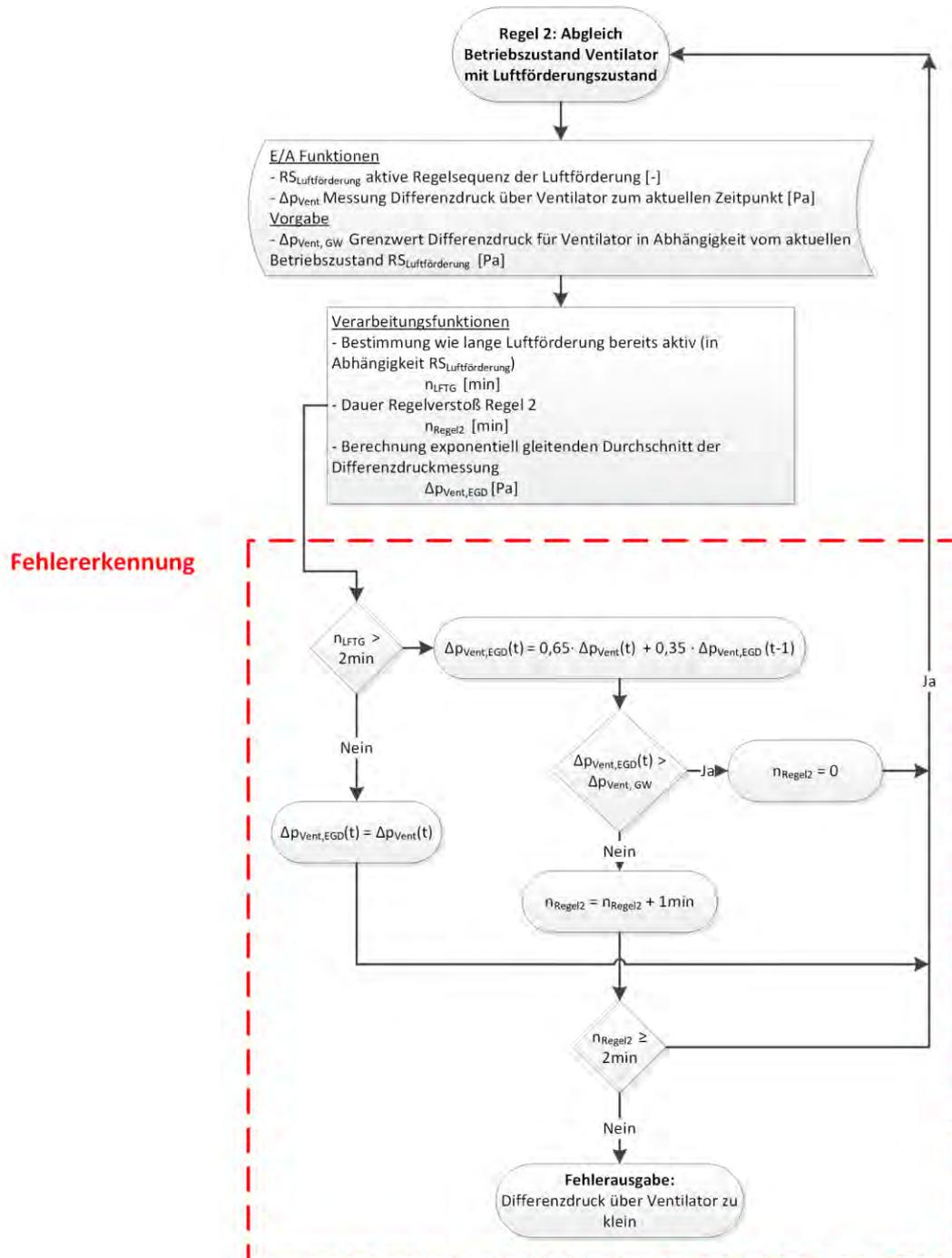
        RSwechselh=0

        For iR1=i-60 to i                     'Summieren der Wechsel der letzten Stunde
            RSwechselh=RSwechselh+RSwechsel(iR1)
        next

        if RSwechselh> RSwechselMax Then     'Gab es in der letzten Stunde mehr wechsel
                                           'als RSwechselMax?
            R1_Indikator=1                   'Wenn ja: dann Indikator gleich EINS
        Else
            R1_Indikator=0                   'sonst: dann Indikator gleich NULL
        end if
    End if
Next
```

A6-7: Fehlererkennung durch Abgleich Betriebszustand Ventilator mit Luftförderungszustand

Programmablaufplan der Regel 2 im Lüftungsbetrieb



Umsetzung der Regel 2 für beide Luftförderungszustände für Zu- und Abluftventilator in VBScript

```

'Variablen Regel 2: Definieren und Parametrieren
Dim R2Anzahl_ZUL, R2Anzahl_ABL 'Zähler für Regelverstöße
R2Anzahl_ZUL=0
R2Anzahl_ABL=0

Dim R2Grenzwert 'Grenzwert wie oft Regel verletzt werden darf
R2Grenzwert=2 'wenn Regel 2x nacheinander verletzt dann Fehler R2

Dim R2_dp_Grenz_ZUV, R2_dp_Grenz_ABV 'dp-Grenzwerte für Ventilatoren und Zustände
' Lüften/nicht Lüften
  
```

```

Redim R2_dp_Grenz_ZUV(2)
Redim R2_dp_Grenz_ABV(2)
R2_dp_Grenz_ZUV(1)=5           'dp-Grenzwert ZUV im Lüftungsbetrieb
R2_dp_Grenz_ZUV(0)=2         'dp-Grenzwert ZUV im nicht Lüftungsbetrieb
R2_dp_Grenz_ABV(1)=5         'dp-Grenzwert ABV im Lüftungsbetrieb
R2_dp_Grenz_ABV(0)=2         'dp-Grenzwert ABV im nicht Lüftungsbetrieb

Dim dp_ABV_EgD, dp_ZUV_EgD    'Exponentiell geglätteter Durchschnitt der gemessenen
                              Druckdifferenz über Ventilatoren
Dim EgD_Faktor_dp
EgD_Faktor_dp= 0.65          'Glättungsfaktor für exponentiell geglätteten Durchschnitt

Dim oChnR2_ZUV, oChnR2_ABV    'Objekte für Fehlerausgabe

'-----
For i=1 to iAnzahl           'Vorgehen für alle Messwerte

  'Anlage im Lüftungsbetrieb
  '-----

  If RS_LFTG(i) = 1 Then
    n_nLFTG=0                'Zähler für NICHT Lüftungsbetrieb gleich NULL
    n_LFTG=n_LFTG+1         'Zähler für Lüftungsbetrieb um EINS erhöhen

    'Regel 2 für Anlage im Lüftungsbetrieb

    If n_LFTG > 2 Then        'Bevor Regel angewendet wird muss Lüftungszustand länger als 2
                              Minuten aktiv sein

      'Berechnung der exponentiell geglätteten Durchschnitte
      dp_ZUV_EgD= (1 - EgD_Faktor_dp) * dp_ZUV_EgD + EgD_Faktor_dp * dp_ZUV(i)
      dp_ABV_EgD= (1 - EgD_Faktor_dp) * dp_ABV_EgD + EgD_Faktor_dp * dp_ABV(i)

      If dp_ZUV_EgD < R2_dp_Grenz_ZUV(RS_LFTG(i)) Then
        'Test ZUL-Ventilator im
        Lüftungsbetrieb: Prüfung dp hoch
        genug
        R2Anzahl_ZUL=R2Anzahl_ZUL+1
        'Wenn Differenzdruck zu klein
        Zähler Regelverstoß plus EINS
      Else
        R2Anzahl_ZUL=0
        'Sonst Zähler gleich NULL
      End If

      If R2Anzahl_ZUL>R2Grenzwert Then
        'Prüfung Zähler Regelverstoß
        oChnR2_ZUV(i)=1
        'Wenn Zähler den Grenzwert überschreitet,
        dann Fehlerausgabe EINS
      Else
        oChnR2_ZUV(i)=0
        'Sonst keine Fehlerausgabe
      End If

      If dp_ABV_EgD < R2_dp_Grenz_ABV(RS_LFTG(i)) Then
        'Test ABL-Ventilator im
        Lüftungsbetrieb: Prüfung dp hoch
        genug
        R2Anzahl_ABL=R2Anzahl_ABL+1
        'Wenn Differenzdruck zu klein
        Zähler Regelverstoß plus EINS
      Else
        R2Anzahl_ABL=0
        'Sonst Zähler gleich NULL
      End If

      If R2Anzahl_ABL>R2Grenzwert Then
        'Prüfung Zähler Regelverstoß
        oChnR2_ABV(i)=1
        'Wenn Zähler den Grenzwert überschreitet,
        dann Fehlerausgabe EINS
      Else
        oChnR2_ABV(i)=0
        'Sonst keine Fehlerausgabe
      End If
    Else
      'Lüftungszustand noch nicht lange aktiv:

      dp_ABV_EgD=dp_ABV(i)   'der geglättete Durchschnitt von dp gleich dem aktuellen Messwert
      dp_ZUV_EgD=dp_ZUV(i)
      R2Anzahl_ZUL=0         'Regel2-Zähler für Fehler gleich NULL
      R2Anzahl_ABL=0
      oChnR2_ZUV(i)=0       'Fehlerindikatoren Regel 2 gleich NULL
      oChnR2_ABV(i)=0

    End If

    'Regel 2 im Lüftungsbetrieb Ende

  'Anlage nicht im Lüftungsbetrieb
  '-----
  Else
    n_nLFTG=0                'Zähler für Lüftungsbetrieb gleich NULL
    n_nLFTG=n_nLFTG+1       'Zähler für NICHT Lüftungsbetrieb um EINS erhöhen

    'Regel 2 für Anlage im nicht Lüftungsbetrieb

    If n_nLFTG>2 Then        'Bevor Regel angewendet wird muss Lüftungszustand länger als 2
                              Minuten aktiv sein

      'Berechnung der exponentiell geglätteten Durchschnitte
      dp_ZUV_EgD= (1 - EgD_Faktor_dp) * dp_ZUV_EgD + EgD_Faktor_dp * dp_ZUV(i)

```

```

dp_ABV_EgD= (1 - EgD_Faktor_dp) * dp_ABV_EgD + EgD_Faktor_dp * dp_ABV(i)

If dp_ZUV_EgD > R2_dp_Grenz_ZUV(RS_LFTG(i)) Then      'Test ZUL-Ventilator im nicht
                                                       Lüftungsbetrieb: Prüfung
                                                       Differenzdruck zu hoch
                                                       'Wenn Differenzdruck zu groß
                                                       Zähler Regelverstoß plus EINS
                                                       'Sonst Zähler gleich NULL

    R2Anzahl_ZUL=R2Anzahl_ZUL+1

Else
    R2Anzahl_ZUL=0
End If

If R2Anzahl_ZUL>R2Grenzwert Then                    'Prüfung Zähler Regelverstoß
    oChnR2_ZUV(i)=-1                                'Wenn Zähler den Grenzwert überschreitet,
                                                       dann Fehlerausgabe MINUS EINS
Else
    oChnR2_ZUV(i)=0                                'Sonst keine Fehlerausgabe
End If

If dp_ABV_EgD > R2_dp_Grenz_ABV(RS_LFTG(i)) Then    'Test ABL-Ventilator im nicht
                                                       Lüftungsbetrieb: Prüfung
                                                       Differenzdruck zu hoch
                                                       'Wenn Differenzdruck zu groß
                                                       Zähler Regelverstoß plus EINS
                                                       'Sonst Zähler gleich NULL

    R2Anzahl_ABL=R2Anzahl_ABL+1

Else
    R2Anzahl_ABL=0
End If

If R2Anzahl_ABL>R2Grenzwert Then                    'Prüfung Zähler Regelverstoß
    oChnR2_ABV(i)=-1                                'Wenn Zähler den Grenzwert überschreitet,
                                                       dann Fehlerausgabe MINUS EINS
Else
    oChnR2_ABV(i)=0                                'Sonst keine Fehlerausgabe
End If
Else
    'Lüftungszustand noch nicht lange aktiv:

    dp_ABV_EgD=dp_ABV(i)                            'geglättete Durchschnitt dp gleich dem aktuellen Messwert
    dp_ZUV_EgD=dp_ZUV(i)
    R2Anzahl_ZUL = 0                                'Regel2-Zähler für Fehler gleich NULL
    R2Anzahl_ABL = 0
    oChnR2_ZUV(i)=0                                'Fehlerindikatoren Regel 2 gleich NULL
    oChnR2_ABV(i)=0

End If

'Regel 2 im nicht Lüftungsbetrieb Ende

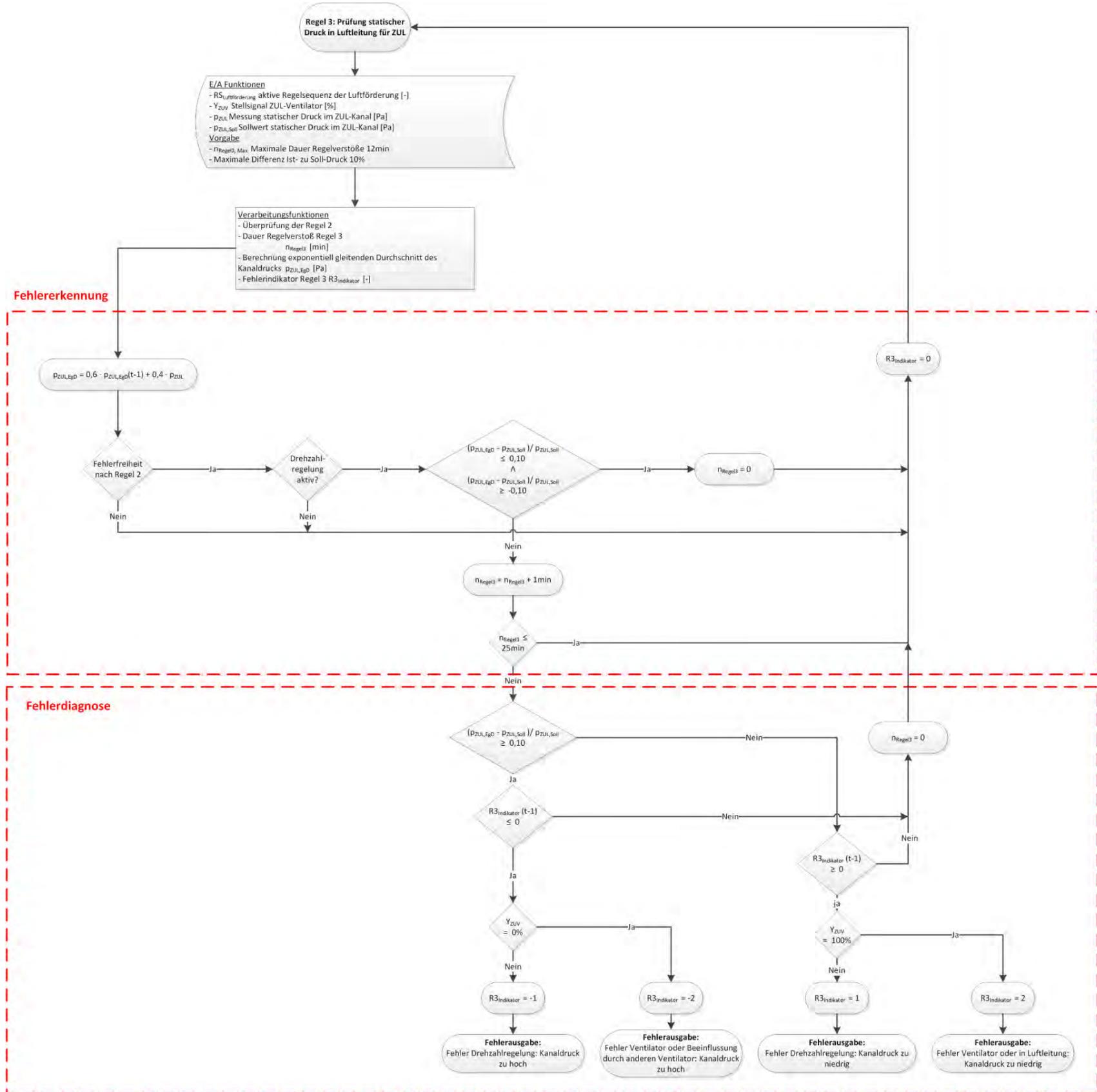
End if

Next

```

A6-8: Fehlererkennung durch Prüfung des statischen Drucks in der Luftleitung

Programmablaufplan des Algorithmus der Regel 3



Umsetzung der Regel 3 für den statischen Druck der ZUL-Leitung in VBScript

```
'Variablen Regel 3: Definieren und Parametrieren

Dim R3Anzahl_ZUV                'Zähler für Anzahl Regelverstöße
Dim R3Grenzwert                 'Wie viele Regelverstöße sollen nacheinander erlaubt sein
Dim R3MaxAbweichung             'Maximale Abweichung des Ist zum Soll-Druck

R3Anzahl_ZUV=0
R3Grenzwert=25
R3MaxAbweichung=0.10           'Soll zu Ist-Druck soll sich um max. 10% unterscheiden

Dim R3_ZUV_Indikator           'Feld wird zum Ablegen des Fehlerindikators zu den
                                'jeweiligen Zeitpunkten genutzt

Redim R3_ZUV_Indikator(iAnzahl)

Dim p_ZUL_EgD                  'Exponentiell geglätteter Durchschnitt des gemessenen
                                'statischen Drucks in Zuluftleitung
Dim EgD_Faktor_p_stat          'Glättungsfaktor für exponentiell geglätteten Durchschnitt
EgD_Faktor_p_stat=0.4

Dim oChnR3_ZUV                 'Objekte für Ausgabe Fehlerindikator
Dim oChnp_ZUL_EgD              'Objekte für Ausgabe berechneter exponentiell geglätteter
                                'statischer Druck

'-----
'Regel 3 für Zuluft

p_ZUL_EgD=(1 - EgD_Faktor_p_stat) * p_ZUL_EgD+ EgD_Faktor_p_stat * p_ZUL(i) 'Berechnung exponentiell
                                                                'geglätteter statischer
                                                                'Druck

oChnp_ZUL_EgD(i)=p_ZUL_EgD

If RS_LFTG(i)=1 AND R2Anzahl_ZUL=0 Then                'Bedingung für aktive Drehzahlregelung zur
                                                        'konstanten Druckhaltung aktiv (nach Hr.
                                                        'Zeidler im Normalfall immer) und kein
                                                        'Fehler durch Regel 2 in Verzug (Zähler
                                                        'Regel 2 gleich NULL)

    'bei zu starker Abweichung Soll- zu Ist-Druck Fehleranzahl +1
    If (p_ZUL_EgD - p_ZUL_soll(i)) / p_ZUL_soll(i) > R3MaxAbweichung
    OR (p_ZUL_EgD - p_ZUL_soll(i)) / p_ZUL_soll(i) < (-1*R3MaxAbweichung) Then
        R3Anzahl_ZUV=R3Anzahl_ZUV+1
    Else
        R3Anzahl_ZUV=0                                'Wenn Abweichung nicht groß, Fehleranzahl NULL
    End If

    If R3Anzahl_ZUV > R3Grenzwert Then                'Wird maximal erlaubt Fehleranzahl überschritten?

        'Ist der Ist-Druck zu große?
        If (p_ZUL_EgD - p_ZUL_soll(i)) /p_ZUL_soll(i) > R3MaxAbweichung Then

            If R3_ZUV_Indikator(i-1) <=0 Then 'Gab es im Zeitschritt vorher eine andere
                                                'Fehlerart der Regel 3, soll der Zähler der
                                                'Regelverstöße wieder NULL gesetzt werden
                                                'bevor auf die neuen Fehlerart geprüft wird

                'Wird der Soll-Druck überstiegen obwohl Stellsignal 0%?
                If Y_ZUV(i) = 0 AND p_ZUL(i) > p_ZUL_soll(i) Then
                    oChnR3_ZUV(i) = - 2           'ja: Indikator gleich MINUS ZWEI
                    R3_ZUV_Indikator(i) = -2
                Else
                    oChnR3_ZUV(i) = - 1           'nein: Indikator gleich MINUS EINS
                    R3_ZUV_Indikator(i) = -1
                End If
            Else
                R4Anzahl_ZUV=0                    'Im vorherigen Zeitschritt anderer
                                                'Fehlerzustand: Fehleranzahl auf NULL
                                                'setzen
            End If

        Else
            'Ist der Druck nicht zu hoch ist er zu klein (da
            'ein Fehler festgestellt wurde)

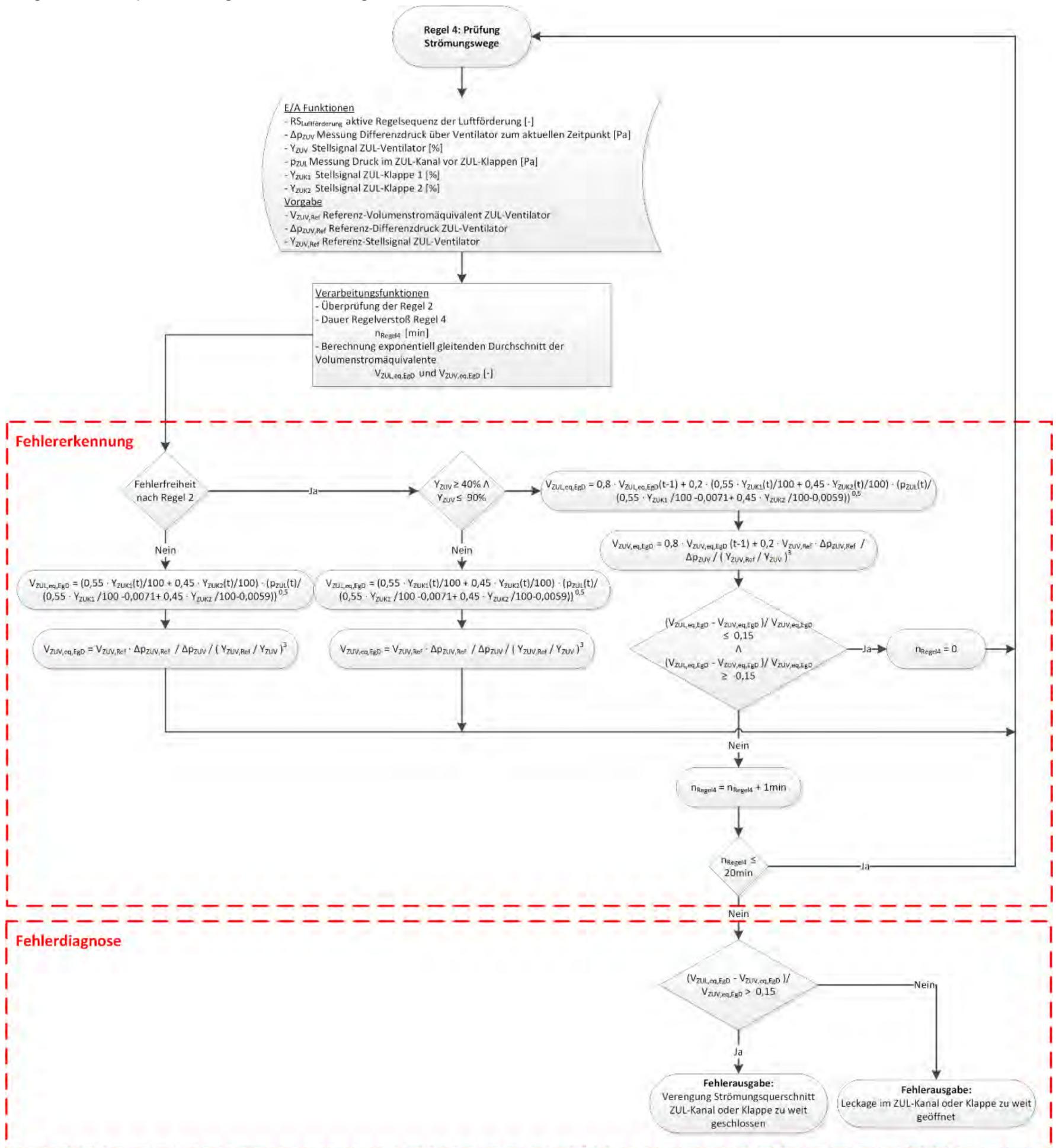
            If R3_ZUV_Indikator(i-1) >=0 Then 'Gab es im Zeitschritt vorher eine andere
                                                'Fehlerart der Regel 3, soll der Zähler der
                                                'Regelverstöße wieder NULL gesetzt werden
                                                'bevor auf die neuen Fehlerart geprüft wird

                'Wird der Soll-Druck unterschritten obwohl Stellsignal 100%?
                If Y_ZUV(i) = 100 AND p_ZUL(i) < p_ZUL_soll(i) Then
                    oChnR3_ZUV(i) = 2             'ja: Indikator gleich ZWEI
                    R3_ZUV_Indikator(i) = 2
                Else
                    oChnR3_ZUV(i) = 1             'nein: Indikator gleich EINS
                    R3_ZUV_Indikator(i) = 1
                End If
            Else
                R3Anzahl_ZUV=0                    'Im vorherigen Zeitschritt anderer
                                                'Fehlerzustand: Fehleranzahl auf
                                                'NULL setzen
            End If
        End If
    End If
End If
```

```
End If
Else
    End If
    oChnR3_ZUV(i) = 0
    R3_ZUV_Indikator(i) = 0
    'Maximal erlaubt Fehleranzahl wird nicht
    überschritten: Indikator gleich NULL
End If
Else
    'keine Drehzahlregelung: Zustand wird nicht als Fehlerzustand
    gezählt
    R3Anzahl_ZUV=0
    R3_ZUV_Indikator(i) = 0
End if
'Regel 3 für Zuluft Ende
```

A6-9: Prüfung Zu- und Abluftklappen

Programmablaufplan des Algorithmus der Regel 4



Umsetzung der Regel 4 für die Zuluftseite der RLT-Anlage in VBScript

```
'Variablen Regel 4: Definieren und Parametrieren
Dim R4Anzahl_ZUL           'Zähler für Regelverstöße
Dim R4AnzahlGrenzwert     'Erlaubte Anzahl Regelverstöße
Dim R4Abweichung_Max      'Erlaubte Abweichung zwischen Äquivalenten

R4Anzahl_ZUL=0
R4AnzahlGrenzwert=20
R4Abweichung_Max=0.15

'Eingebaute Fehler für Messzeitraum bis 16.3.2021 werden bei
Abweichungen zwischen 0.11 bis 0.23 gefunden.
'Bei weniger erlaubter Abweichung gibt es Fehlalarme, bei mehr sind
unterbliebene Alarme vorhanden

Dim V_ZUL_eq_EgD, V_ZUV_eq_EgD      'Variablen zur Berechnung der Volumenstromäquivalente
Dim V_ZUV_Ref, Y_ZUV_Ref, dp_ZUV_Ref
V_ZUV_Ref = 7.74359464241265
Y_ZUV_Ref = 78.0340229885054
dp_ZUV_Ref = 229.88591954023

Dim EgD_Faktor_V_eq
EgD_Faktor_V_eq=0.2

Dim oChnR4_ZUL           'Objekte für Ausgabe Fehlerindikator und Volumenstromäquivalente
Dim oChnV_ZUL_eq_EgD, oChnV_ZUV_eq_EgD

'-----

'Regel 4 für Zuluftseite

'Bedingungen für Anwendung der Regel 4: kein potentieller Fehler durch Regel 2, Stellsignal des ZUL-
Ventilators im gültigen Bereich und Differenzdruck über Ventilator größer als gemessener statischer
Druck
If R2Anzahl_ZUL=0 AND dp_ZUV(i)>R2_dp_Grenz_ZUV(RS_LFTG(i)) AND Y_ZUV(i)>39
AND Y_ZUV(i)<=90 AND dp_ZUV(i)>p_ZUL(i) Then

    'Berechnung Volumenstromäquivalent aus Klappendaten
    V_ZUL_eq_EgD = (1 - EgD_Faktor_V_eq) * V_ZUL_eq_EgD +
    EgD_Faktor_V_eq * ((0.55 * Y_ZUKzo1(i) + 0.45 * Y_ZUKzo2(i))/100 *
    (p_ZUL(i)/(0.55*Y_ZUKzo1(i)/100-0.0071+0.45*Y_ZUKzo2(i)/100-0.0059))^0.5)

    'Berechnung Volumenstromäquivalent aus Ventilatoraten
    V_ZUV_eq_EgD = (1 - EgD_Faktor_V_eq) * V_ZUV_eq_EgD +
    EgD_Faktor_V_eq * (V_ZUV_Ref * dp_ZUV_Ref / (dp_ZUV(i) * (Y_ZUV_Ref/Y_ZUV(i))^3))

    oChnV_ZUL_eq_EgD(i)=V_ZUL_eq_EgD
    oChnV_ZUV_eq_EgD(i)=V_ZUV_eq_EgD

    'Unterscheiden sich Volumenstromäquivalente zu stark?
    If (V_ZUL_eq_EgD - V_ZUV_eq_EgD) / V_ZUV_eq_EgD > R4Abweichung_Max OR
    (V_ZUL_eq_EgD - V_ZUV_eq_EgD) / V_ZUV_eq_EgD < R4Abweichung_Max*(-1) Then

        R4Anzahl_ZUL=R4Anzahl_ZUL+1      'Wenn ja: Fehleranzahl +1
    Else
        R4Anzahl_ZUL=0                  'Wenn nein: Fehleranzahl gleich NULL
    End If

    'Wird die maximal erlaubte Fehleranzahl überschritten?
    If R4Anzahl_ZUL > R4AnzahlGrenzwert Then

        'Ist das Volumenstromäquivalent aus Klappendaten größer als das aus Ventilatoraten?
        If (V_ZUL_eq_EgD-V_ZUV_eq_EgD)/V_ZUV_eq_EgD > R4Abweichung_Max Then

            oChnR4_ZUL(i)=1              'Wenn ja: Fehlerindikator gleich EINS

        Else
            oChnR4_ZUL(i)=-1            'Wenn nein: Fehlerindikator gleich MINUS EINS
        End If

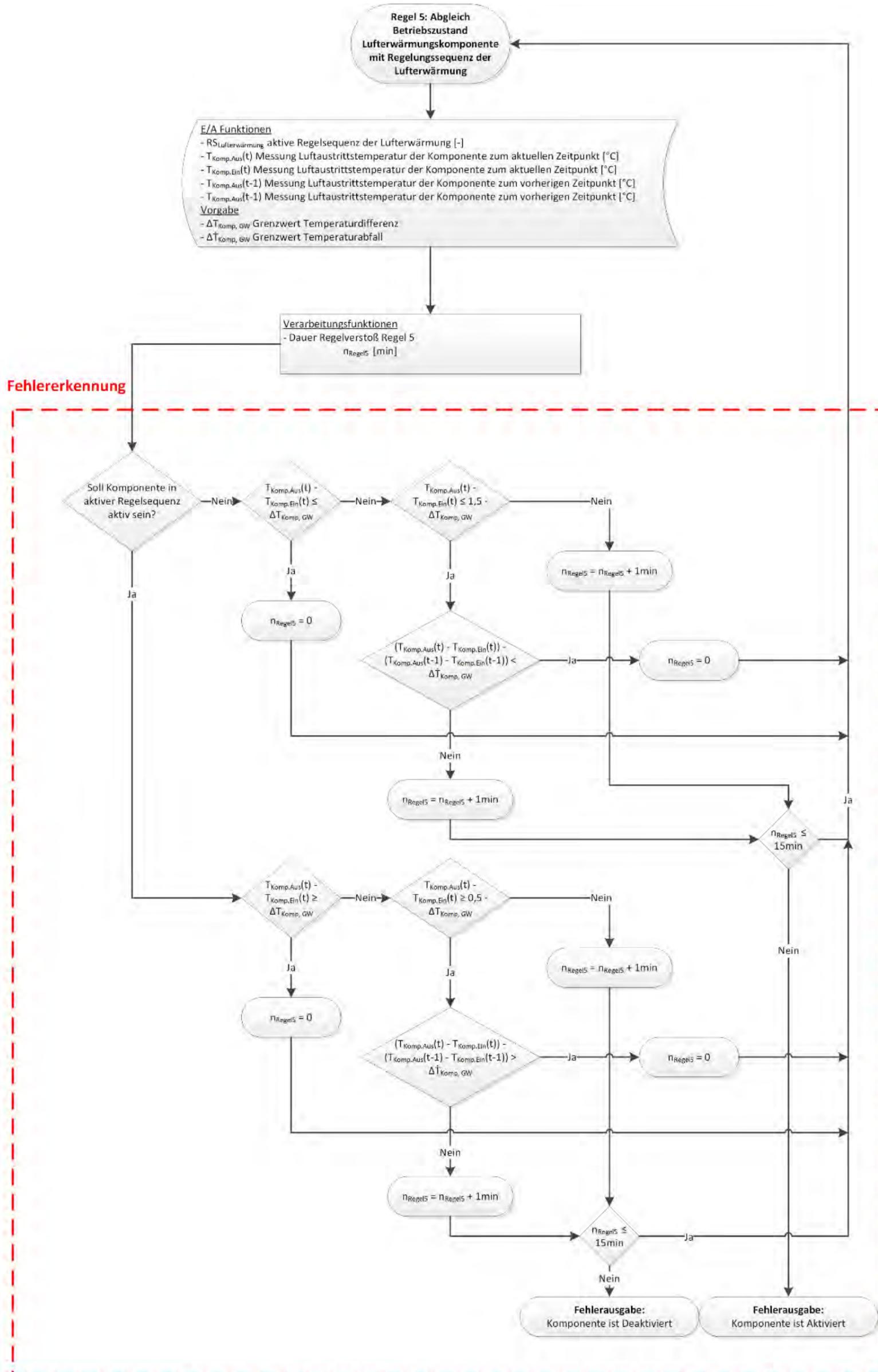
    Else
        oChnR4_ZUL(i)=0                'Maximale Fehleranzahl wird nicht überschritten:
        Fehlerindikator gleich NULL
    End If

Else
    'Bedingungen für Regel 4 nicht erfüllt:
    Fehlerindikator gleich NULL und Fehleranzahl gleich
    NULL
    oChnR4_ZUL(i)=0
    R4Anzahl_ZUL=0
End if

'Regel 4 für Zuluftseite Ende
```

A6-10: Prüfung Betriebszustand Lufterwärmungskomponente mit Regelsequenz der Lufterwärmung

Programmablaufplan des Algorithmus der Regel 5



Umsetzung der Regel 5 für einen Luftherhitzer der RLT-Anlage in VBScript

```

'Variablen Regel 5: Definieren und Parametrieren

Dim R5Anzahl_LE           'Zähler für Regelverstöße

R5Anzahl_LE = 0

Dim R5Anzahl_Gr_LE       'Erlaubte Anzahl Regelverstöße

R5Anzahl_Gr_LE = 15

Dim R5Abweichung_Max_LE  'Erlaubte Abweichungen zwischen Aus- und Eintrittstemperatur

R5Abweichung_Max_LE = 2.8 'House 2001: 1,7K wegen Ungenauigkeit Temperaturmessung und 1,1K
                            wegen Temperaturerhöhung durch Ventilator; Abweichung Gesamt = 2,8K

Dim oChnR5_LE            'Objekte für Ausgabe Fehlerindikator
'-----

'Anwendung Regel 5 für einen Luftherhitzer

'Welche Regelsequenz liegt vor?
If RS_HZG(i)<3 Then           'Wenn ja: Luftherhitzer soll deaktiviert sein

    'T_Austritt minus T_Eintritt > Grenzwert?
    If (T_ZUL_zol(i)- T_ZUL_WRG_aus_LE_ein(i)) > R5Abweichung_Max_LE Then

        'Wenn ja: T_Austritt minus T_Eintritt < 1,5 * Grenzwert?
        If (T_ZUL_zol(i)- T_ZUL_WRG_aus_LE_ein(i)) < 1.5 * R5Abweichung_Max_LE Then

            'Steigt oder verharret die Temperaturdifferenz?
            If (T_ZUL_zol(i)- T_ZUL_WRG_aus_LE_ein(i))-
                (T_ZUL_zol(i-1)- T_ZUL_WRG_aus_LE_ein(i-1))>=0 Then

                R5Anzahl_LE = R5Anzahl_LE+1           'Wenn ja - Temperatur steigt oder
                                                        verharret: Fehleranzahl + 1

            Else

                R5Anzahl_LE = 0                       'Wenn nein - Temperatur sinkt:
                                                        Fehleranzahl gleich NULLL

            End If

        Else

            R5Anzahl_LE = R5Anzahl_LE+1           'Wenn nein - T_Austritt minus
                                                    T_Eintritt >= 1,5 * Grenzwert:
                                                    Fehleranzahl + 1

        End If

    Else

        R5Anzahl_LE = 0                       'Wenn nein - T_Austritt minus
                                                    T_Eintritt <= Grenzwert:
                                                    Fehleranzahl gleich NULLL

    End If

    'Überschreitet der Zähler der Regelverstöße die maximal erlaubte Anzahl der Verstöße?
    If R5Anzahl_LE > R5Anzahl_Gr_LE Then
        oChnR5_LE(i) = -1                       'Wenn ja: Fehlerindikator Regel 5 für
                                                Luftherhitzer gleich MINUS EINS
    Else
        oChnR5_LE(i) = 0                       'Wenn nein: Fehlerindikator Regel 5 für
                                                Luftherhitzer gleich NULL
    End If

Else

    'Wenn nein: Luftherhitzer soll aktiviert sein?
    If RS_HZG(i)= 3 Then

        'T_Austritt minus T_Eintritt > Grenzwert?
        If (T_ZUL_zol(i)- T_ZUL_WRG_aus_LE_ein(i)) < R5Abweichung_Max_LE Then

            'Wenn ja: T_Austritt minus T_Eintritt > 0,5 * Grenzwert?
            If (T_ZUL_zol(i)- T_ZUL_WRG_aus_LE_ein(i)) > 0.5 * R5Abweichung_Max_LE Then

                'Sinkt oder verharret die Temperaturdifferenz?
                If (T_ZUL_zol(i)- T_ZUL_WRG_aus_LE_ein(i))-
                    (T_ZUL_zol(i-1)- T_ZUL_WRG_aus_LE_ein(i-1)) =< 0 Then

                    R5Anzahl_LE = R5Anzahl_LE+1           'Wenn ja - Temperatur
                                                            sinkt oder verharret:
                                                            Fehleranzahl + 1

                Else

                    R5Anzahl_LE = 0                       'Wenn nein - Temperatur
                                                            steigt: Fehleranzahl
                                                            gleich NULL

                End If

            Else

                R5Anzahl_LE = R5Anzahl_LE+1           'Wenn nein - T_Austritt
                                                        minus T_Eintritt =< 0,5 *
                                                        Grenzwert: Fehleranzahl +
                                                        1

            End If

        End If

    End If

```

```

Else
    R5Anzahl_LE = 0
    'Wenn nein - T_Austritt minus
    T_Eintritt >= Grenzwert: Fehleranzahl
    gleich NULL

End If

'Überschreitet der Zähler der Regelverstöße die maximal erlaubte Anzahl der Verstöße?
If R5Anzahl_LE > R5Anzahl_Gr_LE Then
    oChnR5_LE(i) = 1
    'Wenn ja: Fehlerindikator Regel 5 für
    Lüfterhitzer gleich EINS

Else
    oChnR5_LE(i) = 0
    'Wenn nein: Fehlerindikator Regel 5 für
    Lüfterhitzer gleich NULL

End If

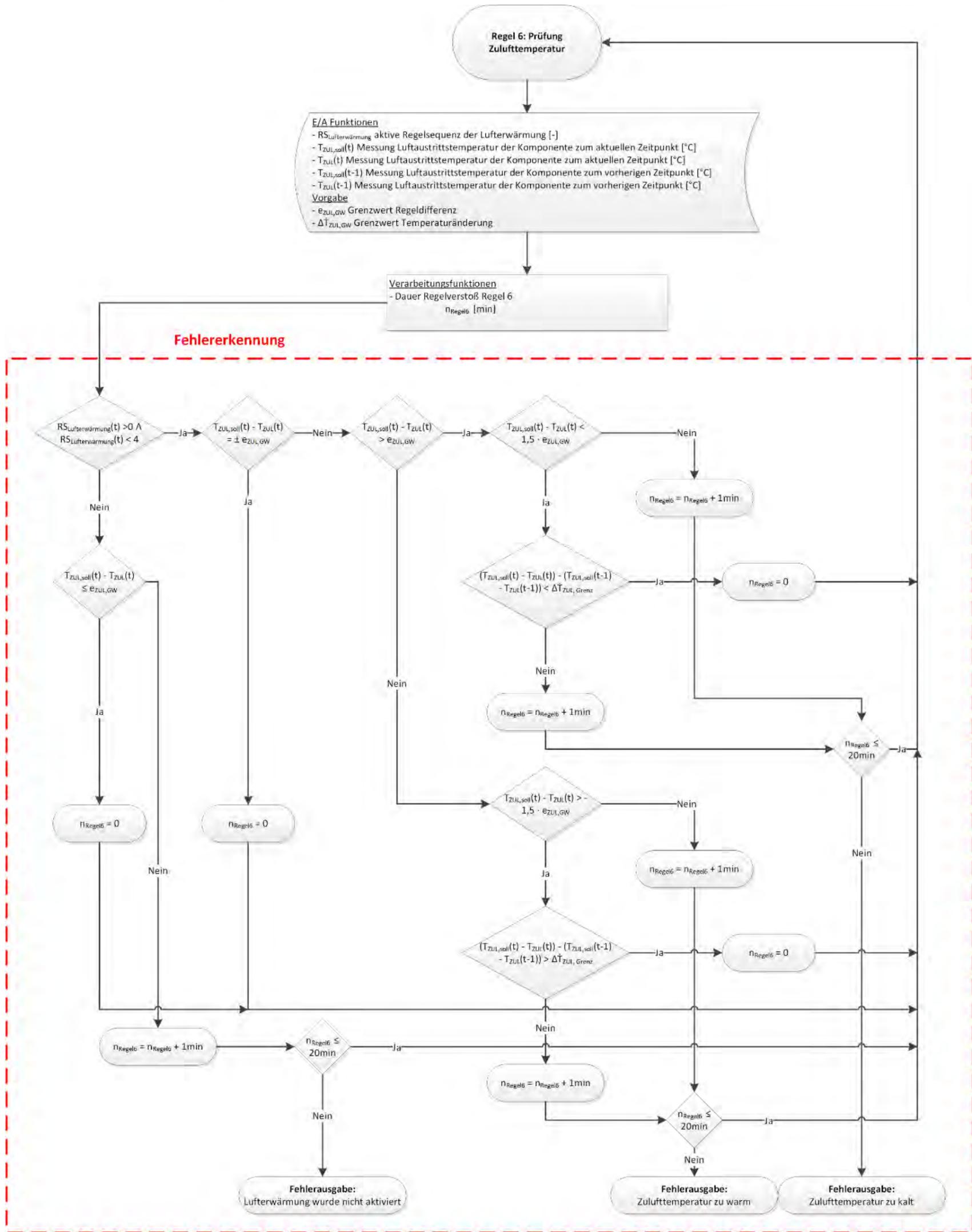
Else
    'Luftheizsequenz 4: nicht definierter Zustand, keine Anwendung von Regel 5
End If

End If
'-----

```

A6-11: Prüfung der Zulufttemperatur

Programmablaufplan des Algorithmus der Regel 6



Umsetzung der Regel 6 zur Prüfung der Zulufttemperatur in VBScript

```
'Variablen Regel 6: Definieren und Parametrieren zur Prüfung Zulufttemperatur

Dim R6Anzahl                'Zähler für Regelverstöße
R6Anzahl = 0

Dim R6Anzahl_Gr            'Erlaubte Anzahl Regelverstöße
R6Anzahl_Gr = 20

Dim R6Abweichung_Max      'Erlaubte Abweichungen zwischen Soll und Ist der ZUL-
                          'Temperatur
R6Abweichung_Max = 1

Dim oChnR6                'Objekt für Ausgabe Fehlerindikator

'Anwendung Regel 6 zur Prüfung der Zulufttemperatur
If RS_HZG(i)>0 And RS_HZG(i)<4 Then ' Wird die ZUL-Temperatur erhöht?

    'Wird T_ZUL_soll unter- oder überschritten?
    If T_ZUL_soll(i) - T_ZUL_zol(i) > R6Abweichung_Max Or
    T_ZUL_soll(i) - T_ZUL_zol(i) < (-1) * R6Abweichung_Max Then

        'Wenn ja - Über- oder Unterschreitung: Wird die Temperatur Unterschritten?
        If T_ZUL_soll(i) - T_ZUL_zol(i) > R6Abweichung_Max Then

            'Wenn ja - Unterschreitung: Wird die Temperatur nicht zu stark
            unterschritten?
            If T_ZUL_soll(i) - T_ZUL_zol(i) < 1.5 * R6Abweichung_Max Then

                'Wenn ja - keine starke Unterschreitung: Nimmt die Abweichung ab?
                If (T_ZUL_soll(i) - T_ZUL_zol(i)) -
                (T_ZUL_soll(i-1) - T_ZUL_zol(i-1)) < 0 Then

                    R6Anzahl = 0                'Wenn ja - Abweichung nimmt ab:
                    Fehleranzahl gleich NULL

                Else

                    R6Anzahl = R6Anzahl + 1 'Wenn nein - Abweichung verharrt
                    oder wird größer: Fehleranzahl +1

                End If

            Else

                'Temperatur wird stakt unterschritten: Fehleranzahl +1

                R6Anzahl = R6Anzahl + 1

            End If

        Else

            'Wenn nein: Die Temperatur wird überschritten

            'Wird die Temperatur nicht zu stark überschritten?
            If T_ZUL_soll(i) - T_ZUL_zol(i) > (-1.5) * R6Abweichung_Max Then

                'Wenn ja - keine starke Übererschreitung: Nimmt die Abweichung ab?
                If (T_ZUL_soll(i) - T_ZUL_zol(i)) - (T_ZUL_soll(i-1)
                - T_ZUL_zol(i-1)) > 0 Then

                    R6Anzahl = 0                'Wenn ja - Abweichung nimmt ab:
                    Fehleranzahl gleich NULL

                Else

                    R6Anzahl = R6Anzahl + 1 'Wenn nein - Abweichung verharrt
                    oder wird größer: Fehleranzahl +1

                End If

            Else

                'Temperatur wird stakt überschritten: Fehleranzahl +1

                R6Anzahl = R6Anzahl + 1

            End If

        End If

    Else

        'Wenn nein - keine Über oder Unterschreitung: Fehleranzahl = 0

        R6Anzahl = 0

    End If

Else

    'die Zulufttemperatur muss laut aktuelle Regelsequenz nicht erhöht
    werden; auf eine Unterschreitung des aktuellen Sollwerts wird
    trotzdem geprüft

    'wird der Zulufttemperatursollwert außerhalb der Regelsequenzen 1 bis 3 unterschritten?
    If T_ZUL_soll(i) - T_ZUL_zol(i) > R6Abweichung_Max Then

        R6Anzahl = R6Anzahl + 1 'Wenn ja - Temperatur wird unterschritten:
        Regelungstechnischer Fehler da eine Regelsequenz
        zur Lufterwärmung aktiv sein müsste Fehleranzahl +1

    Else

        R6Anzahl = 0                'Wenn nein - Temperatur unterschreitet den Sollwert
        nicht: Fehleranzahl = 0

    End If

End If
```

```

End If
End If

'Überschreitet der Zähler der Regelverstöße die maximal erlaubte Anzahl der Verstöße?
If R6Anzahl > R6Anzahl_Gr Then

    If T_ZUL_soll(i) > T_ZUL_zol(i) Then      'Wenn ja: wird Zulufttemperatur unterschritten?

        'Wenn ja - wird Zulufttemperatur unterschritten: Unterschreitung während einer
        Luftheizsequenz?
        If RS_HZG(i)>0 And RS_HZG(i)<4 Then
            oChnR6(i) = 1      'Wenn ja - Unterschreitung während Heizsequenz:
                               T_ZUL_soll - T_ZUL hat bei Unterschreitung ein positives
                               Ergebnis -> Fehlerindikator gleich EINS
        Else
            oChnR6(i) = 2      'Wenn nein - Unterschreitung außerhalb einer Heizsequenz:
                               Unterschreitung des Sollwertes und keine
                               Lufterwärmungssequenz aktiv -> Fehlerindikator gleich ZWEI
        End If
    Else
        'Wenn nein, dann wird überschritten da ein Fehler vorliegt

        oChnR6(i) = -1        ' T_ZUL_soll - T_ZUL hat bei Überschreitung ein negatives
                               Ergebnis -> Fehlerindikator gleich MINUS EINS

    End If

Else
    'Wenn nein - keine Überschreitung der maximal erlaubten Anzahl der Verstöße:
    Fehlerindikator gleich NULL
    oChnR6(i) = 0

End If

'-----

```