

Überprüfung von Automatisierungsfunktionen heiz- und raumlufttechnischer Anlagen

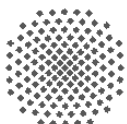
Von der Fakultät Maschinenbau der Universität Stuttgart zur Erlangung
der Würde eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.) genehmigte Abhandlung

vorgelegt von

Robert F. Grob

aus Alitzheim

Hauptberichter:
Prof. Dr.-Ing. Michael Schmidt
Mitberichter:
Prof. em. Dr.-Ing. Heinz Bach
Tag der Einreichung:
29.01.2003
Tag der mündlichen Prüfung:
23.04.2003



Universität Stuttgart

IKE Lehrstuhl für Heiz- und Raumluftechnik
2003

ISBN 3 - 98008572 - 0 - 4

D93

Universität Stuttgart, **IKE**
Lehrstuhl für Heiz- und Raumluftechnik
Pfaffenwaldring 35
70569 Stuttgart

Tel.: 0711 / 685 - 2085
Fax.: 0711 / 685 - 2096

Stuttgart, Mai 2003

Für meine Eltern

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Heiz- und Raumluftechnik der Universität Stuttgart.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Michael Schmidt danke ich sehr für die Betreuung meiner Arbeit ebenso wie für seine stete Bereitschaft zu fachlichen Diskussionen. Diese Diskussionen und die daraus resultierenden Anregungen haben wesentlich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen.

Mein Dank gilt ebenso Herrn Prof. em. Dr.-Ing. Heinz Bach für die Übernahme des Mitberichts und für die wohlwollende und kritische Durchsicht meiner Arbeit. Ihm danke ich insbesondere auch dafür, dass er mit seiner unvergleichlichen Art mein Interesse für das Fachgebiet der Heiz- und Raumluftechnik geweckt hat.

Allen Kollegen und Studenten am Lehrstuhl für Heiz- und Raumluftechnik danke ich dafür, dass sie mich stets unterstützt haben – sei es durch fruchtbare Diskussionen bei der Bearbeitung meiner Dissertation oder durch Ratschläge bezüglich des Aufbaus des Emulationsversuchsstandes. Mein besonderer Dank gilt hierbei Herrn Dipl.-Ing. Martin Dietrich, der mich beim Aufbau und bei der Programmierung des Emulationsversuchsstandes maßgeblich unterstützt hat. Ebenso bedanke ich mich bei den Herren Dipl.-Ing. Fred Kolarik und Dipl.-Ing. Konstantinos Stergiaropoulos für die kritische Durchsicht des Manuskripts.

Ausdrücklich möchte ich mich bei der Firma Honeywell AG für die Bereitstellung von Hard- und Software zur Gebäudeautomatisierung – ohne die diese Arbeit nicht möglich gewesen wäre – bedanken. Hier gilt mein besonderer Dank den Herren Dipl.-Ing. Axel Beyer und Franz Werkmeister. In gleicher Weise möchte ich mich bei Herrn Dipl.-Ing. Werner Gauß und Erich Fischer von der Firma Hewlett-Packard GmbH bedanken, die mir uneingeschränkten Zugang zu einer realen Klimaanlage und dem dazugehörigen Automatisierungssystem gewährten und mich bei meinen Untersuchungen stets tatkräftig unterstützten.

Herrn Dipl.-Ing. Jürgen Harter danke ich für die gute und freundschaftliche Zusammenarbeit in den Forschungsprojekten, die die Grundlage für diese Arbeit bildeten. Der Austausch mit ihm und die Anregungen aus seiner Praxiserfahrung erwiesen sich stets als äußerst wertvoll bei der Bearbeitung ungelöster Fragen.

Meinen Schwestern Rita Feuerbach und Jutta Barthelme mit ihren Familien möchte ich für ihre stete Verbundenheit und ihre Aufmunterungen danken. Meiner Freundin Roswitha Vogt danke ich ganz herzlich für ihr Verständnis sowie für ihre Unterstützung und ihre Ermunterung – vor allem in der Endphase meiner Arbeit.

Mein ganz besonderer Dank gilt jedoch meinen Eltern. Sie haben mich jederzeit unterstützt, wo sie nur konnten, und mir meinen bisherigen beruflichen Werdegang überhaupt erst ermöglicht.

Kurzfassung

Es wird eine Methode vorgestellt, mit der Automatisierungsfunktionen heiz- und raumlufttechnischer Anlagen unabhängig vom Stand des Baufortschritts und der Anlageninstallation überprüft werden können. Auf diese Weise wird die Inbetriebnahme solcher Funktionen aus dem bisher fest vorgegeben zeitlichen Ablauf des Bauprozesses herausgelöst. Auf der Basis von grundsätzlichen Überlegungen zur Überprüfung von Automatisierungsfunktionen sowie von in der Praxis ermittelten Anforderungen werden InbetriebnahmeprozEDUREN für Automatisierungsfunktionen erarbeitet. Die Prozeduren werden in einem eigens hierfür entwickelten Emulator für Automatisierungssysteme heiz- und raumlufttechnischer Anlagen durchgeführt. Der Emulator dient dabei als virtuelle Testumgebung, in der eine Betriebssimulation der zu steuernden und zu regelnden Anlagen mit dem zu überprüfenden Automatisierungssystem verbunden wird. Das Verhalten der einzelnen Anlagenkomponenten wird in der Simulation mit Kennlinienmodellen beschrieben. Diese werden mit Hilfe vom Hersteller vorgegebenen oder direkt an der betreffenden Komponente gemessenen Betriebspunkten parametrisiert. Die entwickelte Methode wird schließlich in einem Anwendungsbeispiel auf das Automatisierungssystem einer realen, im Betrieb befindlichen Anlage angewandt.

Abstract

A method is presented for the testing of automation functions within HVAC systems independent from the installation status at the building. With this method it is possible to take the commissioning of these functions out of the otherwise fixed sequence of construction and installation processes. Commissioning procedures are developed based on a fundamental analysis of the testing of automation functions as well as on practical needs. The procedures are applied within a specific emulation testbench for HVAC automation systems. The test bench serves as a virtual test environment. Within the emulator a simulation is connected to the automation system which has to be commissioned. This simulation model describes the operating behavior of all HVAC systems which are in reality controlled by the considered automation system. The behavior of the single HVAC components is described within the simulation by using characteristic curve models. The parameters of these models are either given by the manufactures or determined on the basis of measurements taken at the regarding component. Finally the presented method is applied to the automation system of real HVAC system which is already in operation.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Literaturübersicht	3
2.1	Allgemeines	3
2.2	Gebäudeautomatisierung	3
2.3	Betriebssimulation heiz- und raumluftechnischer Anlagen	5
2.4	Emulatoren als Testumgebung in der Heiz- und Raumluftechnik	6
3	Praxis der Inbetriebnahme von Automatisierungssystemen	8
3.1	Allgemeines	8
3.2	Inbetriebnahme der Klimaanlage eines Hallenbads	8
3.2.1	Beschreibung des Projekts	8
3.2.2	Ablauf	9
3.2.3	Beobachtungen bei der Inbetriebnahme	9
3.3	Fachtechnische Abnahme der Gebäudeleittechnik einer großen Liegenschaft	10
3.3.1	Beschreibung des Projekts	10
3.3.2	Ablauf	10
3.3.3	Beobachtungen während der fachtechnischen Abnahme	12
3.4	Anforderungen für InbetriebnahmeprozEDUREN	12
4	Verfahren zur Überprüfung von Automatisierungsfunktionen	14
4.1	Ausgangssituation	14
4.2	Basis für die Entwicklung von Testprozeduren	15
4.2.1	Bestehende virtuelle Testumgebung	15
4.2.2	Lebenszyklusansatz für die Betriebssimulation	16
4.3	Testprozeduren für Automatisierungsfunktionen	18
4.3.1	Grundlegender Aufbau der Testprozeduren	18
4.3.2	Vorbereitungsphase der Testprozeduren	21
4.3.3	Testphase im Open-Loop-Modus	21
4.3.4	Testphase im Closed-Loop-Modus	23
4.4	Anforderungen an die virtuelle Testumgebung und die Betriebssimulation	25
4.4.1	Vorgehensweise beim Ermitteln der Anforderungen	25
4.4.2	Anforderungen an die virtuelle Testumgebung	25
4.4.3	Anpassungen in der Betriebssimulation	26

5	Emulator für die Inbetriebnahme von Automatisierungssystemen	30
5.1	Voraussetzungen	30
5.2	Grundlegende Struktur und Aufbau	31
5.2.1	Prinzipieller Aufbau von Emulatoren	31
5.2.2	Datenstruktur der Emulationsschnittstelle	32
5.3	Technische Umsetzung	34
5.3.1	Aufbau des Emulationsversuchsstands	34
5.3.2	Programmierung der Emulationsschnittstelle	38
6	Simulationsmodelle für die Emulation	47
6.1	Voraussetzungen	47
6.1.1	Modellanforderungen in der Emulation	47
6.1.2	Vorgehensweise bei der Modellierung	48
6.2	Hydraulische Modelle	50
6.2.1	Verteilsysteme	50
6.2.2	Strömungsmaschinen	56
6.3	Thermische Modelle	60
6.3.1	Wärmeübertrager	60
6.4	Zeitliche Modelle	66
6.4.1	Klappen	66
6.4.2	Stellglieder	67
6.4.3	Emulationsmodul	70
7	Anwendung in einer realen Anlage	73
7.1	Vorgehensweise	73
7.2	Beschreibung der Demonstrationsanlage	73
7.2.1	Aufbau und Nutzung des Gebäudes	73
7.2.2	Raumlufttechnische Anlage	75
7.2.3	Installiertes Automatisierungssystem	76
7.3	Ergebnisse der Anwendung der Testprozeduren	78
7.3.1	Anfahrverhalten des Automatisierungssystems	78
7.3.2	Vergleich der Lufterwärmerregelungen	81
7.3.3	Auslösen eines Frostschutzalarms	84
7.3.4	Schaltsequenz der Komponenten bei der Zulufttemperaturregelung .	87
7.3.5	Überprüfen einer Ventilatorregelung	90
8	Zusammenfassung	93
	Literaturverzeichnis	95
	Anhang	99

Verzeichnis der verwendeten Formelzeichen und Abkürzungen

Formelzeichen	Bedeutung	Einheit
A	Fläche	m^2
\overline{A}	Matrix mit Widerstandskoeffizienten	—
B	Konstante	—
c	Polynomkoeffizient	—
C	Konstante	—
D	Konstante	—
c_p	spezifische Wärmekapazität	$J/(kgK)$
d	Polynomkoeffizient	—
d_h	hydraulischer Durchmesser	m
F^*	Formkoeffizient	m
g	Fallbeschleunigung	m^2/s
H	Ventil- oder Klappenstellung	—
k_v	Volumenstrom bei $10^5 Pa$	m^3/h
k	Wärmedurchgangskoeffizient	$W/(m^2K)$
M	Messdatenkanal	—
\dot{m}	Massenstrom	kg/h
n	Drehzahl	—
n	Exponent	—
p	Druck	Pa
\vec{p}	Druckvektor	—
\dot{Q}	Wärmestrom	W
R	Strömungswiderstand	Pa
R^*	Strömungswiderstand bei Linearisierung	Pa
S	Simulationsdatenkanal	—
T	Zeit	s
t	Zeit	s
\dot{V}	Luftvolumenstrom	m^3/h
\vec{V}	Volumenstromvektor	—
W	Wärmekapazitätsstrom	W/K
w	Geschwindigkeit	m/s
x	absoluter Feuchtegehalt	g/kg
Δt	Simulationszeitschrittweite	s
α	Wärmeübergangskoeffizient	$W/(m^2K)$
Δ	Differenz	—
η	Wirkungsgrad	—
ζ	Widerstandszahl	—
λ	Wärmeleitfähigkeit	$W/(mK)$
λ	Reibungszahl	—
ρ	Dichte	kg/m^3
ϑ	Temperatur	$^{\circ}C$

Index	Bedeutung
0	Referenzpunkt oder -wert
<i>AP</i>	Arbeitspunkt
<i>aus</i>	Austritt
<i>ein</i>	Eintritt
<i>el</i>	Element
<i>komp</i>	Komponente
<i>ström</i>	Strömungsmaschine
<i>gem</i>	gemessen
<i>geo</i>	geometrische Höhe
<i>gg</i>	Gegenstrom
<i>gl</i>	Gleichstrom
<i>grav</i>	Gravitation (Schwerkrafteinfluss)
<i>i</i>	Zählervariable
<i>k</i>	Zählervariable
<i>L</i>	Luft
<i>li</i>	links
<i>m</i>	mittlerer Wert
<i>max</i>	maximal
<i>min</i>	minimal
<i>re</i>	rechts
<i>sim</i>	Simulation
<i>var</i>	variabel
<i>W</i>	Wasser

Abkürzung	Bedeutung
<i>A1</i>	Anlage 1
<i>A2</i>	Anlage 2
<i>MEAS</i>	Messwerterfassungs- und -ausgabesystem
<i>DDC</i>	Direct Digital Control
<i>GLT</i>	Gebäudeleittechnik
<i>RLT</i>	Raumluftechnik

1 Einleitung

Im Planungs- und Bauprozess eines Gebäudes sind, sobald dieses fertiggestellt ist und die zugehörigen technischen Anlagen montiert sind, vom Anlagenersteller noch zwei Aufgaben zu erfüllen. Die eine Aufgabe umfasst die Inbetriebnahme der gebäudetechnischen Anlagen und das Beheben von Mängeln, die dabei gegebenenfalls zu Tage treten. Bei der anderen Aufgabe muss der Anlagenersteller dem Auftraggeber oder seinen Vertretern (z.B. den zuständigen Planungsingenieuren) demonstrieren, dass die gebaute Anlage in ihren Funktionen und ihrem Aufbau den im Auftrag gestellten Anforderungen entspricht.

Für die beiden genannten Aufgaben „Inbetriebnahme“ und „Abnahme“ muss – allein, um den in der HOAI (Honorarverordnung für Architekten und Ingenieure [1]) gestellten Forderungen zu entsprechen – im Zeitplan, der zu Beginn eines jeden Bauvorhabens erstellt wird, eine ausreichende Zeitspanne einkalkuliert werden. Da bei der Auftragsvergabe in der Regel ein fester Übergabetermin vereinbart wird, verkürzt sich diese ohnehin aus Zeit- und Kostengründen sehr knapp gehaltene Zeitspanne in den meisten Bauvorhaben aufgrund von Verzögerungen in den vorgelagerten Phasen des Bauprozesses häufig auf ein Minimum. Diese Verzögerungen können verschiedene Ursachen wie beispielsweise Änderungen am ursprünglichen Konzept, Lieferschwierigkeiten, Ausführungsverzögerungen oder auch technische Schwierigkeiten bei der Ausführung haben. Die Folge ist, dass für die Inbetriebnahme zu wenig Zeit zur Verfügung steht und infolgedessen häufig nur offensichtliche Mängel beseitigt werden.

Fehler, die die äußerlich wahrnehmbare Funktion der Gesamtanlage nicht direkt beeinträchtigen, aber beispielsweise den Energieverbrauch oder die Reaktionsfähigkeit der Anlage negativ beeinflussen, können bei einer solchen „rudimentären“ Inbetriebnahme nicht gefunden werden. Das Resultat dieser Problematik ist, dass die meisten heiz- und raumluftechnischen Anlagen von Beginn an letztlich nicht den Planungsanforderungen entsprechen und deshalb nicht optimal betrieben werden [2, 3].

Bei den Automatisierungsfunktionen, die dazu dienen, die technischen Anlagen eines Gebäudes in einer energetisch und wirtschaftlich optimalen Weise zu steuern und zu regeln, wird die beschriebene Problematik bei der Inbetriebnahme und Abnahme nochmals verschärft. Der Grund hierfür liegt in der durch den Ablauf des Bauprozesses fix vorgegebenen zeitlichen Einordnung der Inbetriebnahme der Automatisierungsfunktionen.

Diese Funktionen beinhalten häufig eine Rückkopplung zu den zu steuernden oder regelnden Teilanlagen bzw. -systemen. Deshalb kann ein Gebäudeleitsystem (GLT-System),

in dem diese Funktionen umgesetzt sind, erst nach der Inbetriebnahme aller Anlagen, mit denen die Gebäudeautomatisierung interagiert, überprüft werden. So kann beispielsweise die vergleichsweise einfache Funktion eines einfachen Thermostatventils auch erst dann überprüft werden, wenn sowohl der zugehörige Heizkessel als auch das versorgende Heizungsnetz inbetriebgenommen sind und richtig funktionieren. Aus der vorgegebenen zeitlichen Abfolge ergibt sich ein umso höherer zeitlicher Druck bei der Inbetriebnahme von Automatisierungsfunktionen.

In der Praxis können die Automatisierungsfunktionen derzeit nur unter den bei Inbetriebnahme und Abnahme herrschenden Betriebszuständen getestet werden. Regel- und Steuerfunktionen, die unter davon abweichenden Bedingungen wie extreme Innenlasten oder Außentemperaturen greifen, können und werden somit nicht untersucht.

Die Folge hiervon ist, dass die meisten Anlagen trotz der durch die moderne Technik gegebenen Möglichkeiten nicht in ihrem Optimum betrieben werden.

Ziel dieser Arbeit ist es, ein Verfahren zu entwickeln, mit dem die korrekte Arbeitsweise der Automatisierungsfunktionen eines Gebäudes unabhängig vom Stand der Arbeiten an den übrigen heiz- und raumluftechnischen Systemen sowie unter beliebigen Lastsituationen überprüft werden kann.

Zunächst wird in einem ersten Schritt auf der Grundlage von in der Praxis ermittelten Anforderungen eine generelle Vorgehensweise für die optimale Inbetriebnahme von Automatisierungsfunktionen ermittelt. In einem zweiten Schritt wird eine Testumgebung entwickelt, in der die Automatisierungsfunktionen mit Hilfe der Emulation entsprechend der definierten Vorgehensweise überprüft werden können. Die für die Emulation benötigten Simulationsmodelle werden in einem weiteren Arbeitsschritt entwickelt. Vorgehensweise und Testumgebung werden schließlich in einem abschließenden Arbeitsschritt auf eine Beispielanlage angewandt.

2 Literaturübersicht

2.1 Allgemeines

Um die Inbetriebnahme und Abnahme von Gebäudeautomatisierungsfunktionen aus dem bestehenden zeitlichen Korsett herausnehmen zu können, werden in dieser Arbeit eine Emulationsumgebung sowie die dazugehörigen Simulationsmodelle neu- bzw. weiterentwickelt. Aus diesem Grund wird – neben der Übersicht zu Arbeiten sowie zu bestehende Richtlinien und Vorschriften bezüglich der Überprüfung von Automatisierungsfunktionen in Gebäuden – auch ein Überblick über den Stand der Arbeiten auf den Gebieten der thermischen und energetischen Simulation von Gebäuden und klimatechnischen Anlagen und der Emulation in der Heiz- und Raumlufttechnik gegeben.

2.2 Gebäudeautomatisierung

Digitale Automatisierungssysteme für die Regelung und Steuerung von heiz- und raumlufttechnischen Anlagen wurden erstmals in den 80er Jahren des letzten Jahrhunderts eingesetzt. Heute haben die digitalen Regelungssysteme die bis dahin verwendete analoge Regeltechnik nahezu vollständig verdrängt. Die meisten Arbeiten zum Thema der „digitalen Gebäudeautomatisierung“ beinhalten vor allem die grundlegende Entwicklung von Automatisierungsfunktionen und Regelungsstrategien. Des Weiteren werden die wirtschaftlichen und energetischen Einspar- und Optimierungspotentiale, die sich durch den Einsatz der digitalen Regelungssysteme und den darin implementierten Automatisierungsfunktionen ergeben, untersucht. Bei Arbeiten, in denen einzelne Automatisierungsfunktionen und Regelstrategien detaillierter untersucht werden, steht meist der Vergleich und die Bewertung verschiedener Funktionen und Algorithmen im Vordergrund.

So untersuchen May und Park verschiedene Algorithmen für Energiemanagement und Regelungssysteme mit Hilfe eines Simulations- und Emulationsprogramms [4]. Bork und Linzenkirchner verwenden ein Gebäudemodell, um Automatisierungskonzepte für heiz- und raumlufttechnische Anlagen zu entwickeln und zu erproben [5]. Weitere Ansätze für die Untersuchung und den Vergleich von Building-Energy-Management-Systemen (BEMS) und den darin enthaltenen Regelstrategien werden von verschiedenen Institutionen innerhalb des Annex 17 der Internationalen Energieagentur IEA entwickelt [6]. Im Rahmen dieses Annex untersuchen und bewerten Haves und Dexter BEMS-Regelstrategien mit Hilfe der Emulation [7]. Ebenfalls in diesem Zusammenhang stellen Bach et al. eine virtuelle

Testumgebung für die Untersuchung von Building-Energy-Management-Systemen vor [8]. Diese Testumgebung wird von Bacher dazu genutzt, um verschiedene BEMS-Funktionen in Bezug auf ihr thermisches Verhalten sowie ihren Energiebedarf miteinander zu vergleichen [9].

Die Überprüfung, ob die Automatisierungsfunktionen in konkreten realen Gebäuden den Planungsvorgaben entsprechend korrekt umgesetzt werden, spielt bei den genannten Arbeiten keine Rolle. Es wird vielmehr immer von der idealisierten Annahme einer planungsgetreuen Umgebung ausgegangen. Arbeiten zu Abweichungen zwischen Planung und Ausführung sowie den daraus entstehenden Folgen sind nicht bekannt. Um die Ausgangslage für die vorliegende Arbeit zu verdeutlichen, wird deshalb im Folgenden auf die Situation hinsichtlich der Vorgaben aus den derzeit in Deutschland und der Europäischen Union gültigen Verordnungen, Vorschriften und Richtlinien für die Überprüfung von Automatisierungsfunktionen in gebäudetechnischen Anlagen eingegangen.

Im Rahmen der Konzepterstellung werden die in gebäudetechnischen Anlagen zu implementierenden Automatisierungsfunktionen auf der Basis der VDI-Richtlinie 3184 „Gebäudeleittechnik“, Blatt 1-4 [10] definiert. Diese Richtlinie enthält Beschreibungen von regel- und steuerungstechnischen Funktionen. Die daraus entwickelten Konzepte werden nach einer Ausschreibung von einem Regelungshersteller in ein GLT-System umgesetzt und in der Anlage installiert. Ob die umgesetzten Automatisierungsfunktionen den Anforderungen der Planung entsprechen, wird in der Regel während der Inbetriebnahme bzw. der Abnahme der gesamten heiz- und raumluftechnischen Anlage untersucht.

In Bezug auf die Abnahme wird in der DIN 18379 „Allgemeine Technische Vertragsbedingungen für Bauleistungen: Raumluftechnische Anlagen“ [11], die als Teil der Verdingungsordnung für Bauleistungen (VOB) [12] die „technischen Vertragsbedingungen für Bauleistungen“ im Hinblick auf Raumluftechnische Anlagen regelt, auf die VDI-Richtlinie 2079 „Abnahmeprüfung an Raumluftechnischen Anlagen“ [13] verwiesen. Die heute üblicherweise in RLT-Anlagen eingesetzten digitalen Regelungssysteme werden – trotz ihrer gegenüber der alten Analogtechnik erweiterten Möglichkeiten und damit auch deutlich größeren Komplexität – in der VOB nicht gesondert als Anlagen aufgeführt.

In der VDI-Richtlinie 2079, in der die allgemeine Abnahmeprüfung von Raumluftechnischen Anlagen beschrieben ist, werden die in den digitalen Regelungssystemen einzusetzenden Automatisierungsfunktionen nicht gesondert aufgeführt. Für deren Abnahme werden lediglich stichprobenartige Funktionsprüfungen, deren „Anzahl und Ort ... zwischen dem Auftraggeber und Auftragnehmer vor Beginn der Funktionsprüfung zu vereinbaren“ ist, vorgeschrieben. Die Konsequenz daraus ist, dass nur Funktionen der DDC-Anlage überprüft werden, die unter den bei der Abnahme herrschenden Randbedingungen (innere Lasten, Wetter) zur Anwendung kommen und die vorab von den Projektpartnern vereinbart wurden.

Auch in der Norm DIN EN 12599 [14], die die Überprüfung und Abnahme von Raumluftechnischen Anlagen auf europäischer Ebene regelt und die im Wesentlichen auf der VDI-Richtlinie 2079 basiert, wird nur eine „stichprobenartige Prüfung der automatischen

Regelfunktionen und Verriegelungen in den verschiedenen Betriebszuständen bei unterschiedlichen Sollwerten“ gefordert.

Für eine Überprüfung, die sicherstellt, dass alle in der Planung geforderten Automatisierungsfunktionen in den ausgeführten digitalen Gebäudeleitsystemen umgesetzt sind und den Anforderungen entsprechend funktionieren, gibt es somit weder genaue Vorschriften noch werden für die Inbetriebnahmepraxis geeignete Testmethoden zur Verfügung gestellt.

2.3 Betriebssimulation heiz- und raumluftechnischer Anlagen

Simulationsprogramme, mit denen physikalische Vorgänge in Gebäuden und Anlagen rechnerisch abgebildet werden können, werden im Bereich der Heiz- und Raumluftechnik seit über 30 Jahren eingesetzt. Während mit den Ansätzen, auf denen die ersten dieser Programme basieren (Rouvel [15], Stephenson [16], Knabe [17]), ausschließlich das thermisch-dynamischen Verhalten von Gebäuden berechnet wird, werden in der Folgezeit auch Programme entwickelt, die es erlauben, in gekoppelter Weise das Verhalten von heiz- und raumluftechnischen Anlagen mit abzubilden. So beschreibt z.B. Jahn [18] die Einbindung von Heiz- bzw. Kühlflächen in ein Raummodell.

Bach und Claus [19] beschreiben ein modular aufgebautes Simulationsprogramm für die Berechnung von Heiznetzen und Anlagen zur Wärmeerzeugung. Dieses Programm wird von Ast [20] erweitert, um das Verhalten von Raumheizflächen in Verbindung mit Thermostatventilen abbilden zu können. Aufbauend auf diesen Arbeiten entwickelt Stephan [21] das modular aufgebaute Programm GERALT, mit dem das Verhalten von raumluftechnischen Anlagen einschließlich der Wärme- und Kälteerzeugung sowie der regelungstechnischen Komponenten berechnet wird. Lebrun und Strengart [22] erweitern das an der University of Wisconsin für die Simulation von solaren Wärmeerzeugungssystemen entwickelte Simulationspaket TRNSYS [23] für die Berechnung von Warmwasserheizanlagen.

Den Arbeiten von Ast, Stephan und Lebrun liegen Erkenntnisse zugrunde, die im Rahmen der IEA-Arbeitskreise „IEA-Annex 10: System Simulation“ [24] und „IEA-Annex 17: Building Energy Management Systems“ [6] erarbeitet wurden. In diesen Arbeitskreisen werden Rechenmodelle für alle wichtigen Komponenten der Heiz- und Raumluftechnik entwickelt. Die Modelle, die auf Gleichungen basieren, mit denen das thermische Verhalten der Anlagenkomponenten beschrieben wird, werden durch Vergleiche mit Labormessergebnissen sowie Vergleichsrechnungen überprüft. Weitere Komponentenmodelle, die in modularen Simulationsprogrammen verwendet werden können, werden in den „Primary and Secondary Toolkits“ von ASHRAE [25, 26] vorgestellt.

Die beschriebenen Simulationsmodelle werden im Wesentlichen für den Konzeptentwurf eingesetzt. Das energetische Verhalten von Gebäuden und Anlagen wird dabei mit Hilfe von Stoff- und Energiebilanzen an den einzelnen Komponenten beschrieben. Im Hinblick

auf die für den Konzeptentwurf erforderliche Abbildungsqualität und -tiefe werden in diesen Modellen Details, wie die sich in einer Anlage einstellenden hydraulischen Verhältnisse oder das Zeitverhalten der einzelnen Komponenten, nicht oder nur stark vereinfacht berücksichtigt. Bei einer Betriebssimulation, die für die Inbetriebnahme und die fachtechnische Abnahme genutzt werden soll, sind jedoch solche Details von wesentlichem Interesse. In Bezug auf die Detaillierung und die Anpassung von Simulationsmodellen an das reale Verhalten von Komponenten erweist sich auch die Tatsache als Nachteil, dass für verschiedene bisher entwickelte Modelle die Eingabe einer Vielzahl von Parametern erforderlich ist. Diese Parameter können zudem häufig in der Planungs- und Bauphase von Gebäuden und Anlagen nur schwer beschafft werden. Die Anzahl der Parameter für ein Modell lässt sich z.B. durch die Anwendung von Kennlinienmodellen oder von Modellen, die auf neuronalen Netzen basieren, reduziert werden [27].

In Neu- und Weiterentwicklungen im Bereich der Simulation wie die Simulationspaket HVACSIM+ [28] oder IDA [29] werden vor allem verbesserte Lösungsverfahren für nicht-lineare Differentialgleichungen umgesetzt. Mit diesen Verfahren können insbesondere instationäre Vorgänge besser und detaillierter abgebildet sowie die Rechenzeiten verkürzt werden.

2.4 Emulatoren als Testumgebung in der Heiz- und Raumluftechnik

Die Idee, Komponenten der Heiz- und Raumluftechnik in einer virtuellen Testumgebung, die auf einer Betriebssimulation beruht, zu testen, wird von May und Park erstmals 1983 in den USA umgesetzt [4] (siehe auch Kapitel 2.2). Diese ersten Emulatoren werden dazu verwendet, um Regelalgorithmen und Energiemanagementfunktionen von noch sehr einfachen DDC-Anlagen zu testen. Auf der Basis zweier Z-80-Prozessoren entwickeln Yan et al. [30] 1985 ebenfalls einen Emulator für RLT-Systeme. Mit diesen Emulatoren ist es jedoch aufgrund der beschränkt verfügbaren Rechenkapazität nicht möglich, ein genügend detailgetreues und realitätsnahes Simulationsmodell der Anlagen und Gebäude aufzubauen.

Ein Emulator, dem ein detailliertes Simulationsprogramm zugrunde liegt, wird erstmals 1986 von Novakovic [31] vorgestellt. Bork und Linzenkirchner [5] stellen 1988 einen Emulator zur Entwicklung und Erprobung von Automatisierungskonzepten für heiz- und raumluftechnische Anlagen vor. Der Simulationsteil dieses Emulators beinhaltet jedoch nur das Gebäude, jedoch nicht die zugehörige Anlage.

Im Rahmen des IEA-Vorhabens Annex 17 [6] werden in mehreren Ländern verschiedene Emulatoren entwickelt. In Finnland wird ein Emulator dazu verwendet, um den Einfluss der Parametereinstellungen bei einem digitalen Regler für eine Klimaanlage zu untersuchen [32]. An der University of Oxford [7], in den Niederlanden [33] sowie in Deutschland

[8] werden im Rahmen des IEA-Annex 17 ebenfalls Emulatoren für digitale Regelanlagen aufgebaut.

Die bisher entwickelten Emulatoren werden meist dazu verwendet, an Beispielanlagen unter Laborbedingungen verschiedene Betriebsszenarien nachzubilden und miteinander zu vergleichen. Diese Emulatoren, bei denen die einzelnen Funktionselemente meist starr miteinander verbunden sind, können in der Regel nur mit relativ großem Aufwand auf andere von den Laborbedingungen abweichenden Anlagen angepasst werden.

3 Praxis der Inbetriebnahme von Automatisierungssystemen

3.1 Allgemeines

Aus der Literaturübersicht in Kapitel 2.2 wird deutlich, dass kaum Richtlinien oder Vorschriften darüber existieren, wie Gebäudeautomatisierungsfunktionen während der Inbetriebnahme in der Praxis überprüft werden sollen. Zudem sind die bestehenden Richtlinien sehr allgemein gehalten. Die Qualität des Inbetriebnahme- und Abnahmevorgangs hängt somit in den meisten Fällen von der Erfahrung und dem Fachwissen der daran beteiligten Planungs- und Inbetriebnahmeingenieure ab.

Um die Anforderungen, die moderne Methoden zur Überprüfung der Automatisierungsfunktionen in der Praxis erfüllen müssen, herauszuarbeiten, werden beispielhaft Inbetriebnahme- und Abnahmeprozesse in der Praxis beobachtet, in Bezug auf ihre Mängel beurteilt und aus den daraus resultierenden Erkenntnissen Anforderungen für die Überprüfung der Funktionen abgeleitet. In diesem Zusammenhang werden innerhalb dieser Arbeit zwei Inbetriebnahmevorgänge im Zusammenhang mit der fachtechnischen Abnahme in der Praxis begleitet. Dies ist zum einen die Inbetriebnahme der gesamten Klimaanlage eines kleineren öffentlichen Hallenbads in Mannheim und zum anderen die Inbetriebnahme der Gebäudeleittechnik einer größeren Liegenschaft in Saarbrücken.

3.2 Inbetriebnahme der Klimaanlage eines Hallenbads

3.2.1 Beschreibung des Projekts

Im Rahmen des Projekts MOHWIS (Sanierung und Modernisierung eines Hallenbades [34]) der GBG Mannheim, einer Wohnungsbaugesellschaft, wird die bestehende Liegenschaft „Schwimmbad Waldhof-Ost“ renoviert, anlagentechnisch modernisiert und energetisch optimiert. Dazu werden die gesamte heiz- und raumluftechnischen Anlage sowie die zugehörigen Regelanlagen ausgetauscht. Die raumluftechnische Anlage, die als Außenluftanlage mit einem Kreislaufverbund-Wärmeübertragersystem zur Wärmerückgewinnung ausgeführt ist, hat auf ein Luftfördervolumen von $30.000 \text{ m}^3/\text{h}$. Bei der Inbetriebnahme der Anlage sind Vertreter des Bauherrn – dieser hat die Anlage selbst geplant – sowie der jeweiligen ausführenden Firmen (Klimaanlage, Heizanlage und Regelungssystem) anwesend.

3.2.2 Ablauf

Die fachtechnische Abnahme der Anlage wird auf der Grundlage der für die einzelnen Teilanlagen gültigen Normen und Richtlinien (z.B. bei den Heizanlagen nach VDI 3809 „Prüfung heiztechnischer Anlagen“ [35] oder bei Fernwärmeübergabestation nach DIN 4747 „Fernwärmeanlagen“ [36]) durchgeführt. Bei der Inbetriebnahme werden zunächst die Heizungsanlage und die Klimaanlage auf Vollständigkeit und Funktion geprüft. Hierbei werden in der Anlage stichprobenartig Wasser- und Lufttemperaturen gemessen. Ebenso wird kontrolliert, ob die Klimaanlage den geforderten Luftvolumenstrom erbringt, indem auf der Zuluftseite die Geschwindigkeitsverteilung im Luftkanal ermittelt wird.

Die Funktion der DDC-Regelgeräte wird getestet, indem stichprobenweise Sollwerte geändert werden und anschließend beobachtet wird, wie die Anlage auf diese Änderungen reagiert. Hierzu wird beispielsweise dem Sollwert der Austrittstemperatur des Trinkwassererwärmers ein Sprung von 60° auf 65° C aufgeprägt. Anschließend wird beobachtet, wie sich der gemessene Wert der Austrittstemperatur über der Zeit verändert. Energie-managementfunktionen oder Parametereinstellungen von Einzelreglern des installierten DDC-Systems werden nicht getestet.

Im Verlauf der fachtechnischen Abnahme erklärt der zuständige Regelungstechniker, dass bei der Programmierung des DDC-Steuer- bzw. Regelgeräts meist auf Standardwerte für die Automatisierungsfunktionen, die in den allermeisten Fällen ausreichen, zurückgegriffen wird. Diese Werte werden nach der Inbetriebnahme nur verändert, wenn größere Störungen auftreten. Um die Parameter im Sinne einer „Einregulierung der Regelanlage“ an die Anlage anzupassen, ist eine detaillierte Untersuchung des dynamischen Verhaltens der Anlage erforderlich. Solche Untersuchungen werden jedoch in der Regel nicht durchgeführt, da sie sehr zeit- und kostenaufwendig sind.

3.2.3 Beobachtungen bei der Inbetriebnahme

Aus der Inbetriebnahme dieser Anlage lassen sich nur bedingt Anforderungen für die zu entwickelten Prozeduren ableiten. Dies liegt vor allem daran, dass die Verantwortung für die Planung, die Bauaufsicht sowie für den späteren Betrieb der Anlage komplett beim Bauherrn liegt. Dieser überwacht und kontrolliert im eigenen Interesse die Umsetzung der Planungsziele während der ganzen Bauphase, so dass bereits während der Bauphase der Anlage die meisten Mängel beseitigt werden. Die fachtechnische Abnahme und Inbetriebnahme findet gewissermaßen fortlaufend statt, mit der Folge, dass während der Inbetriebnahme nur noch kleinere Mängel und Probleme auftreten.

Auf das digitale Regelungssystem wird bei diesem Inbetriebnahmeprozess nur kurz eingegangen. Obwohl es Ziel der Planung ist, einen energetisch optimierten Betrieb zu ermöglichen, werden die Automatisierungsfunktionen nur sehr oberflächlich überprüft. Nach Aussage des Regelungstechnikers werden die Parameter nur dann angepasst, wenn während des Betriebs Beschwerden auftreten. Das bedeutet jedoch, dass trotz des Planungsziels „optimierter Betrieb“ meist keine planerischen Vorgaben diesbezüglich gemacht werden.

Die Folge hiervon ist, dass häufig keine projektbezogenen Einstellungen an den Regelungsfunktionen vorgenommen werden. Somit werden die Parameter von Automatisierungsfunktionen – wenn überhaupt – nur „lückenhaft“ an die jeweilige Anlage angepasst. Eine Optimierung im eigentlichen Sinn findet im Prinzip nicht statt.

Das digitale Regelungssystem der betrachteten Anlage wird nur unter den bei der Inbetriebnahme zufällig herrschenden Lastbedingungen betrachtet. Dabei fehlen die Innenlasten des Gebäudes vollständig, da das Hallenbad zum Zeitpunkt der Inbetriebnahme noch nicht im Betrieb ist. Eine spätere nochmalige Überprüfung, wenn z.B. extreme Wetterbedingungen vorliegen, findet aus Zeit- und Kostengründen nicht statt.

3.3 Fachtechnische Abnahme der Gebäudeleittechnik einer großen Liegenschaft

3.3.1 Beschreibung des Projekts

Bei diesem Projekt werden die raumluftechnischen Anlagen verschiedener Gebäude auf dem Campus der Universität Saarbrücken saniert. Im Zuge der Sanierung werden auch neue DDC-Regelsysteme für die betreffenden Anlagen installiert. Eine wesentliche Maßgabe bei der Konzeption der Regelsysteme ist, dass diese einen energieeffizienten Betrieb ermöglichen. So werden bei den raumluftechnischen Anlagen Systeme eingebaut, die die Zuluft in Abhängigkeit des CO₂-Gehalts der Abluft regeln. Des Weiteren wird an alle lokalen Anlagenregelungen die Anforderung gestellt, dass sie vom Betriebsdienst der Universität Saarbrücken über einen zentralen Leitrechner bedient werden können. Mit Hilfe von konfigurierbaren Zeitschaltprogrammen soll so insbesondere in den Hörsälen ein an die jeweilige Belegung angepasster Betrieb gewährleistet werden. Diese Anforderungen werden durch verschiedene DDC-Regelsysteme sowie durch ein Gebäudemanagementsystem, das auf einem Leitrechner installiert ist, umgesetzt.

Bei der Inbetriebnahme im Sinne einer fachtechnischen Abnahme werden die Vollständigkeit und die Funktion der DDC-Regelungen der einzelnen Anlagen, die dazugehörigen Schaltschränke sowie der übergeordnete Leitrechner untersucht. Bei der Inbetriebnahme sind neben dem zuständigen Planungsingenieur zwei Mitarbeiter der ausführenden Regelungsfirma – ein Inbetriebnahmeingenieur und ein Techniker – anwesend. Zwei Mitarbeiter des technischen Betriebsdienstes der Universität Saarbrücken, die später für den Betrieb der GLT zuständig sind, beteiligen sich ebenfalls an der Inbetriebnahme.

3.3.2 Ablauf

Zu Beginn wird der Ablauf und die Vorgehensweise zwischen den beteiligten Projektpartnern abgestimmt. Die Grundlage hierfür bildet das vom Planungsingenieur erstellte Leistungsverzeichnis. Der Ablauf wird von den Beteiligten in die folgende Schritte aufgeteilt:

1. Sichten der Revisionsunterlagen.
2. Überprüfen des Gebäudeleittechniksystems auf Vollständigkeit und Bedienbarkeit.
3. Kontrolle der DDC-Unterstation (Formalbeschriftung, Aufbau).
4. Testen von Automatisierungsfunktionen der GLT (Brandschutzklappen, Frostschutz, Optimierungsfunktionen, Trendprotokolle, etc.).

Im ersten Schritt werden die Revisionsunterlagen gesichtet. Dabei werden die installierten Geräte und Anlagen mit dem ausgeschriebenen Leistungsverzeichnis verglichen und auf Vollständigkeit geprüft. Die Adressierung und die Bezeichnungen der Datenpunkte werden stichprobenartig kontrolliert. Das Vorhandensein von Sicherheitskopien der Regelprogramme wird ebenfalls nachgeprüft. Als nächstes folgt eine Vollständigkeitsprüfung der Gebäudeleittechnik anhand der Ausschreibung. Dabei werden die einzelnen Positionen durchgegangen. Anschließend erläutert ein Mitarbeiter der ausführenden Firma kurz die Funktionsweise des Gebäudeleittechniksystems. Der Planungsingenieur vergleicht Bedienbarkeit und logischen Aufbau des Gesamtsystems mit den im Leistungsverzeichnis festgelegten Anforderungen. Stichprobenartig werden verschiedene Ansichten der Bedienoberfläche aufgerufen. Die Ansicht des Störmeldefensters, die Möglichkeiten zur Parametrierung der Heizkurve sowie die programmierten Zeitpläne werden geprüft. Bei diesen Kontrollen, die zum Teil mit einfachen Plausibilitätstests durchgeführt werden, wird festgestellt, dass in einem der Hörsäle die Ablufttemperatur unter der zugehörigen Raum- bzw. Zulufttemperatur liegt. Die Ursache hierfür ist von der auszuführenden Firma zu klären und zu beseitigen. Zudem wird festgestellt, dass die sogenannte E_{max} -Funktion, mit der der Stromverbrauch der Gesamtanlage auf einen Maximalwert begrenzt wird, noch nicht verwirklicht ist, da bisher nicht geklärt ist, welche Anlagen in diese Funktion integriert werden sollen. Ein Bedienhandbuch für die GLT- und DDC-Automatisierungsstationen ist ebenfalls nicht vorhanden, wird aber nachgeliefert. Anschließend werden die voreingestellten Sollwerte für die Regelung kontrolliert. Bei der stichprobenartigen Kontrolle der Meldesignale aus der Regelanlage stellt der Planungsingenieur fest, dass bei einem Filter keine Alarm-, sondern eine Wartungsmeldung angezeigt werden muss. In Bezug auf die Feldfunktionen weist der Planungsingenieur darauf hin, dass laut Leistungsverzeichnis ein Betriebsnachweis durch Trendprotokolle über einen 14-tägigen Probebetrieb zu erbringen ist.

Nach dem Abschluss der Funktionsprüfung der Programmierung werden im dritten Schritt der fachtechnischen Abnahme die zugehörigen Anlagen im Feld überprüft. Hierzu fordert der Planungsingenieur den Inbetriebnahmeingenieur der ausführenden Firma auf, ihm eine Einweisung in die jeweiligen Schaltschränke zu geben. Es schließt sich eine Sicht- und Vollständigkeitsprüfung an. Dabei werden die Beschriftungen einzelner Datenpunkte durchgegangen. Die ausführende Firma muss zeigen, dass bestimmte Funktionen mit einem Handbediengerät direkt vor Ort möglich ist. Die Anzeige der Notbedienebene wird ebenfalls kontrolliert.

Abschließend werden Automatisierungsfunktionen wie z.B., ob und wie die Regelungsanlage nach einem völligen Stromausfall wieder in Betrieb geht, getestet. Für diesen letzten

Schritt der fachtechnischen Abnahme bleibt ein Mitarbeiter der ausführenden Firma direkt vor Ort bei den Anlagen. Er erhält vom Planungs- und vom Inbetriebnahmeingenieur vom Leitrechner aus über Funk Anweisungen, bestimmte Vorgänge in der Anlage von Hand zu simulieren, damit die Regel- und Sicherheitsfunktionen der DDC-Anlagen überprüft werden können. So werden bei einzelnen Anlagen die Frostschutzwächter, mit denen ein Einfrieren der Wärmeübertrager vermieden werden soll, mit Hilfe von Eisspray ausgelöst. Dabei beobachtet der Planungsingenieur die Reaktionen in der Anlage bzw. der Regelung auf dem Bildschirm des Leitrechners ebenso wie die Ausgabe in den Störmeldeprotokollen. Bei einem weiteren Test wird eine Brandschutzklappe manuell ausgelöst sowie ein Reparaturschalter betätigt. Um zu testen, ob das Alarmsignal des Keilriemenwächters auslöst, wird der zugehörige Sensor in der Anlage von der Spannungsversorgung abgeklemmt. Der Sicherheitstemperaturwächter, mit dem eine Überhitzung der betreffenden Anlage vermieden werden soll, wird ausgelöst, indem das Erwärmerventil manuell auf 100 % geöffnet wird. Als Folge dessen übersteigt die Lufttemperatur in der Anlage den vorgegebenen Grenzwert und die Schutzfunktion im Regelungssystem löst aus.

3.3.3 Beobachtungen während der fachtechnischen Abnahme

Bei der in Saarbrücken begleiteten fachtechnischen Abnahme werden die Regelanlagen sowie die Gebäudeleittechnik einer verteilten Liegenschaft betrachtet. Die Vorgehensweise hierbei ist sehr strukturiert. Auffällig ist der personelle und auch der logistische Aufwand, der notwendig ist, um einzelne Automatisierungsfunktionen des digitalen Regelungssystems zu kontrollieren. So müssen für die Tests von Warn- und Alarmmeldungen stets zwei Mitarbeiter der ausführenden Regelungsfirma anwesend sein. Ein Mitarbeiter löst die Warnsignale direkt in der Anlage aus, während der zweite die Funktionen am Leitrechner oder an den DDC-Systemen vorführt. Diese Vorgehensweise ist sehr zeit- und personalaufwendig. Deshalb werden vor allem aus wirtschaftlichen Gründen nicht alle Alarm- und Warnfunktionen des komplexen GLT-Systems überprüft.

Die in der Regelung implementierten Funktionen für das Energiemanagement werden bei der Inbetriebnahme nur am Rande betrachtet. Eine vollständiger Test dieser Funktionen ist nicht möglich, da das Regelverhalten nur unter den zum Zeitpunkt der fachtechnischen Abnahme herrschenden Lastbedingungen untersucht werden kann. Hier wäre eine „zeitlich verteilte“ Inbetriebnahme notwendig. Das heißt, die Anlage müsste mindestens noch einmal überprüft werden, wenn sie unter erschwerten Lastbedingungen bezüglich Wetter und inneren Lasten arbeitet.

3.4 Anforderungen für InbetriebnahmeprozEDUREN

Heiz- und raumluftechnische Anlagen werden heute in der Regel unter einem immensen Zeit und Kostendruck geplant, installiert und in Betrieb genommen. Dies hat zur Folge, dass die Anlagen meist nur oberflächlich auf einen möglichst geringen Energieaufwand hin

optimiert werden, obwohl dies bei den meisten Anlagen zu Beginn der Planung als eine der Hauptanforderungen definiert wird. Die Teilnahme an den beiden geschilderten Inbetriebnahmevorgängen zeigt, dass aufgrund des Zeitdrucks im gesamten Erstellungsprozesses von Gebäuden und Anlagen zu wenig Zeit für die Inbetrieb- und Abnahmephase – diese Phase sollte eigentlich sicherstellen, dass die Anlagen letztlich energetisch optimiert betrieben werden – zur Verfügung steht. In Bezug auf den Kostendruck fällt der personelle und logistische Aufwand auf, der notwendig ist, um während der Inbetriebnahme von Regelungsanlagen einzelne Sicherheits- oder Energiemanagementfunktionen zu überprüfen. Dies hat zur Folge, dass die verschiedenen Funktionen von digitalen Regelungssystemen nur stichprobenartig getestet werden.

Bei den in der Praxis gemachten Beobachtungen zeigt sich, dass eines der Hauptziele bei der Entwicklung eines Verfahrens zur Überprüfung von Automatisierungsfunktionen sein muss, den personellen und den zeitlichen Aufwand für die Überprüfung von einzelnen Funktionen zu minimieren. Nur dadurch ist bei der Inbetriebnahme und Abnahme eine umfassende Kontrolle aller in digitalen Regelanlagen implementierten Funktionen anstatt der bisherigen stichprobenartigen Prüfung einzelner Funktionen realisierbar.

Eine weitere Anforderung, die sich aus der Praxis für InbetriebnahmeprozEDUREN ergibt, ist eine einfache und effektive Möglichkeit zur Überprüfung der Alarm- und Sicherheitsfunktionen, die in den digitalen Regelanlagen implementiert sind. Um einen ganzjährig optimierten Betrieb zu gewährleisten, sollten Regelanlagen in einer Umgebung inbetriebgenommen werden, in der verschiedene Randbedingungen wie z.B. Wetter und innere Lasten eingestellt werden können. Das heißt, die Inbetriebnahme von Automatisierungsfunktionen muss unabhängig von den gerade herrschenden Wetter- und Lastbedingungen durchführbar sein. Des Weiteren sollten die Randbedingungen, unter denen eine Inbetriebnahme und Abnahme durchgeführt wird, reproduzierbar sein. Dadurch wird zum einen erreicht, dass der gesamte Prozess der Inbetriebnahme und Abnahme überprüfbar und nachvollziehbar wird. Zum anderen können eventuell erforderliche Nachbesserungen oder Mängelbeseitigungen besser kontrolliert werden.

Die Anforderungen, die sich aus den Beobachtungen in der Praxis für ein Verfahren zur Überprüfung von Automatisierungsfunktionen ergeben, sind im Folgenden zusammengefasst:

- Minimierung des zeitlichen und personellen Aufwands bei der Inbetrieb- und Abnahme,
- einfacher Test von wichtigen Sicherheits- und Alarmfunktionen,
- Möglichkeit zur Inbetrieb- und Abnahme der Automatisierungsfunktionen vor der Inbetriebnahme der Gesamtanlage,
- Unabhängigkeit von den zum Zeitpunkt der fachtechnischen Abnahme herrschenden Randbedingungen,
- Möglichkeit, Building-Energy-Management-Systeme unter verschiedenen Extrembedingungen zu testen.

4 Verfahren zur Überprüfung von Automatisierungsfunktionen

4.1 Ausgangssituation

Die aus den beschriebenen Abnahmeprozessen in der Praxis abgeleitete Anforderungsliste für ein Verfahren zur Überprüfung von Automatisierungsfunktionen in Gebäuden verdeutlicht, dass das Ziel, den Aufwand für eine gründliche Inbetriebnahme und Abnahme zu minimieren, bisher im Gegensatz zu einer umfassenden Überprüfung eines Building-Energy-Management-Systems steht. Bei der Entwicklung eines Verfahrens für die Überprüfung von Automatisierungsfunktionen in Gebäuden gilt es, vor allem diesen Gegensatz zu beseitigen. Eine Lösung hierfür stellt der Einsatz einer virtuellen Testumgebung, die auf ein Simulationsmodell der betrachteten heiz- und raumluftechnischen Anlage sowie des zugehörigen Gebäudes aufbaut, dar. In einer solchen Testumgebung können die Regelungs- und Steuerungssysteme, die die Automatisierungsfunktionen enthalten, abseits der realen Anlage bereits vor deren Fertigstellung unter definierten Bedingungen getestet werden. Hierfür ist jedoch eine systematische Vorgehensweise auf der Basis von vorab definierten Testprozeduren notwendig.

Um Automatisierungsfunktionen mit Hilfe von Testprozeduren in einem wirtschaftlichen Rahmen überprüfen zu können, muss der Aufwand für den Aufbau bzw. für die Anpassung einer solchen Testumgebung an ein spezielles Projekt möglichst gering gehalten werden. Bei der Definition der Vorgehensweise und Entwicklung der Testprozeduren sowie der zugehörigen virtuellen Testumgebung wird deshalb soweit wie möglich auf bereits bestehende Ansätze und Methoden zurückgegriffen. Deshalb werden ein bereits bestehender einfacher Emulator, der als virtuelle Testumgebung für DDC-Geräte entwickelt wurde [8], sowie der Lebenszyklusansatz von Bach et al. für die Betriebssimulation [41] als Grundlage dieser Arbeit verwendet.

Im Folgenden wird die von der genannten Testumgebung und dem Lebenszyklusansatz gebildete Basis beschrieben. Im Anschluss daran wird darauf aufbauend ein Verfahren zur Überprüfung von Automatisierungsfunktionen, das bei der Inbetriebnahme und Abnahme eingesetzt werden kann, entwickelt und dargestellt. Abschließend werden die praktischen Anforderungen, die sich aus diesem Verfahren für eine universell einsetzbare virtuelle Testumgebung mit den Hauptbestandteilen Simulation und Emulationsschnittstelle ergeben, abgeleitet und kurz erläutert.

4.2 Basis für die Entwicklung von Testprozeduren

4.2.1 Bestehende virtuelle Testumgebung

Vor dem Hintergrund des ständig steigenden Einsatzes von DDC-Regelungssystemen wurde an der Universität Stuttgart eine virtuelle Testumgebung für Building-Energy-Management-Systeme entwickelt [8]. Mit dieser Testumgebung, die auf je 16 analoge und digitale Ein- und Ausgänge beschränkt ist, können Funktionen einfacher digitaler Regelgeräte getestet und verglichen werden, indem die Geräte mit einem in einer Simulation abgebildeten Gebäude- und Anlagenmodell verbunden werden. Die Simulation und das reale Regelgerät werden dabei mit Hilfe eines Datenerfassungsgeräts und einer so genannten Emulationsschnittstelle miteinander verbunden. Die virtuelle Testumgebung besteht somit aus den drei Komponenten Simulation, Datenerfassungssystem und reales Regelgerät (siehe Bild 4.1).

Für die Simulation wird ein bereits bestehendes Modell verwendet. Dieses muss jedoch um zwei Module erweitert werden. Dies ist zum einen ein Echtzeitmodul, das in der Testumgebung dazu benötigt wird, den simulierten Anlagenbetrieb, der auf einem Rechner um ein Vielfaches schneller abläuft als in der Realität, auf Echtzeit zu verlangsamen. Konfiguriert wird dieses relativ einfach aufgebaute Modul innerhalb der Simulation mit Hilfe von wenigen Parametern, die sich auch bei Veränderungen am Aufbau der Testumgebung nicht verändern.

Das zweite, deutlich komplexere Modul beinhaltet die so genannte Emulationsschnittstelle, mit deren Hilfe der Datenaustausch zwischen realer und virtueller Welt bewerkstelligt wird. Innerhalb dieses Moduls, das auch als selbstständiges Unterprogramm innerhalb der Simulation betrachtet werden kann, werden die zu übertragenden Daten so

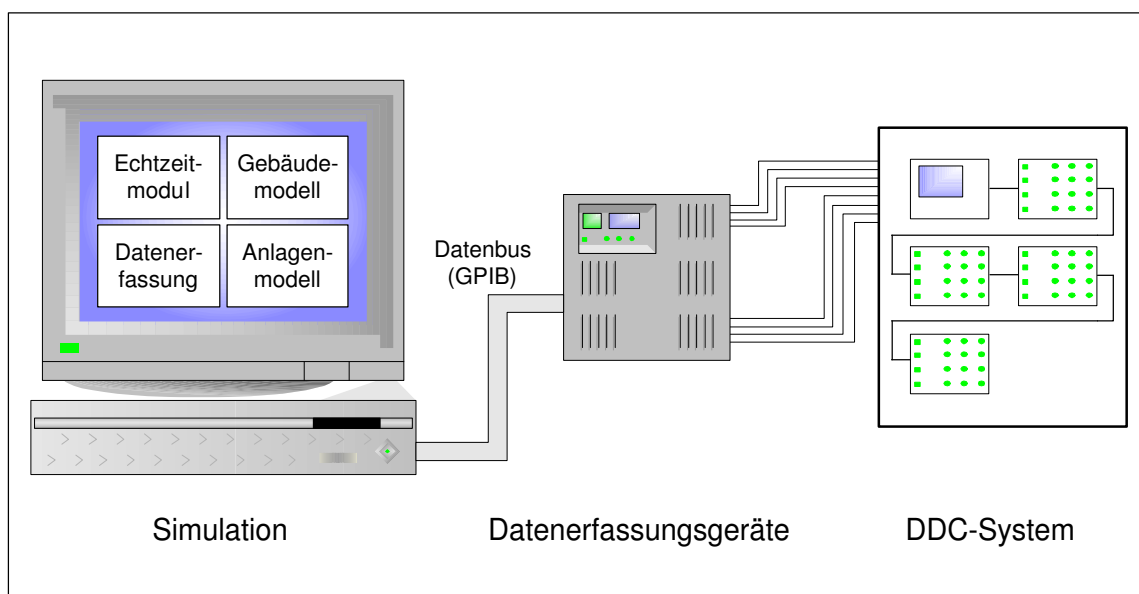


Bild 4.1: Aufbau der bestehenden virtuellen Testumgebung

aufbereitet, dass sie je nach Richtung des Datentransportes von der Simulation bzw. vom DDC-Gerät „verstanden“ und verarbeitet werden können. Zudem wird mit Hilfe der Emulationsschnittstelle über einen genormten Datenbus (GPIB = General Purpose Interface Bus) [37] auch die Verbindung zwischen der Simulation bzw. dem Simulationsrechner und dem Datenerfassungssystem hergestellt. Diese Datenverbindung wird mit Hilfe von C-Routinen, die vom Simulationsprogramm TRNSYS – dieses ist in FORTRAN geschrieben – aus einer externen Software-Bibliothek aufgerufen werden, gesteuert. Die einzelnen Datenübertragungskanäle des Datenerfassungssystems werden dabei in der Emulationschnittstelle – und somit innerhalb der Simulationsumgebung – mit Hilfe von Parametern konfiguriert. Somit muss bei jeder Veränderung im Aufbau der Testumgebung (z.B. beim Hinzufügen eines Datenkanals oder bei der Verwendung einer anderen Signalart) auch die Simulation bearbeitet und verändert werden. Dies bedeutet jedoch wiederum, dass Veränderungen bzw. Korrekturen an den Datenströme während einer laufenden Emulation nicht möglich sind.

4.2.2 Lebenszyklusansatz für die Betriebssimulation

Der Grundgedanke beim Lebenszyklusansatz besteht darin, dass das Werkzeug „Gebäude- und Anlagensimulation“ während des gesamten Lebenszyklus eines Gebäudes eingesetzt wird. Das dabei verfolgte Ziel ist es, den Betrieb des Systems „Gebäude und heiz- und raumlufttechnische Anlagen“ in energetischer und wirtschaftlicher Hinsicht ständig zu optimieren bei gleichzeitiger Sicherstellung der parametrisierten Sollwerte. In Bild 4.2 ist dargestellt, wie die Simulation in den verschiedenen Lebensphasen eines Gebäudes eingesetzt und genutzt werden kann:

Während der *Vorplanung* werden Simulationsmodelle eingesetzt, um verschiedene Konzepte für den Gebäudeentwurf und die Baukonstruktion sowie für die zu installierenden Anlagen daraufhin zu untersuchen, ob sie die gestellten Anforderungen erfüllen. Weiterhin kann die Simulation in dieser Phase dazu verwendet werden, die verschiedenen Konzepte in wirtschaftlicher, thermischer und energetischer Hinsicht miteinander zu vergleichen und zu beurteilen.

In der *Entwurfsphase* des Gebäudes dienen detailliertere Simulationsmodelle („Entwurfssimulation“) dazu, das gewählte Konzept mit Hilfe von Simulationsmodellen zu verbessern und zu verfeinern, indem z.B. das Verhalten des Gebäudes und der darin installierten Anlagen unter verschiedenen Lastbedingungen untersucht wird. Beispielsweise lässt sich mit Simulationsrechnungen die Auslegung der heiz- und raumlufttechnischen Anlagen überprüfen und gegebenenfalls anpassen, so dass eine Fehldimensionierung der Anlagenkomponenten vermieden wird. Das Simulationsmodell wird in dieser Planungsphase eines Gebäudes auch zum Entwickeln und Testen von grundlegenden Regelstrategien für die heiz- und raumlufttechnischen Anlagen verwendet.

In der nächsten Phase des Lebenszyklus eines Gebäudes – der *Bauphase* – werden wiederum weiter detailliertere Simulationsmodelle des Gebäudes dazu verwendet, um die

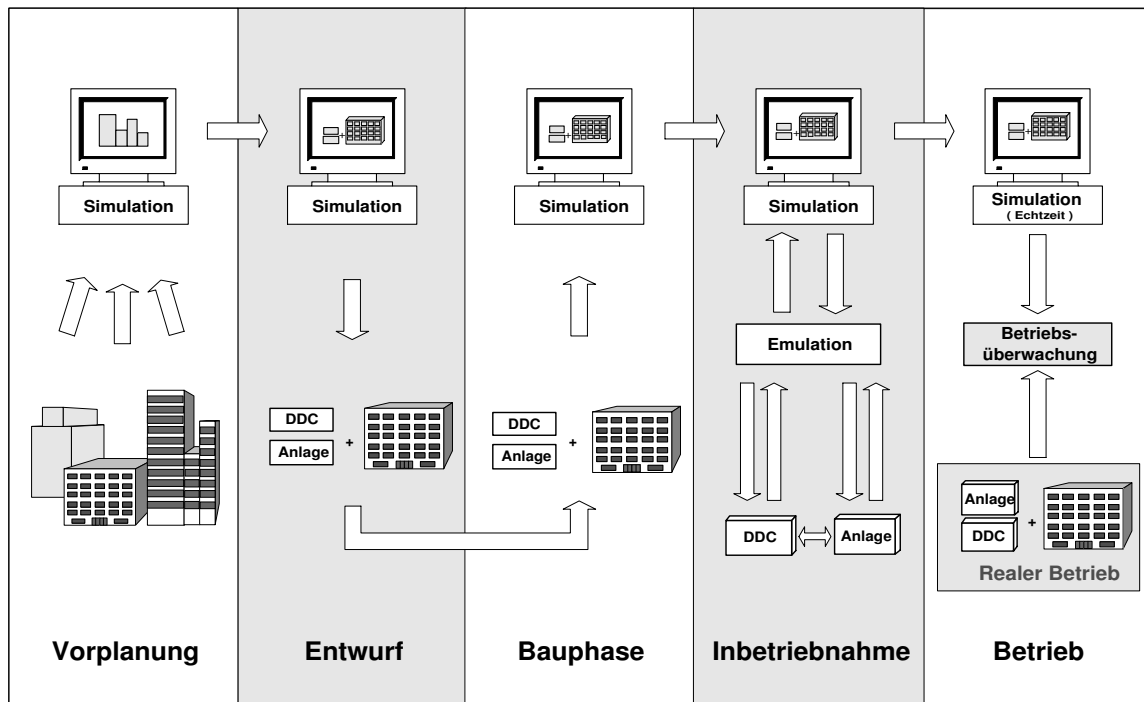


Bild 4.2: Einsatz von Simulationsmodellen im Lebenszyklus eines Gebäudes

Auswirkungen von nachträglichen Änderungen an der Planung auf das gesamte Gebäude- und Anlagenverhalten zu untersuchen. Solche Modifikationen sind beispielsweise notwendig, wenn sich bereits während der Bauphase eine geänderte Nutzung des Gebäudes ergibt. In dieser Lebensphase eines Gebäudes ist es erforderlich, die Simulationsmodelle sowie die zugehörige Datenbasis dem tatsächlich entstehenden Gebäude und den darin installierten Anlagen ständig anzupassen. Das virtuelle Modell von Gebäude und Anlagen beschreibt dann am Ende der Bauphase die Realität.

Während der *Inbetriebnahmephase* werden das Gebäude und die Anlagen einreguliert, so dass die der Planung zugrundeliegenden Anforderungen erfüllt werden. Bei der fachtechnischen Abnahme wird dies kontrolliert. Bei diesen Vorgängen wird das virtuelle Modell als Hilfsmittel verwendet, um z.B. das tatsächlich gemessene Verhalten der realen heiz- und raumluftechnischen Anlagen mit dem Verhalten der Anlagen im Simulationsmodell zu vergleichen. In diesem Fall muss das Verhalten des virtuellen und des realen Gebäudes nahezu identisch sein, wenn das Simulationsmodell die Ideen und Konzepte der Planer – und damit das eigentliche Planungsziel – exakt repräsentiert. Treten Abweichungen zwischen Simulationsmodell und realem Gebäude auf, deutet dies entweder auf Mängel bei der Ausführung, auf Planungsfehler oder auf Modellfehler hin. Das im Laufe des Lebenszyklus entstandene Simulationsmodell bildet somit in Bezug auf die Testprozeduren für die Überprüfung von Automatisierungsfunktionen eine ideale Basis für eine virtuelle Testumgebung. Im Rahmen der Inbetriebnahme und Abnahme wird damit der fehlerfreie Betrieb des Systems „Gebäude-Anlage-Regelung“ geprüft, einreguliert und gegebenenfalls optimiert.

In der *Betriebsphase* wird die Simulation schließlich zur Betriebsüberwachung eingesetzt werden. Hierbei wird mit Hilfe eines automatisierten Fehlererkennungs- und Diagnose-

systems das Verhalten des virtuellen Gebäudes mit dem des realen Gebäudes ständig verglichen [38, 39, 40]. Dadurch werden mögliche Betriebsfehler in der Anlage, die z.B. einen erhöhten Energieverbrauch oder im schlimmsten Fall einen Ausfall der Anlage zur Folge haben, frühzeitig erkannt und behoben. Die Simulation bildet hier die Grundlage, um einen dauerhaft optimierten Betrieb zu ermöglichen.

4.3 Testprozeduren für Automatisierungsfunktionen

4.3.1 Grundlegender Aufbau der Testprozeduren

Im Gegensatz zur früher in der Regeltechnik eingesetzten Analogtechnik besteht bei digitalen Automatisierungssystemen kein alleiniger direkter Zusammenhang zwischen der installierten Hardware und der Funktionalität der Regelung. Die Funktionalität heutiger Automatisierungssysteme ist vielmehr in Softwareprogrammen abgebildet. Die in den heiz- und raumluftechnischen Anlagen installierten Regelungsgeräte dienen „nur“ noch dazu, die Softwareprogramme auszuführen sowie die für die Regelung benötigten Anlagenwerte aufzunehmen und die daraus in den Regelungsprogrammen berechneten Stellsignale an die jeweiligen Anlagenkomponenten auszugeben.

Somit kann der strukturelle Aufbau digitaler Regelungssysteme in zwei Bereiche unterteilt werden (siehe Bild 4.3). Dies ist zum einen die Hardware, die benötigt wird, um Regel- und Steuerungssignale von und zu den Sensoren und Aktoren im Gebäude und den technischen Anlagen zu übertragen, und zum anderen die Software, in der die eigentlichen Regel- und Energiemanagementfunktionen enthalten sind. Der Bereich der Hardware, die aus einem Mikroprozessor und einem oder mehreren Datenerfassungsgeräten zum Einle-

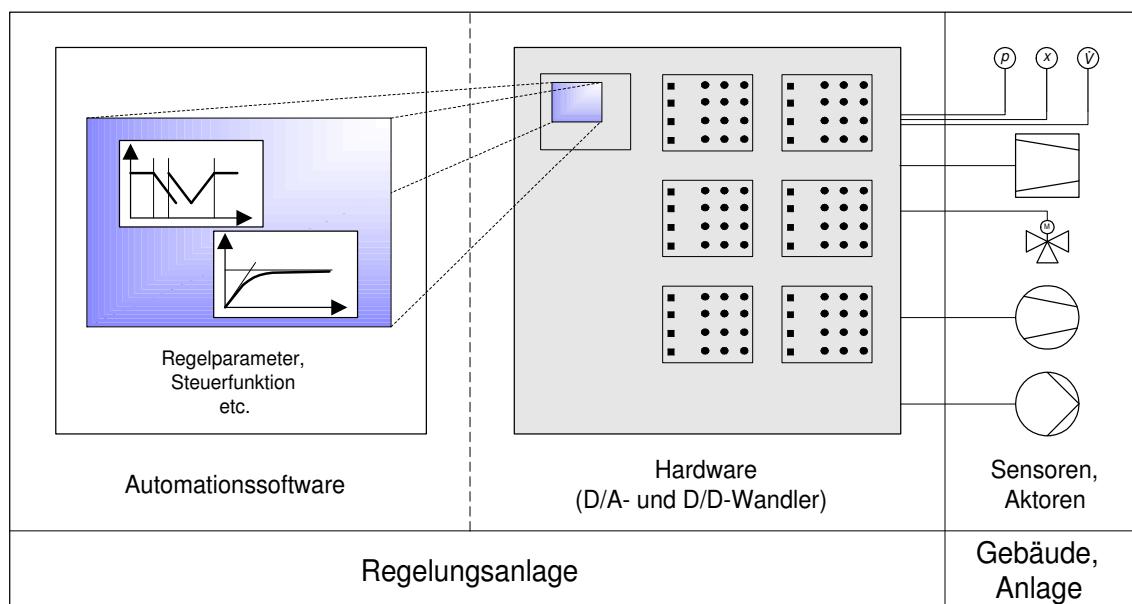


Bild 4.3: Grundlegende Struktur moderner digitaler Regelungssysteme

sen und Ausgeben von analogen und digitalen Signalen an die Sensoren und Aktoren in der Anlage besteht, ist durch eine „herstellerspezifische“ Serienfertigung in gewissem Sinne standardisiert. Im Gegensatz hierzu werden die Regelungsprogramme entsprechend den jeweiligen Anforderungen für jede Anlage neu erstellt. Die meisten Hersteller verwenden hierfür Softwarebibliotheken, in denen die einzelnen Regelungsfunktionen als „Bausteine“ hinterlegt sind. Die Bausteine werden zusammengestellt und an die entsprechenden Gegebenheiten in den jeweiligen Anlagen angepasst. Durch die Aufteilung in Hard- und Software können auf der Geräteseite aufgrund der Serienfertigung die Kosten reduziert werden, während durch die individuelle Programmierung bzw. Parametrierung der Regel- und Automatisierungsfunktionen den jeweiligen Gegebenheiten angepasste und optimierte Energiemanagementsysteme für alle Anlagen ermöglicht werden.

Bei der Inbetriebnahme und der Abnahme resultiert aus der geschilderten Struktur der Automatisierungssysteme in der heutigen Inbetriebnahme- und Abnahmepraxis ein entscheidender Nachteil. Die Hardware der Regelungssysteme kann zwar relativ einfach und gegebenenfalls auch einzeln überprüft werden, die Programme mit den verschiedenen Automatisierungs- und Regelfunktionen, die in der Regel nur als „Black Box“ vorliegen, können dagegen nur als Ganzes betrachtet werden. Das heißt, dass die meisten Automatisierungsfunktionen nur mit relativ großem Aufwand untersucht werden können, da die Arbeitsweise der programmierten Algorithmen zur Zeit ausschließlich in der Wechselwirkung mit einer realen Anlage kontrolliert werden kann.

Im Konzept für die Testprozeduren zur Überprüfung der Automatisierungsfunktionen wird die zweigeteilte Struktur der digitaler Regelsysteme jedoch genutzt. Der Grundgedanke hierbei ist, dass die „herstellerspezifisch standardisierte“ Regelungshardware in eine virtuelle Testumgebung eingebunden wird (siehe Bild 4.4). In dieser Umgebung werden die Regelungsgeräte über geeignete Schnittstellen mit einem Simulationsmodell, das auf der Basis des in Kapitel 4.2.2 beschriebenen Lebenszyklusansatzes erstellt wird, verknüpft. Das Modell gibt dabei das Verhalten der Anlage und des Gebäudes, in dem die zu über-

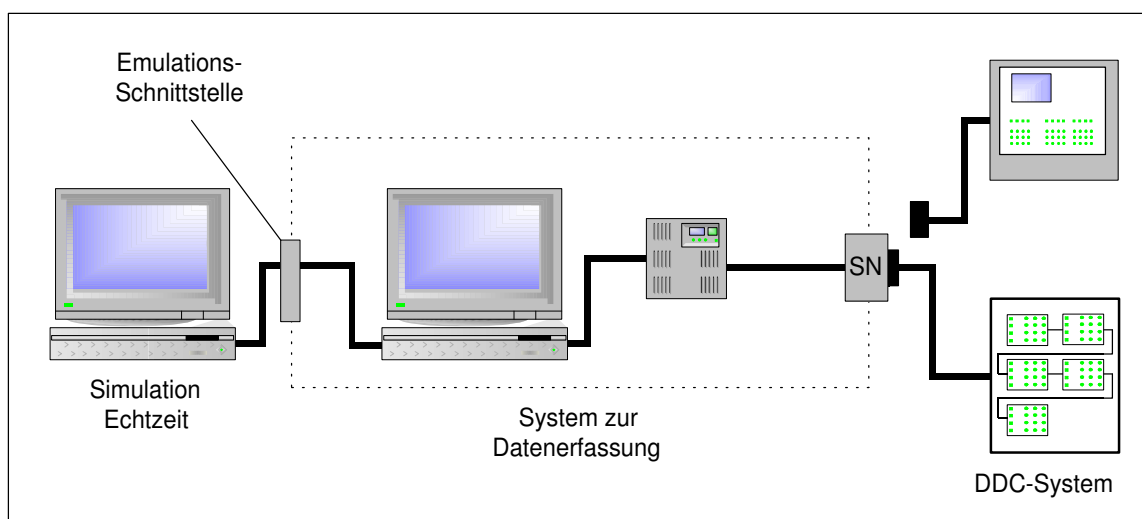


Bild 4.4: Testaufbau für die Ausführung der Testprozeduren

prüfenden Automatisierungssysteme in der Realität installiert werden, wieder. In entsprechender Weise wird das für die reale Anlage entworfene Automatisierungsprogramm auf die standardisierte Hardware aufgespielt.

Der Vorteil dieses Testaufbaus ist, dass es – bei einer geeigneten Konfiguration der virtuelle Testumgebung – auf einfache Weise möglich ist, die Automatisierungssysteme verschiedener Anlagen zu testen. Hierzu muss lediglich das Simulationsmodell ausgetauscht sowie die entsprechende Automatisierungssoftware der anderen Anlage auf die Hardware aufgespielt werden, falls der gleiche Hersteller die Regelung liefert. Bei verschiedenen Fabrikaten muss andernfalls zusätzlich die Regelungshardware ausgetauscht werden.

Um die digitalen Automatisierungssysteme möglichst vollständig zu überprüfen, werden in den Testprozeduren mehrere Arbeitsschritte definiert. Diese Arbeitsschritte werden in Phasen unterteilt (siehe Tabelle 4.1). In der Vorbereitungsphase wird die Testumgebung für die zu prüfende Regelungsanlage vorbereitet. Der eigentliche Testvorgang findet in den sich anschließenden Open-Loop- und Closed-Loop-Phasen statt. Die Bezeichnungen „Open-Loop“ und „Closed-Loop“ beziehen sich hierbei darauf, ob bei der jeweiligen Testphase das Simulationsmodell mit eingebunden ist oder nicht.

Tabelle 4.1: Testphasen und Arbeitsschritte innerhalb der Testprozeduren

Testphase	Arbeitsschritte
Vorbereitung	<ul style="list-style-type: none"> • Installieren der Regelungsprogramme auf die Regelungsgeräte in der virtuellen Testumgebung • Einbinden des Simulationsmodells in die virtuelle Testumgebung • Herstellen der Datenverknüpfungen in der Testumgebung
Open-Loop	<ul style="list-style-type: none"> • Funktionsprüfung der Sicherheitsfunktionen unter stationären Betriebsbedingungen • Überprüfen der Schaltreihenfolge der Komponenten in der Anlage
Closed-Loop	<ul style="list-style-type: none"> • Testen von einzelnen Regelkreisen unter stationären Bedingungen • Untersuchen von speziellen Building-Energy-Management-Funktionen • Untersuchen des Regelverhaltens unter extremen Lastbedingungen

4.3.2 Vorbereitungsphase der Testprozeduren

Die Vorbereitungsphase für die Testprozeduren gliedert sich im Wesentlichen in drei Arbeitsschritte (siehe Tabelle 4.1). Der erste Schritt beinhaltet dabei das Vorbereiten und das Aufspielen des zu testenden Regelungsprogramms auf die Regelungsgeräte des entsprechenden Herstellers. Dabei wird zunächst davon ausgegangen, dass die Regelungsgeräte bereits in der virtuellen Testumgebung installiert sind. Im Fall, dass ein Regelungssystem eines Herstellers zum ersten Mal in der Testumgebung überprüft wird, muss die entsprechende Regelungshardware vorbereitet und installiert werden. Bei der Vorbereitung des zu testenden DDC-Programms ist darauf zu achten, dass auch Signale, auf die innerhalb des Programms über Bussysteme oder andere Verbindungen zugegriffen wird, zur Verfügung gestellt werden.

Im zweiten Schritt der Vorbereitungsphase wird das Simulationsmodell von Gebäude und Anlagen in die virtuelle Testumgebung eingebunden, indem es um ein Echtzeitmodul sowie ein Datenaustauschmodul erweitert wird. Mit dem Echtzeitmodul werden die Berechnungen innerhalb der Simulation so verzögert, dass der virtuelle Betrieb der Anlage in Echtzeit abläuft. Das Datenaustauschmodul wird in der Simulation benötigt, um die virtuellen Messwerte und Regelsignale wie z.B. Stellungsrückmeldungen aus der Anlage nach außen hin verfügbar zu machen sowie um die Stell- und Regelsignale des zu überprüfenden Regelungssystems an die virtuelle Anlage weiterzugeben. Auf beide Module wird in Kapitel 6, in dem die den Anforderungen der Testprozeduren angepasste Simulationsumgebung beschrieben wird, näher eingegangen.

In einem dritten Arbeitsschritt werden in der Testumgebung die Datenverknüpfungen zwischen der virtuellen Anlage und dem realen Regelungssystem hergestellt, so dass dieses emuliert werden kann. Hauptarbeitspunkte sind hierbei die richtige Konfiguration der Datenkanäle von und zum DDC-System hinsichtlich Signalart (z.B. Strom oder Spannung) und Signalbereich (z.B. 0 - 10 V) sowie in Bezug auf die Simulation die Zuordnung der Wertebereiche (z.B. Temperatur oder Druck) zu den entsprechenden Signalen. Die Möglichkeiten und die Vorgehensweise bei der Konfiguration der Datenkanäle und der Signalbereiche werden in Kapitel 5 bei der Beschreibung der verbesserten Emulationsumgebung erläutert.

4.3.3 Testphase im Open-Loop-Modus

In ersten Arbeitsschritt dieser Testphase werden vor allem die Funktionen überprüft, bei denen keine gegenseitige Beeinflussung von Anlagen- und Regelverhalten besteht. Das heißt, im Open-Loop-Betrieb der virtuellen Testumgebung wird das Simulationsmodell der Anlage zunächst nicht genutzt. Bei den in dieser Phase zu überprüfenden Funktionen handelt es sich im wesentlichen um Steuer- und Alarmfunktionen. Ein Beispiel für eine solche Funktion ist die Folge von Maßnahmen und Stellbefehlen, die vom Regelsystem abgearbeitet werden, wenn an einem Wärmeübertrager der Frostschtzwächter auslöst und das Einfrieren der Wärmeübertrager vermieden werden muss. Ein weiteres Beispiel ist das

kontrollierte Abschalten einer raumluftechnischen Anlage im Falle eines Keilriemenrisses an einem Ventilatorantrieb.

Für den Test der Steuerfunktionen werden alle Anlagengrößen, die als Eingänge in das zu testende Regelungssystem eingehen, auf konstante Werte eingestellt. Anschließend wird die Eingangsgröße, über die die jeweilige Alarm- oder Steuerungsfunktion ausgelöst wird – für das Beispiel des Wärmeübertragers ist dies die Luftaustrittstemperatur – in der Testumgebung so verändert, dass der entsprechende Alarm ausgelöst wird und die Steuerung zu arbeiten beginnt (siehe Bild 4.5). Das resultierende Verhalten der Regelanlage wird beobachtet und protokolliert.

Im nächsten Arbeitsschritt der Open-Loop-Phase wird kontrolliert, ob die programmierten Schaltsequenzen, mit denen der Betriebsstatus verschiedener Anlagenkomponenten in Abhängigkeit einer oder mehrere Eingangsgrößen gesteuert bzw. geregelt wird, richtig arbeiten. Ein Beispiel hierfür ist die Reihenfolge, in der – abhängig vom Verlauf der Außen- und Ablufttemperatur – die Luftbehandlungskomponenten einer raumluftechnischen Anlage wie Erwärmer, Kühler und Mischklappensystem betrieben werden.

Ähnlich wie beim Test der Steuer- und Alarmfunktionen werden in der virtuellen Testumgebung auch bei der Überprüfung der Schaltsequenzen die Eingangsgrößen der Automatisierungsfunktionen auf konstante Werte gesetzt (siehe Bild 4.6). Die Größen, die die Steuersequenz beeinflussen, – bei einem Economiser sind dies die Temperaturen bzw. die Enthalpien der Außenluft und der Abluft – werden über vorab definierte Zeitprofile kontinuierlich verändert. Dies geschieht in einer Weise, dass auch Totbänder zwischen dem Betrieb von einzelnen Komponenten überprüft werden können. Die Zeitprofile werden dabei entweder über eine Datei eingelesen oder von einem Signalgenerator in der virtuellen Testumgebung erzeugt.

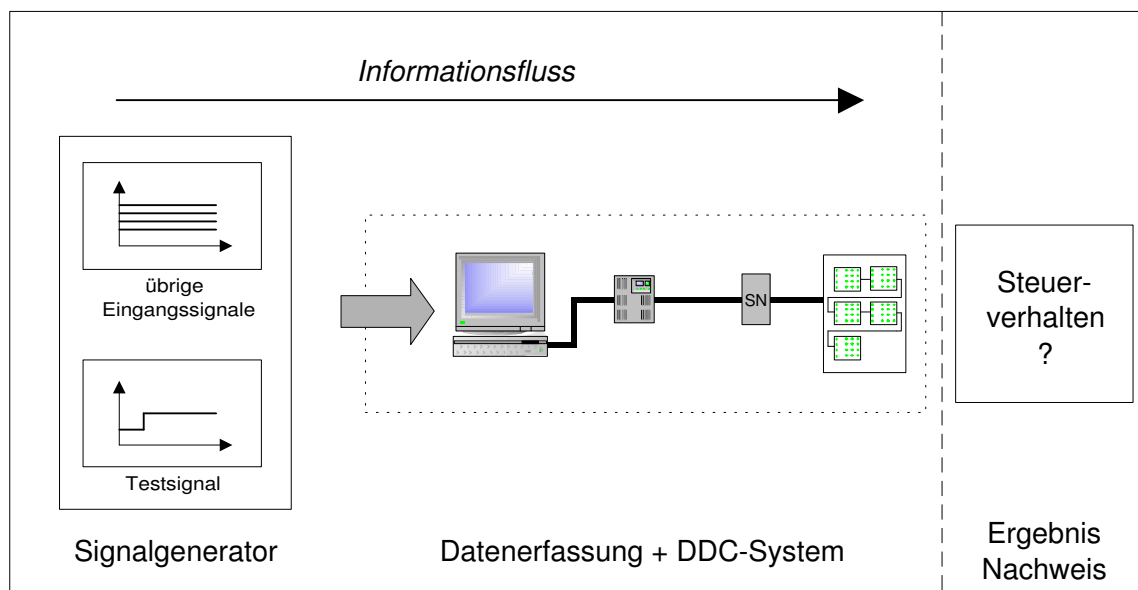


Bild 4.5: Überprüfen von Steuerfunktionen

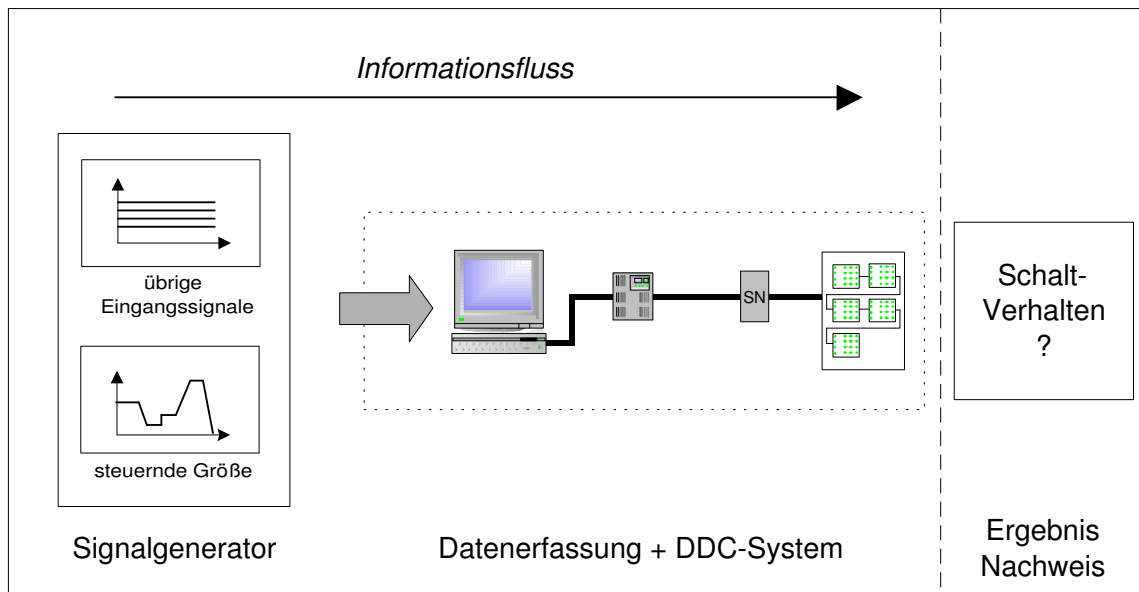


Bild 4.6: Überprüfen von Schaltsequenzen

4.3.4 Testphase im Closed-Loop-Modus

Auch die letzte Phase der Inbetrieb- und Abnahmeverfahren ist in mehrere Arbeitsschritte unterteilt. Im Gegensatz zur ersten Phase, der Vorbereitungsphase, sind die einzelnen Schritte optional, d.h. je nach Anforderung können die Schritte durchgeführt oder auch weggelassen werden. Alle Arbeitsschritte in dieser Phase werden im so genannten „Closed-Loop-Modus“ oder auch Emulationsmodus durchgeführt. Dies bedeutet, dass das digitale Regelungssystem in der virtuellen Testumgebung mit der Gebäude- und Anlagensimulation verbunden ist und während der Versuche mit diesem interagiert.

Im ersten der drei Arbeitsschritte der Closed-Loop-Phase werden einzelne Regelkreise, z.B. der eines Erwärmers oder Kühlers, in der digitalen Regelung auf ihr Verhalten untersucht. Dazu wird die Simulation zunächst unter stationären Bedingungen betrieben, d.h. die inneren Lasten und die Wetterbedingungen werden in definierter Weise konstant gehalten. Auf den jeweils betrachteten Regelkreis wird dann ein definiertes Störsignal von außen, d.h. von außerhalb der Simulation, aufgebracht (siehe Bild 4.7). Anschließend wird das Verhalten des Regelkreises beobachtet und aufgezeichnet. Das Störsignal kann beispielsweise aus einem Sollwertsprung bestehen. Es besteht jedoch auch die Möglichkeit, eine Störsignalsequenz über einen Signalgenerator in der virtuellen Testumgebung auf den Regler aufzuprägen.

Die Automatisierungsfunktionen des Energie-Managements können ebenfalls im Closed-Loop-Modus untersucht werden. Hierfür ist jedoch eine genaue Beschreibung der Funktionsweise (z.B. aus den Revisionsunterlagen der Anlage) der jeweiligen Funktion erforderlich. Basierend auf dieser Beschreibung werden sich verändernde Betriebsbedingungen mit dem Simulationsmodell nachgebildet. Anschließend wird überprüft, ob die während der Planung an das Building-Energy-Management-System gestellten Anforderungen von den in der Regelung implementierten Funktionen erfüllt werden.

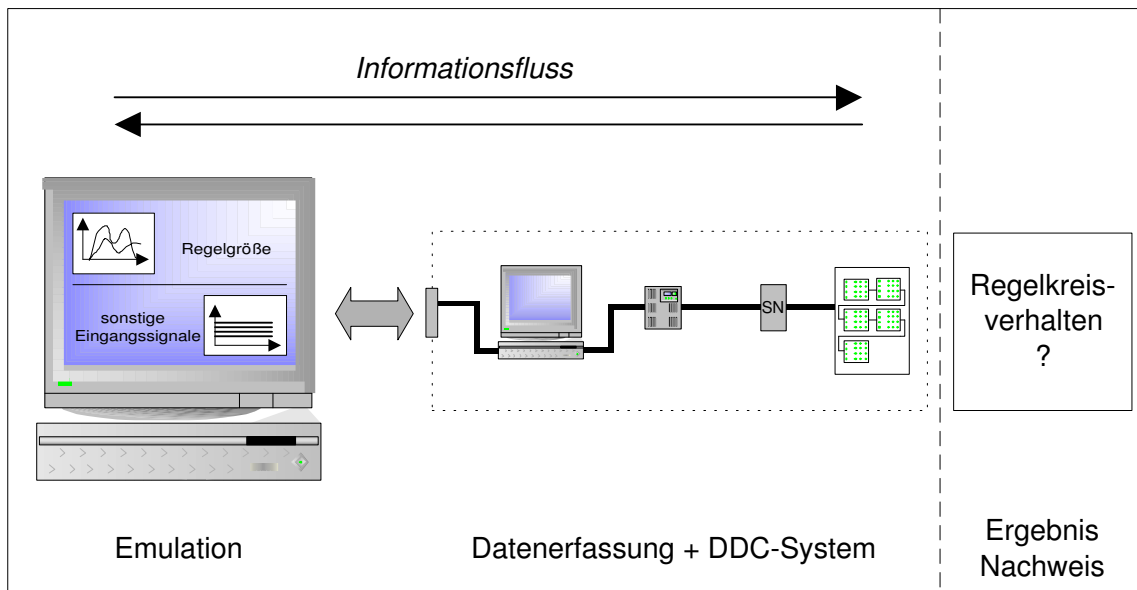


Bild 4.7: Überprüfen von Regelkreisen

In der gleichen Weise wird im letzten Schritt der Testprozeduren überprüft, ob das Verhalten des Regelungssystems auch unter extremen Lastbedingungen den planerischen Anforderungen entspricht. Extreme Lastbedingungen sind z.B. extrem heiße Sommertage oder längere Kälteperioden im Winter, bei denen die Auslegungstemperaturen über- bzw. unterschritten werden. Ebenfalls denkbar sind Extremsituationen bezüglich der im Gebäude auftretenden inneren Lasten, wenn beispielsweise die in der Planung getroffenen Lastannahmen überschritten werden (siehe Bild 4.8).

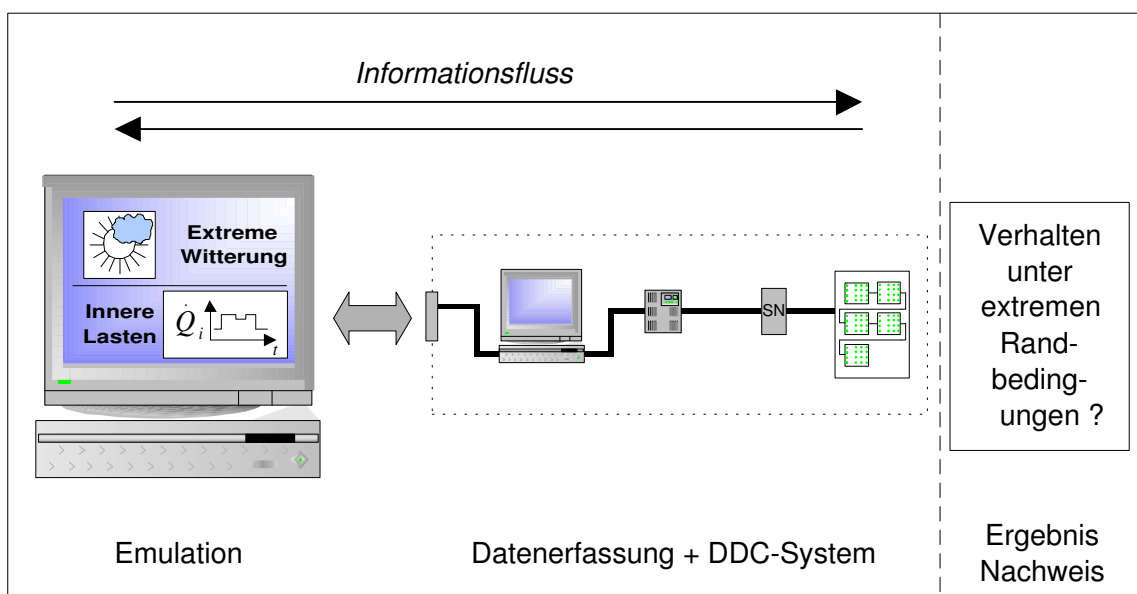


Bild 4.8: Überprüfen des BEMS-Verhaltens bei extremen Lastbedingungen

4.4 Anforderungen an die virtuelle Testumgebung und die Betriebssimulation

4.4.1 Vorgehensweise beim Ermitteln der Anforderungen

Die bereits bestehenden Werkzeuge Simulation und virtuelle Testumgebung, die den Ausgangspunkt für die Überlegungen zur Entwicklung der Testprozeduren für die Überprüfung von Automatisierungsfunktionen bilden, erfüllen nicht alle Voraussetzungen, von denen beim Ausarbeiten der Prozeduren ausgegangen wird. Deshalb müssen beide Werkzeuge entsprechend den gestellten Anforderungen weiterentwickelt und verbessert werden. Durch diese Verbesserungen soll ein effektiver und wirkungsvoller Einsatz der Testprozeduren erreicht werden. Die Anforderungen, die sich für den praktischen Einsatz der Testprozeduren ergeben, werden im Folgenden pflichtenheftartig zusammengestellt und kurz erläutert. Dabei wird unterschieden zwischen Anforderungen, die sich für die Modelle und Module der den Tests zugrunde gelegten Simulation ergeben, und Eigenschaften, die die eigentliche virtuelle Testumgebung als Bindeglied zwischen realer und virtueller Welt im Hinblick auf die Programmierung und den gerätetechnischen Aufbau betreffen.

4.4.2 Anforderungen an die virtuelle Testumgebung

Die Hauptanforderung, die sich aus den Testprozeduren für den gerätetechnischen Aufbau der virtuellen Testumgebung ergibt, besteht darin, diesen möglichst flexibel und modular zu gestalten. Diese Forderung zielt darauf ab, dass die Prüfumgebung übersichtlich sowie plausibel ist und stets auf einfache Weise und vor allem ohne großen Aufwand verändert und erweitert werden kann (siehe Tabelle 4.1). Zu den Anforderungen, die sich hierbei aus den Testprozeduren ergeben, zählt vor allem die Möglichkeit, dass die digitalen Regelungssysteme unabhängig vom Hersteller einfach und schnell in die Testumgebung eingebunden werden können. Die unterschiedlichen Datenpunkte der einzelnen Regelungssysteme müssen auf eine übersichtliche und stets nachvollziehbar einfache Weise mit der Testumgebung verbunden werden können.

Eine weitere Anforderung stellt die hersteller- und systemunabhängige Erweiterbarkeit des gerätetechnischen Aufbaus der Testumgebung dar. Dies betrifft insbesondere die Datenerfassungsgeräte. Diese Forderung ist vor allem vor dem Hintergrund zu sehen, dass mit der ständig steigenden Komplexität digitaler Regelungssysteme auch die Anzahl der zu verarbeitenden und zu übertragenden Datenpunkte zunimmt. Eine weitere Eigenschaft, die für die Datenübertragung insbesondere in Bezug auf die Open-Loop-Phase der Testprozeduren benötigt wird, ist die Möglichkeit, die Testumgebung auch ohne die Simulation betreiben zu können.

Die Aufgaben, die in der Testumgebung durch Programme gelöst werden, beinhalten zum einen die Simulation und zum anderen die Steuerung und Kontrolle der Datenübertragung zwischen realen und virtuellen Komponenten. Um die Testumgebung einfach erwei-

tern und konfigurieren zu können, muss die Software, mit der die Datenerfassungsgeräte gesteuert werden – im Gegensatz zum Emulator aus dem Vorhaben VITE-BEMS [8] – als eigenständiges Programm in der Testumgebung ablaufen. Diese Trennung von Funktionen wird insbesondere für die oben beschriebene Open-Loop-Testphase benötigt. Als Folge der Trennung wird jedoch auch eine einfache, möglichst auf allgemein gültigen Standards aufbauende Schnittstelle benötigt, über die Daten zwischen realer Welt – zu dieser gehört auch die Datenerfassung – und der Simulation ausgetauscht werden. Weitere die Datenerfassung betreffende Anforderungen sind die jederzeit veränderbare Konfiguration der einzelnen Datenströme sowie die Möglichkeit, während des Testbetriebs manuell in den Datenfluss eingreifen zu können.

Eine weitere Anforderung, die sich aus der Definition der Testprozeduren an die Programmierung der Testumgebung ergibt, ist die Möglichkeit, einzelnen Datenströmen definierte Signale oder Signalsequenzen aufzuprägen. Ebenso sollte es möglich sein, die während der Überprüfung der digitalen Regelungssysteme entstehenden Daten kontinuierlich aufzuzeichnen und zu archivieren. Für eine einfache und schnelle erste Auswertung der Daten bzw. das Überwachen der Testabläufe sowie für die Konfiguration der Testumgebung wird zudem eine grafische Benutzeroberfläche benötigt. Die Oberfläche ist so zu gestalten, dass das für die Durchführung der Testprozeduren erforderliche Hintergrundwissen zur Emulation auf ein Minimum reduziert wird.

Die genannten Anforderungen, die sich aus den Testprozeduren für den gerätetechnischen Aufbau (Hardware) und die Programmierung (Software) der virtuellen Testumgebung ergeben, sind in Tabelle 4.2 zusammengestellt. Die Umsetzung der Anforderungen in die Praxis wird in Kapitel 5 beschrieben.

4.4.3 Anpassungen in der Betriebssimulation

Bei den Anforderungen an die Betriebssimulation für deren Einsatz im Rahmen der Testprozeduren kann zwischen Fest-, Grenz- und Wunschanforderungen unterschieden werden (siehe Tabelle 4.3). Die Festanforderungen beziehen sich auf Verbesserungen und Erweiterungen an den Simulationsmodellen, die unbedingt erforderlich sind, um die Testprozeduren prinzipiell anwenden zu können. Die Grenzanforderungen an die Simulation beinhalten Eigenschaften, ohne die die Testprozeduren zwar prinzipiell einsetzbar sind, die aber beispielsweise zu höherer Wirtschaftlichkeit sowie zu größerer Genauigkeit beitragen. Wunschanforderungen sind Erweiterungen und Verbesserungen, die nicht unbedingt ausgeführt werden müssen, die jedoch zu einer „komfortableren“ Anwendung der Testprozeduren beitragen bzw. die Handhabung und den praktischen Einsatz der Testprozeduren erleichtern.

Wie in der Literaturübersicht (Kapitel 2.2) bereits erwähnt, ist bei einer Anzahl von bestehenden Modellen – insbesondere bei raumluftechnischen Komponenten – die Berechnung des Betriebsverhaltens vereinfachend auf quasistationäre Zustände beschränkt. Eine der wichtigsten Anforderungen, um Automatisierungsfunktionen in einer virtuellen Testum-

Tabelle 4.2: Anforderungen der Testprozeduren an die virtuelle Testumgebung

Hardware	<ul style="list-style-type: none"> • Flexibler und modularer Aufbau • Einfache und schnelle Einbindung unterschiedlicher digitaler Regelungssysteme • Einfache Verkabelung und Konfiguration der verschiedenen Datenpunkte • Hersteller- und systemunabhängige Erweiterbarkeit der Datenerfassung • Möglichkeit, die Testumgebung auch ohne Simulation zu betreiben
Software	<ul style="list-style-type: none"> • Unabhängiger und getrennter Ablauf der Simulations- und Datenerfassungsprogramme • Einfache, möglichst standardisierte Verbindung zwischen der Simulation und der Datenerfassung • Einfache, jederzeit veränderbare Konfiguration der übertragenen Datenströme • Möglichkeit, manuell in den Datenfluss einzelner Datenverbindungen einzugreifen • Einlesen bzw. Aufprägen von Signalen und Signalsequenzen auf einzelne Datenströme • Konfigurierbare graphische Darstellung der übertragenen Daten • Archivierung der Daten während einer Emulation

gebung mit Hilfe von Testprozeduren zu überprüfen, ist jedoch, dass in der zugehörigen Simulation das Betriebsverhalten der gesamten zu regelnden heiz- und raumluftechnischen Anlage möglichst realitätsnah abgebildet wird.

Besonders im Hinblick auf Untersuchungen des Regelverhaltens der digitalen Regler müssen die jeweiligen Komponentenmodelle dahingehend erweitert werden, dass bei der Berechnung des Komponentenverhaltens auch die dynamische Vorgänge berücksichtigt werden. Zu den Festanforderungen zählt auch die Notwendigkeit, die Simulation um ein Echtzeit- und Datenaustauschmodul – d.h. ein Schnittstellenmodul für die Emulation – zu erweitern, so dass diese in die virtuelle Testumgebung eingebunden werden kann. Eine einfache Version eines solchen Modul wurde bereits in der virtuellen Testumgebung aus dem Vorhaben VITE-BEMS (siehe Kapitel 4.2.1) entwickelt. Dieses Modul ist jedoch für die Verwendung im Zusammenhang mit den Testprozeduren ungeeignet, da der Auf-

Tabelle 4.3: Anforderungen an die Simulation (resultierend aus den Testprozeduren)

Fest-anforderungen	<ul style="list-style-type: none"> • Realitätsnahe Abbildung des Betriebsverhaltens der gesamten Anlage • Berücksichtigung der dynamischen Vorgänge in den einzelnen Anlagenkomponenten • Echtzeit- und Datenaustauschmodul für die Einbindung in die virtuelle Testumgebung
Grenz-anforderungen	<ul style="list-style-type: none"> • Einfach aufgebaute Modelle auf der Basis allgemein verfügbarer Parameter • Gekoppelte thermische und hydraulische Berechnung
Wunsch-anforderungen	<ul style="list-style-type: none"> • Möglichst einfaches Umschalten zwischen Simulations- und Emulationsbetrieb • Vereinfachtes Regelungsmodell für einen Simulationsvorlauf sowie zum Überprüfen des Simulationsmodells

wand für dessen Konfiguration zu groß ist. Zudem ist bei diesem Modul die Steuerung des Datenaustausches starr in der Simulation verankert. Dadurch sind keine Arbeitsschritte möglich, bei denen einzelne Datenströme während eines laufenden Tests verändert werden. Aus diesem Grund muss das bestehende Modul so verändert und erweitert werden, dass die Daten innerhalb der virtuellen Testumgebung in einer flexiblen und einfach konfigurierbaren Weise ausgetauscht werden.

Ein Hauptarbeitspunkt bei den Grenzanforderungen besteht darin, die bestehenden Simulationsmodelle so zu überarbeiten, dass zum einen nur allgemein verfügbare Parameter, wie z.B. von den Herstellern ausgegebene Kenndaten, benötigt werden und zum anderen die Anzahl der für das Modell zu definierenden Eingangsgrößen auf ein Minimum reduziert wird. Durch diese Maßnahmen vereinfachen sich notwendige Anpassungen, die nachträglich vorgenommen werden müssen, um das Verhalten des Simulationsmodells an das reale Anlagenverhalten anzupassen. Eine weitere Grenzanforderung beinhaltet die Forderung, dass mit dem Simulationsmodell hydraulische und thermische Vorgänge in gekoppelter Weise bis zu einem vorgegebenen Grad detailliert berechnet werden können, da diese Vorgänge insbesondere in Klimaanlageanlagen mit ausgedehnten und komplexen Luftkanalnetz das Verhalten der Automatisierungsfunktionen beeinflussen.

Eine in Zusammenhang mit den Testprozeduren sinnvolle Verbesserung, die den Wunsch-anforderungen zuzuordnen ist, betrifft das Emulationsmodul, das für den Datenaustausch und die Echtzeitkontrolle benötigt wird. Dieses Modul wird um einen „Schalter“ erweitert,

mit dem während des Programmablaufs zwischen Simulations- und Emulationsbetrieb umgeschaltet werden kann. Durch diese Maßnahme werden beispielsweise kombinierte Open- und Closed-Loop-Tests ermöglicht, so dass der Zeitaufwand bei den Untersuchungen reduziert wird.

Eine weitere Wunschanforderung stellt die Bereitstellung eines einfachen und leicht konfigurierbaren Regelungsmoduls dar. Dieses Modul wird vor allem für den so genannten Simulationsvorlauf der Emulation benötigt. Hierbei läuft das Gebäude- und Anlagenmodell für eine bestimmte „Vorlaufzeit“ mit einer stark vereinfachten Regelung im reinen Simulationsbetrieb, bevor auf den eigentlichen Emulationsbetrieb umgeschaltet wird. Mit dem Simulationsvorlauf wird verhindert, dass das Einschwingverhalten und die Anfangsbedingungen (z.B. für das Gebäude) der Simulation einen Einfluss auf die eigentliche Betriebssimulation während der Emulation haben. Ein vereinfachtes Regelungsmodell kann auch dazu eingesetzt werden, um die Funktionsweise der bei den Testprozeduren eingesetzten Simulation vorab im reinen Simulationsbetrieb zu testen.

Die an den jeweiligen Simulationsmodellen vorgenommenen Änderungen und Verbesserungen werden in Kapitel 6 näher beschrieben.

5 Emulator für die Inbetriebnahme von Automatisierungssystemen

5.1 Voraussetzungen

Im Bereich der Heiz- und Raumluftechnik wird eine virtuelle Testumgebung, in der eine reale Komponente mit einer Simulation verbunden ist, allgemein als Emulator bezeichnet. Wie in den Kapiteln 2.4 und 4.2 beschrieben, wurden bereits mehrere solcher Emulatoren für heiz- und raumluftechnische Regelanlagen entwickelt. Die meisten dieser Emulatoren beschränken sich jedoch auf die Emulation von einfachen Regelungssystemen mit einer begrenzten Anzahl von Ein- und Ausgangssignalen. Für die Menge an Daten, wie sie im Zusammenhang mit der Überprüfung Automatisierungsfunktionen in modernen DDC-Regelsystemen übertragen werden müssen, sind diese Emulatoren nicht oder nur sehr bedingt geeignet.

Bereits bestehende virtuelle Testumgebungen wie z.B. aus dem Vorhaben VITE-BEMS [8] eignet sich für den Einsatz in Zusammenhang mit den in Kapitel 4.3 beschriebenen Testprozeduren nur sehr bedingt. Nachteilig bei deren Aufbau wirkt sich vor allem aus, dass die drei Bestandteile eines Emulators – die Simulation, die Emulationsschnittstelle und das reale DDC-Gerät – nahezu starr miteinander verbunden sind (siehe Kapitel 4.2.1). Eine feste Verdrahtung des DDC-Geräts mit der Datenerfassung der Emulationsschnittstelle sowie deren Ansteuerung direkt aus Simulation heraus haben zur Folge, dass der Aufwand beim Umbau und bei der Konfiguration dieser Testumgebung für einen neuen Anwendungsfall sehr groß ist. Dies bedeutet jedoch, dass die entwickelten Testprozeduren in der Praxis kaum wirtschaftlich anzuwenden sind.

Aus diesem Grund werden alle Bestandteile der virtuellen Testumgebung überarbeitet bzw. neu entwickelt. Dabei werden insbesondere die Anforderungen, die sich für die Testumgebung in Zusammenhang mit einem effektiven Einsatz der Testprozeduren ergeben, berücksichtigt (siehe Tabelle 4.2). Aufbauend auf einer Analyse des prinzipiellen Aufbaus von Emulatoren wird im Folgenden zunächst das Konzept für den Aufbau einer flexiblen virtuellen Testumgebung, die den in Kapitel 4.4.2 aufgeführten Anforderungen entspricht, beschrieben. Anschließend wird die geräte- und softwaretechnische Umsetzung des Konzepts dargestellt.

5.2 Grundlegende Struktur und Aufbau

5.2.1 Prinzipieller Aufbau von Emulatoren

Der Betriebsablauf und der Aufbau sind bei allen Emulatoren prinzipiell gleich. In Bezug auf den Aufbau können Emulatoren, wie einleitend bereits erwähnt, in drei Grundelemente unterteilt werden (siehe Bild 5.1). Diese bestehen aus einer Simulation, einer so genannten Emulationsschnittstelle sowie der jeweils zu untersuchenden realen Komponente.

Mit der Simulation wird in einem Emulator die reale Umgebung, in der die jeweils zu untersuchende Komponente normalerweise betrieben wird, nachgebildet (sie ist somit „virtuell“). Im Unterschied zu sonst üblichen Simulationsanwendungen muss bei einer Emulation die Simulation jedoch auf Echtzeit verlangsamt werden. Auf diese Weise werden die zeitlichen Abläufe in der virtuellen Komponentenumgebung an die Betriebsabläufe in der realen Komponente angepasst, da diese naturgemäß nicht „beschleunigt“ betrieben werden kann. Die Rechenvorgang der virtuellen Anlage in der Simulation wird mit Hilfe eines so genannten Echtzeitmoduls zeitlich gesteuert.

Die Emulationsschnittstelle – das Kernelement eines jeden Emulators – dient dazu, die reale Komponente mit den virtuellen Anlagenteilen in der zugehörigen Simulation zu verbinden. Die Schnittstelle besteht dabei sowohl aus Hard- als auch Software. In einem Schnittstellenprogramm werden die von der Simulation berechneten Umgebungsbedingungen so aufbereitet, dass sie über ein Messwerterfassungs- und -ausgabesystem (MEAS) als Eingangsgrößen an die reale Komponente angelegt werden können (siehe Bild 5.2). Die als Zahlenwerte vorliegenden „Outputs“ der Simulation werden über Digital/Analog-Wandler in so genannten „Physikalischen Schnittstellen“ (PS) in die entsprechenden realen

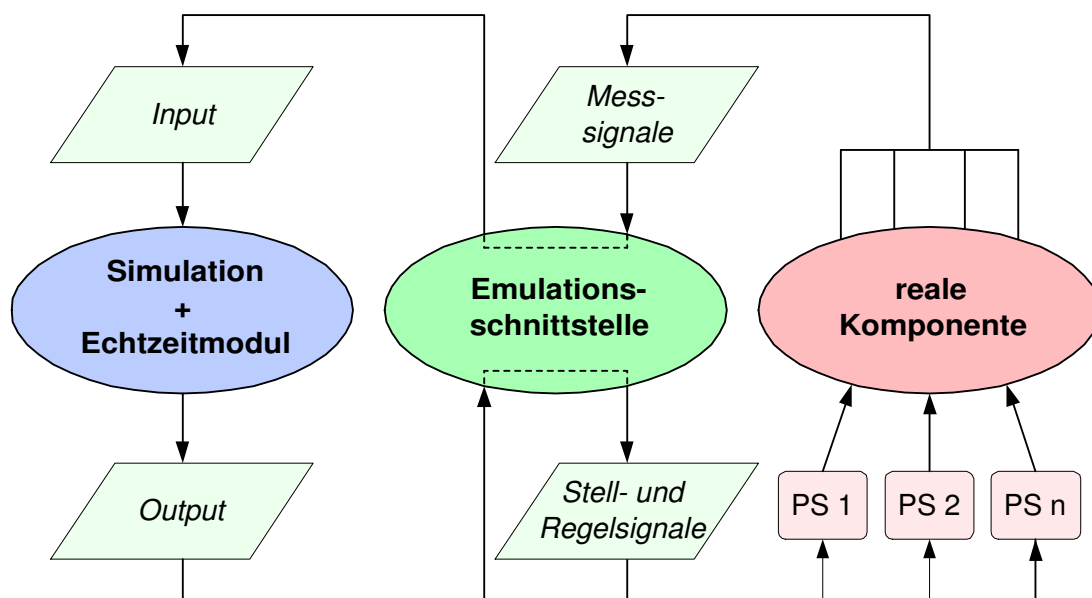


Bild 5.1: Prinzipieller Aufbau und Betriebsablauf von Emulatoren

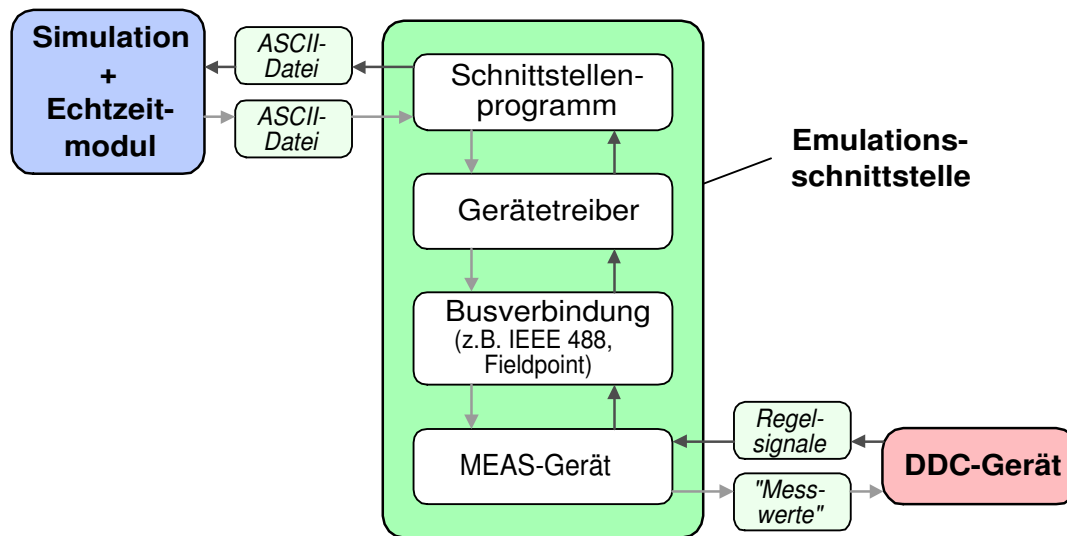


Bild 5.2: Aufbau und Funktionsweise der neuen Emulationsschnittstelle am Beispiel eines DDC-Geräts

physikalischen Größen umgewandelt. Bei der Emulation eines DDC-Geräts bestehen diese Größen beispielsweise aus Strömen und Spannungen, bei einer Kesselemulation dagegen im Wesentlichen aus Wassertemperaturen und -strömen. Die Größen, die sich an den Ausgängen der betrachteten Komponente aus den mit Hilfe der physikalischen Schnittstellen angelegten Umgebungsbedingungen ergeben – bei einem DDC-Gerät sind dies Regel- und Stellsignale –, werden erfasst, im Schnittstellenprogramm aufbereitet und als „Inputs“ der Simulation zur Verfügung gestellt (siehe Bild 5.1). Die „Datenübertragung“ von der realen Komponente zur Simulation wird ebenfalls mit Hilfe des bereits erwähnten Messwerterfassungs- und -ausgabesystems durchgeführt.

In den meisten bestehenden Emulatoren wie z.B. beim VITE-BEMS-Emulator [8] sind die beiden Funktionselemente Echtzeitsimulation und Emulationsschnittstelle in einem Funktionsblock zusammengefasst. Das bedeutet, dass auch die Steuerung der Emulationsschnittstelle fest in die Simulation integriert ist. Für den Einsatz der Testprozeduren wirkt sich der daraus resultierende hohe Aufwand für die Konfiguration sowie für Veränderungen an der Emulationsschnittstelle nachteilig aus. Letztlich sind bei diesem Aufbau die in Bezug auf die Testprozeduren an die virtuelle Testumgebung gestellten Hauptanforderungen – große Flexibilität und einfache Konfiguration – nicht erfüllt.

5.2.2 Datenstruktur der Emulationsschnittstelle

Das für die neue Emulationsschnittstelle zugrunde gelegte Konzept ist in Bild 5.2 dargestellt. In diesem Konzept werden die in Kapitel 4.4.2 beschriebenen Anforderungen der Testprozeduren an die virtuelle Testumgebung (siehe Tabelle 4.2) berücksichtigt. Der Hauptunterschied der neuen virtuellen Testumgebung zu bereits bestehenden Emulatoren

besteht darin, dass die Elemente „Simulation mit integriertem Echtzeitmodul“ und „Emulationsschnittstelle“ jeweils als eigenständige Funktionseinheiten ausgeführt sind. Die beiden Elemente werden mit Hilfe von Schnittstellendateien, die als ASCII-Dateien mit einem definierten Format ausgeführt sind, miteinander verbunden.

Eine der Schnittstellendateien enthält die jeweils aktuellen Informationen, die von der Simulation an die reale Komponente übertragen werden müssen. Diese Datei wird mit Hilfe einer im Echtzeitmodul der Simulation integrierten Routine ständig neu geschrieben und von der Emulationsschnittstelle eingelesen. Die andere Datei enthält die zur gleichen Zeit an der realen Komponente gemessenen physikalischen Werte. Diese Datei wird in umgekehrter Weise von der Emulationsschnittstelle geschrieben und von der Simulation in jedem Zeitschritt neu eingelesen. Um die Dateigröße dieser Schnittstellendateien – und damit die Zugriffszeit auf diese – möglichst klein zu halten, werden beide Dateien für jeden Zeitschritt stets neu geschrieben. Die Datenübergabe mit Hilfe von standardisierten ASCII-Dateien hat den Vorteil, dass dadurch nahezu jedes Simulationsprogramm in die virtuelle Testumgebung integriert werden kann. Die Simulationsprogramme müssen lediglich um ein Echtzeitmodul, mit dem die Simulation verlangsamt wird, erweitert werden. Die Möglichkeit, ASCII-Dateien zu lesen und zu schreiben, ist bei den meisten Simulationsprogrammen gegeben.

Um die in Tabelle 4.2 aufgelisteten Anforderungen an die virtuelle Testumgebung vollständig zu erfüllen, wird die Gesamtfunktion der Emulationsschnittstelle in vier separate Funktionsblöcke aufgeteilt (siehe Bild 5.3).

Im ersten Block werden die von der Simulation in Zahlenform in eine ASCII-Datei ausgegebenen Sollwerte in Stellsignale für die physikalischen Schnittstellen transformiert. Die Signale werden über ein standardisiertes Datenbussystem an die physikalischen Schnittstellen übertragen (siehe Bild 5.2). Dadurch, dass ein standardisiertes Bussystem verwendet wird, ist die Emulationsumgebung ohne größeren Aufwand beliebig erweiterbar.

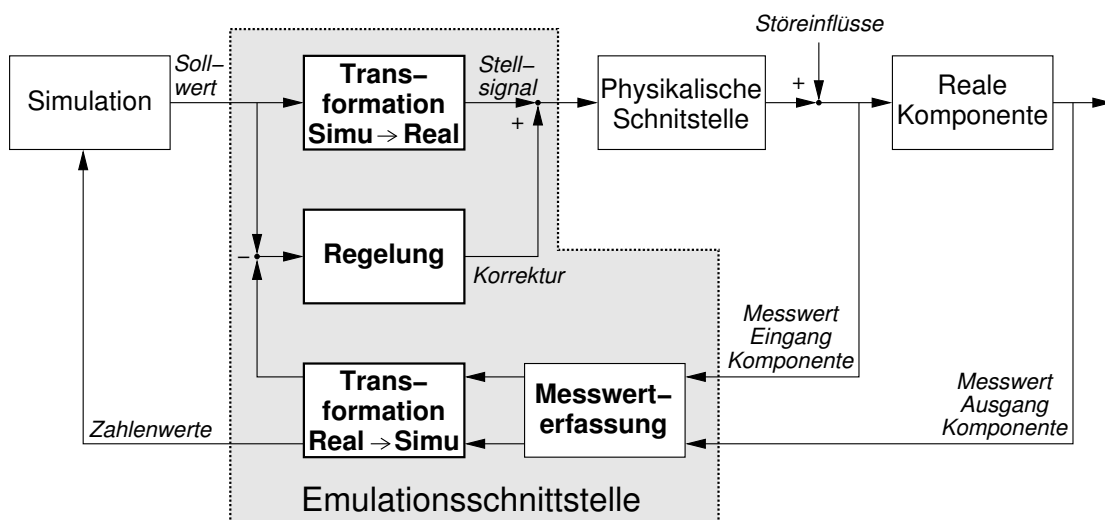


Bild 5.3: Funktionsblöcke innerhalb der Emulationsschnittstelle

Zudem ist es auf diese Weise möglich, in der Emulationsumgebung Stellorgane bzw. Datenausgabegeräte verschiedener Hersteller einzusetzen und miteinander zu verknüpfen.

Mit der Regelung der physikalischen Schnittstelle, die den zweiten Funktionsblock der Emulationsschnittstelle darstellt, wird sichergestellt, dass die von der Simulation ausgegebenen Werte möglichst genau an die realen Komponente angelegt werden. Falls zwischen physikalischer Schnittstelle und realer Komponente Störeinflüsse auftreten, wird das vom ersten Funktionsblock ausgegebene Stellsignal mit Hilfe der Regelung korrigiert (siehe Bild 5.3). Für die Emulation von DDC-Geräten hat dieser Funktionsblock eine untergeordnete Bedeutung, da hier die Stellsignale direkt als physikalische Eingangsgrößen (Strom- und Spannungssignale) für die emulierte Komponente verwendet werden. Von Bedeutung ist die Regelung der physikalischen Schnittstellen vor allem dann, wenn Simulationswerte in reale physikalische Größen wie Temperaturen oder Massenströme umgesetzt werden müssen.

Der dritte Funktionsblock der Emulationsschnittstelle beinhaltet die Erfassung von Messwerten an der realen Komponente. Hierbei werden zum einen die für die Simulation als Eingangsgrößen benötigten Werte, die in der Regel am Ausgang der zu testenden Komponente anliegen, gemessen. Zum anderen werden auch alle am Eingang der realen Komponente anliegenden Größen erfasst, die für die Regelung der physikalischen Schnittstellen benötigt werden.

Aufgabe des vierten Funktionsblocks ist die Aufbereitung und Transformation der in der Emulationsschnittstelle erfassten Messdaten in Zahlenwerte. Die Zahlenwerte werden in die von der Simulation zu lesende ASCII-Datei geschrieben.

Das Simulationsprogramm und das für die Emulationsschnittstelle benötigte Programm können bei einfachen Emulatoren mit geringen Anforderungen in Bezug auf die erforderliche Rechenleistung, auf einem Rechner gleichzeitig und parallel betrieben werden, wenn dieser mit einem multitasking-fähigen Betriebssystem (z.B. Windows NT) ausgestattet ist. Bei aufwendigeren Simulationsmodellen, aber auch bei einer größeren Anzahl von zu übertragenden Daten ist es sinnvoll, beide Programme getrennt auf zwei miteinander vernetzten Rechnern zu betreiben.

5.3 Technische Umsetzung

5.3.1 Aufbau des Emulationsversuchsstands

Der auf der Grundlage des beschriebenen Konzepts gebaute Emulator (siehe Bild 5.4) kann bezüglich der verwendeten Geräte in drei Bereiche unterteilt werden. In Bereich A befindet sich das zu testende DDC-Gerät mit den Automationsfunktionen, während in Bereich B die Datenerfassungsgeräte des Messwerterfassungssystems montiert sind. Im Bereich C befindet sich je ein PC für die Simulation sowie für die emulationsspezifischen Programme.

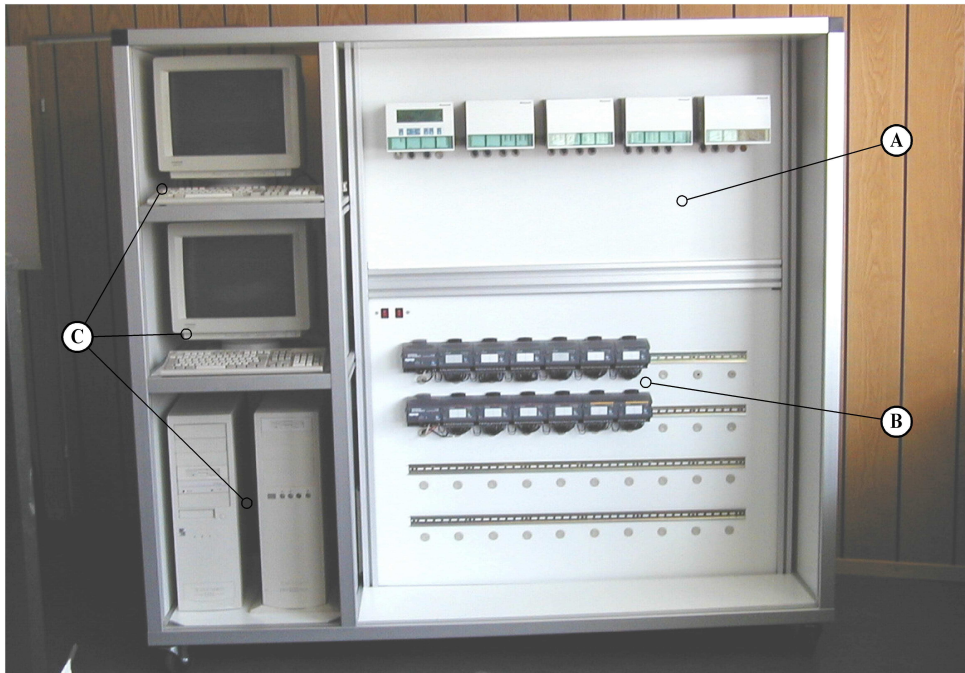


Bild 5.4: Frontansicht des neuen Emulationsversuchsstands

Um der Anforderung nach einer einfachen und schnellen Einbindung von Regelungssystemen verschiedener Hersteller zu genügen, ist das DDC-Gerät im Bereich A (siehe Bild 5.5) auf einer auswechselbaren Platte montiert. Diese Platte kann auf einfache Weise nach oben herausgezogen werden.

Das DDC-Gerät wird auf der Rückseite des Emulationsversuchsstands über Kabel mit den Datenerfassungsgeräten verbunden (siehe Bild 5.6 und 5.7). Dabei werden vorgefertigte Steckverbindungen verwendet. Die frei beweglichen Stecker befinden sich auf der Seite des zu untersuchenden DDC-Geräts. Die Steckbuchsen der Kabelverbindung sind dagegen mit den Geräten des Messwerterfassungs- und -ausgabesystem verbunden und fest in einem Rahmen an der Rückseite des Emulationsversuchsstands montiert. Dies ermöglicht es, die zu untersuchenden DDC-Systeme bereits vorab zu verkabeln. Die so vorbereiteten Regelungssysteme werden dann auf einfache und schnelle Weise in den Emulationsversuchsstand integriert, indem die Platte im Bereich A ausgetauscht (Bild 5.4) und die Steckverbindungen auf der Rückseite geschlossen werden (Bild 5.7).

Die Anforderung nach einer hersteller- und systemunabhängigen Erweiterbarkeit der Hardware der Messwerterfassung und -ausgabe ist weitgehend dadurch gegeben, dass für die

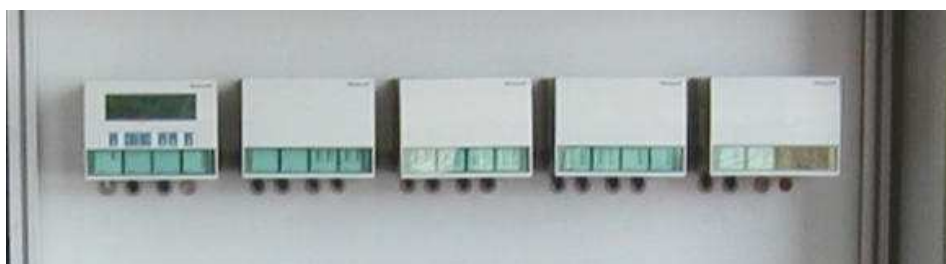


Bild 5.5: Auf dem Emulationsversuchsstand installiertes DDC-Gerät



Bild 5.6: Rückansicht des neuen Emulationsversuchsstands

Programmierung der Emulationsschnittstelle und die Ansteuerung der MEAS-Geräte das Programmpaket LabVIEW [42] verwendet wird (siehe Kapitel 5.3.2). Dieses Paket beinhaltet Treiber für nahezu alle gängigen Datenerfassungs- und -ausgabesysteme.

Für die Datenerfassungsgeräte des Emulationsversuchsstands wird aufgrund der einfachen Konfigurierbarkeit für verschiedene Datenpunktarten das modular aufgebaute Fieldpoint-System der Firma National Instruments [44] verwendet (siehe Bild 5.4, Bereich B, und

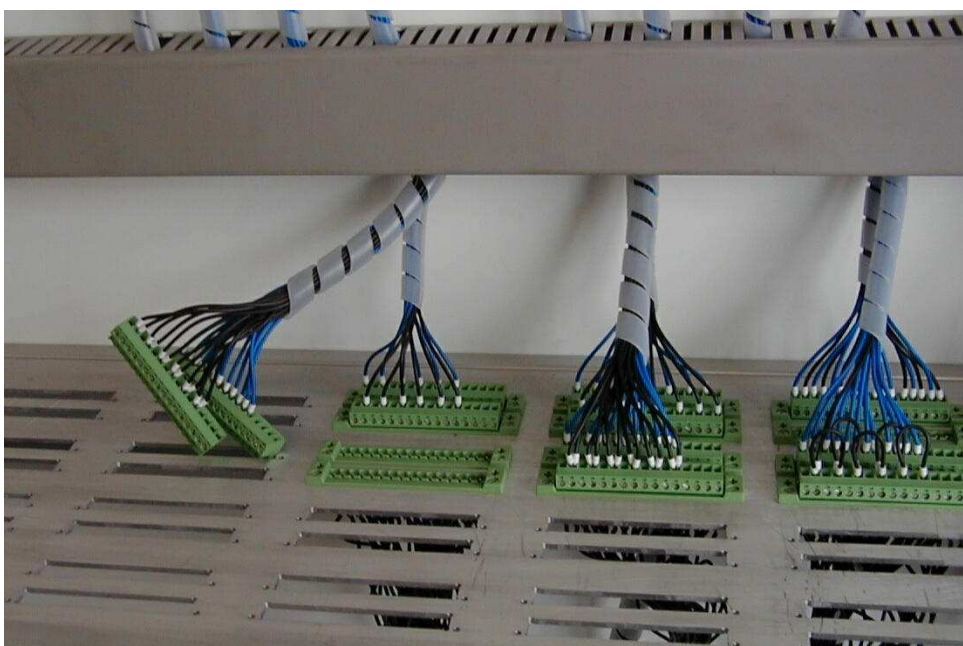


Bild 5.7: Steckverbindung zwischen DDC- und MEAS-Geräten

Bild 5.8). Mit diesem System ist es möglich, alle bei einem DDC-System auftretenden Datenpunktarten wie analoge Ein- und Ausgänge sowie digitale Ein- und Ausgänge zu verarbeiten. Bei den analogen Signalen lässt sich zudem – falls erforderlich – per Software der Ein- bzw. Ausgabebereich der Signale anpassen.

Beim Fieldpoint-System werden die einzelnen Datenerfassungs- und -ausgabegeräte (Bild 5.8, B) als Module auf fest installierte und verdrahtete Sockel (Bild 5.8, C) aufgesteckt. Daher kann die Messwerterfassung jederzeit an veränderte Anforderungen bezüglich Art und Anzahl der Datenpunkte angepasst werden. Hierzu werden lediglich einzelne Module ausgetauscht bzw. hinzugefügt. Die Fieldpoint-Module werden mit Hilfe des Programms „Fieldpoint-Explorer“ konfiguriert. Dieses Programm legt die Einstellungen für die einzelnen Module in einer Datei ab, auf die dann die Programme, die die Hardware ansteuern, zugreifen. Diese Programme werden in Kapitel 5.3.2 näher beschrieben.

Bis zu 9 Fieldpoint-Geräte können über eine gemeinsame Steuereinheit (Bild 5.8, A) betrieben werden. Die Steuereinheiten werden vom Emulations-PC angesteuert und geregelt. Für die Ansteuerung bzw. Datenübertragung stehen zwei verschiedene Bussysteme zur Verfügung. Für mittlere Anforderungen bezüglich Datenmenge und Übertragungsgeschwindigkeiten reicht eine Verbindung über die serielle RS-232-Schnittstelle des Computers aus. Bei sehr großen Datenmengen bzw. Übertragungsgeschwindigkeit besteht auch die Möglichkeit, eine TP-Ethernet-Verbindung zu verwenden. Hierzu müssen lediglich die Steuereinheiten ausgetauscht werden.

Die notwendige Rechenleistung, die die verwendeten Computer (siehe Bild 5.4, Bereich C) erbringen müssen, resultiert vor allem aus den Anforderungen der Simulation und der Datenübertragung innerhalb der Emulationsschnittstelle. Die Simulation der virtuellen Testanlage muss zum einen mit sehr kleinen Zeitschritten ablaufen, um eine möglichst detaillierte virtuelle Abbildung der realen Vorgänge zu erreichen. Zum anderen muss die

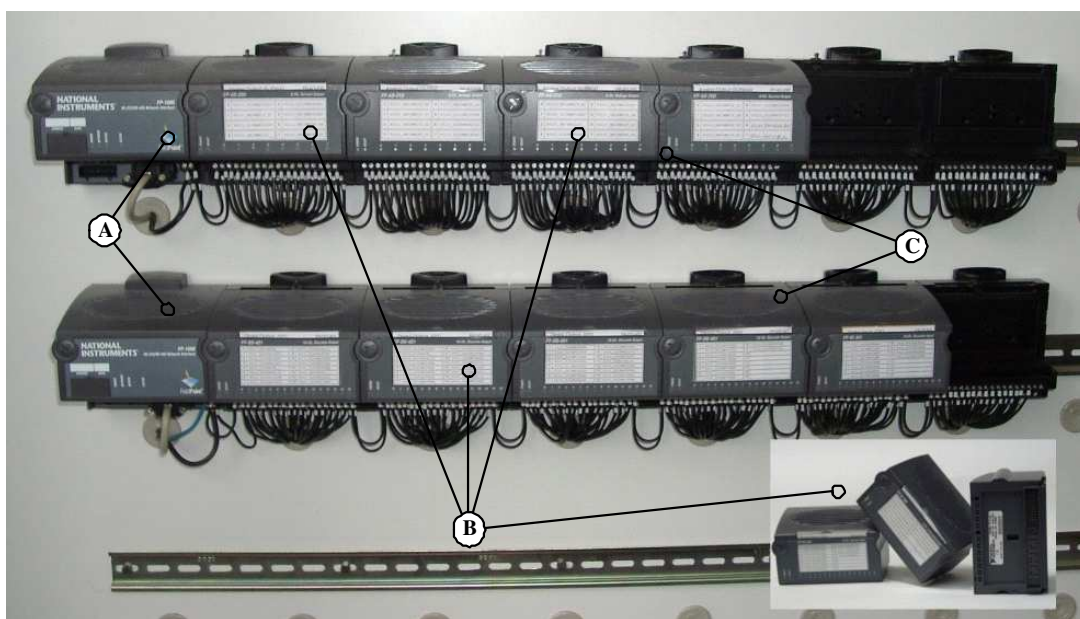


Bild 5.8: Fieldpoint-System zur Datenerfassung und Datenausgabe

Simulation stets schneller ablaufen als in der Realität, da in jedem Zeitschritt die Daten zwischen Simulation und realer Komponente ausgetauscht werden müssen. Für den hier beschriebenen Emulationsversuchsstand werden sowohl für die Simulation als auch für das Messwerterfassungs- und -ausgabesystem zwei vernetzte Pentium II 266 MHz PCs verwendet. Beide PCs werden mit dem multitasking-fähigen Betriebssystem Windows NT 4.0 betrieben.

5.3.2 Programmierung der Emulationsschnittstelle

Bei der Programmierung der Emulationsschnittstelle stehen neben der Umsetzung der in Kapitel 5.2.2 beschriebenen Funktionen eine möglichst einfache Konfigurierbarkeit (um möglichst kurze Rüstzeiten zu erreichen) sowie eine gute Bedienbarkeit des gesamten Versuchsstandes im Vordergrund. Um diese Ziele zu erreichen, werden die verschiedenen Aufgabenbereiche, die in der Emulationsschnittstelle umzusetzen sind, in eigenständigen Modulen implementiert [43]. Die Aufgabenbereiche, die von den verschiedenen Modulen ausgeführt werden, sind im Folgenden zusammengefasst:

- Konfiguration des Emulationsversuchsstandes,
- Datenerfassung, Verarbeitung der Datenströme und Datenausgabe,
- manuelles Setzen von Testsignalen für die Testprozeduren,
- grafische Visualisierung der übertragenen Daten,
- Aufzeichnung von einzelnen Datenkanälen in einer Log-Datei.

Der modulare Aufbau und der Ablauf des Programms der Emulationsschnittstelle sind in Bild 5.9 dargestellt. Die einzelnen Module sind jeweils durch eine gepunktete Umrahmung hervorgehoben.

Bevor eine Emulation gestartet wird, muss sie mit Hilfe eines Konfigurationsmoduls an den jeweiligen Anwendungsfall angepasst werden. Hierbei werden das Messdatenerfassungs- und -ausgabesystem (MEAS) eingestellt, die Datenkanäle für den Informationsaustausch zwischen Simulation und DDC-Gerät konfiguriert sowie die Dateipfade für die Schnittstellen und die Log-Dateien eingegeben. Die Konfigurationsdaten werden in Dateien abgelegt, die beim eigentlichen Start der Emulation in einem Initialisierungsprozess eingelesen werden.

Nach dem Einlesen der Konfigurationsdaten beginnt die eigentliche Emulation, die in Form einer Schleife abläuft. Mit dem Modul zur Datenerfassung, -verarbeitung und -ausgabe werden zunächst die Ausgabesignale der Simulation aus der entsprechenden Schnittstellendatei sowie die Regelsignale des emulierten DDC-Geräts über das Messdatenerfassungs- und -ausgabesystem in die Datenkanäle der Emulationsschnittstelle eingelesen. Die Daten werden verarbeitet und schließlich an die Messdatenausgabe und die entsprechende Datei mit den Eingabedaten für die Simulation ausgegeben.

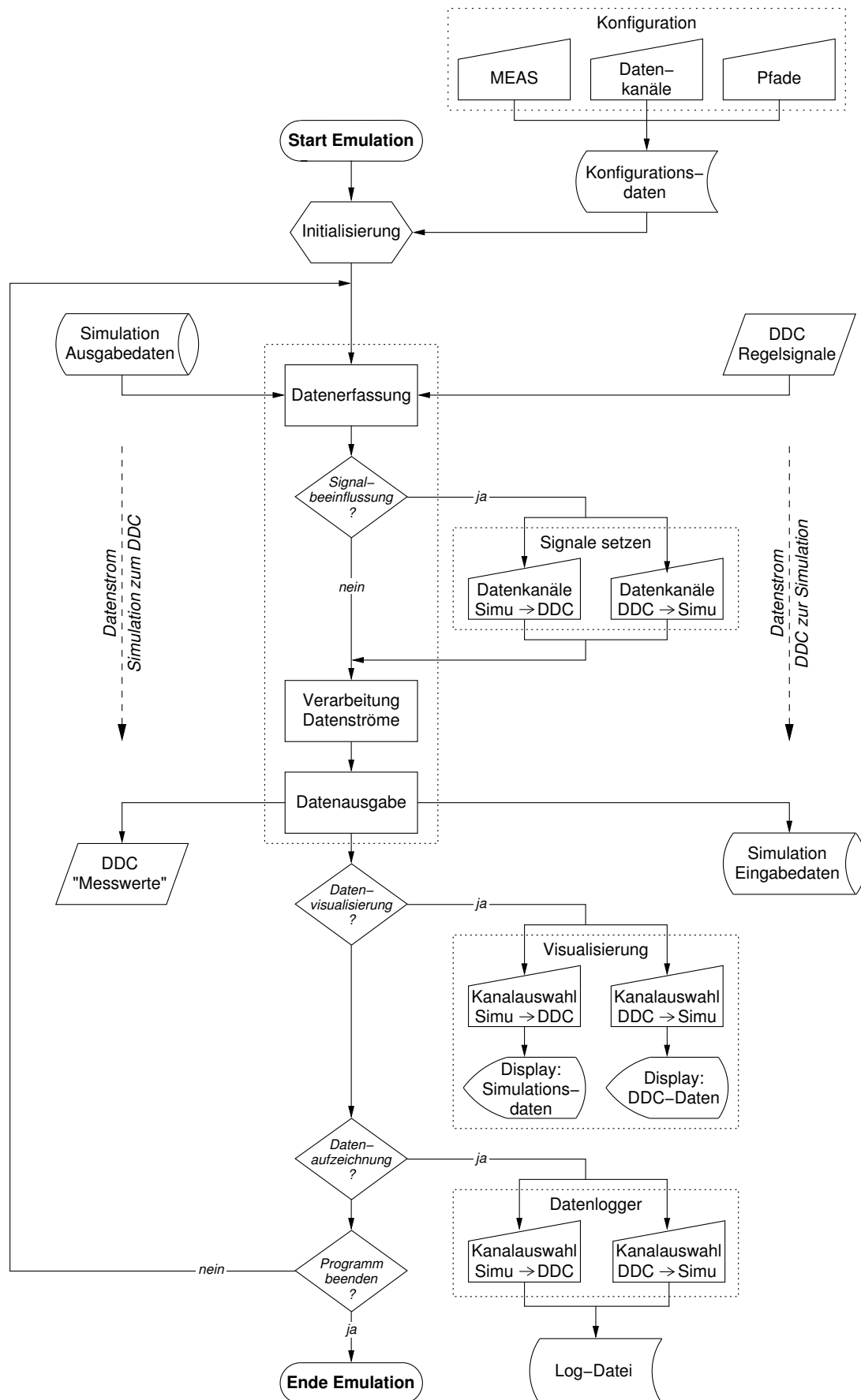


Bild 5.9: Programmaufbau und -ablauf der Emulationsschnittstelle

Bei der Verarbeitung der Daten gehen die Informationen des Moduls, mit dem die in der Emulationsschnittstelle übertragenen Signale verändert werden, ein. Mit Hilfe dieses Moduls können die Signale in den Kanälen der beiden Datenströmen „Simulation zum DDC“ und „DDC zur Simulation“ festgesetzt werden. Auf diese Weise werden gezielt Testsignale wie z.B. Störmeldungen oder manuelle Stellbefehle während einer laufenden Emulation eingebracht. Bei der Verarbeitung der Datenströme werden die Daten in den entsprechenden Datenkanälen durch die eingegebenen Testsignale ersetzt.

Im weiteren Programmverlauf besteht im Modul zur grafischen Visualisierung die Möglichkeit, Datenkanäle der beiden Datenströme „Simulation zum DDC“ und „DDC zur Simulation“ auszuwählen und in grafischen Displays darzustellen. In den grafischen Displays werden dabei immer die verarbeiteten – d.h. bei Testsignalen die gesetzten – Daten angezeigt. Durch die grafische Visualisierung der Datenströme kann so das Verhalten des betrachteten DDC-Geräts schnell analysiert und beurteilt werden.

In entsprechender Weise werden im Datenlogger-Modul die Daten aus beliebigen Kanälen der beiden Datenströme aufgezeichnet. Die dabei generierte Log-Datei kann beispielsweise für spätere Analysen des Geräteverhaltens oder aber auch als Nachweis für eine korrekt umgesetzte Funktion dienen.

Die Emulationsschnittstelle wird in der Programmierumgebung LabVIEW [42] implementiert. Bei dem Programmpaket LabVIEW handelt es sich um eine grafische Programmierumgebung, die zur Steuerung, zur Überwachung sowie zur Erfassung großer Datenströme entwickelt ist. Im Gegensatz zu anderen graphischen Programmierumgebungen wie z.B. Visual Basic [45], bei denen lediglich die Bedienoberfläche der Programme über ein graphisches User Interface (GUI) erstellt wird, wird bei LabVIEW auch der Programmcode in einer grafischen Umgebung erzeugt.

Der Programmcode von LabVIEW beruht auf der grafischen Programmiersprache „G“, bei der die unterschiedlichen Programmbefehle – dargestellt durch Icons mit verschiedenen Anschlüssen – durch „Leitungen“ miteinander verbunden werden. Programme und Unterprogramme in „G“ werden als „Virtual Instruments“ (VIs) bezeichnet, da die graphischen Elemente der Benutzeroberfläche ähnlich aufgebaut sind wie klassische Messinstrumente. Die in den Programmen bzw. VIs enthaltenen Datenfluss-Diagramme werden von einem Interpreter entlang des Datenflusses abgearbeitet oder vom LabVIEW-Compiler in Maschinencode umgewandelt.

Bei der programmtechnischen Umsetzung der Emulationsschnittstelle werden vor allem Funktionen der Datenverarbeitung und -visualisierung (siehe Tabelle 4.2) benötigt. Hierfür steht in LabVIEW eine vielseitige Werkzeug- und Funktionssammlung zur Verfügung, die zudem durch eigene Funktionen beliebig erweitert werden kann. Die in Kapitel 4.4.2 geforderte Herstellerunabhängigkeit bei den verwendeten Datenerfassungsgeräten ist bei LabVIEW ebenfalls gegeben, da für nahezu alle gängigen I/O-Boards im Bereich der Datenerfassung und -verarbeitung Treiber zur Verfügung stehen. Zusätzlich benötigte Treiber können zudem auf relativ einfache Weise programmiert und angepasst werden.

Die einzelnen Funktionen der mit LabVIEW erstellten Emulationsschnittstelle werden über die in Bild 5.10 dargestellte Bedienkonsole der virtuellen Testumgebung aufgerufen. Die Konsole ist – entsprechend dem Ablauf bei einer Überprüfung von Automationsfunktionen in der virtuellen Testumgebung – in die vier Bereiche „Konfiguration Datenfluss“, „Start-Stopp“, „Signalbeeinflussung“ und „Grafische Darstellung“ unterteilt. Beim Betrieb der virtuellen Testumgebung wird zwischen den zwei Betriebsmodi „Konfiguration“ und „Emulationsbetrieb“ unterschieden. Auf der Bedienkonsole immer nur die für den jeweiligen Modus relevanten Schaltflächen aktiv und bedienbar. Die jeweils anderen Schaltflächen erscheinen schattiert. Der jeweilige Betriebsstatus der virtuellen Testumgebung wird im unteren Bereich der Bedienkonsole angezeigt (siehe Bild 5.10).

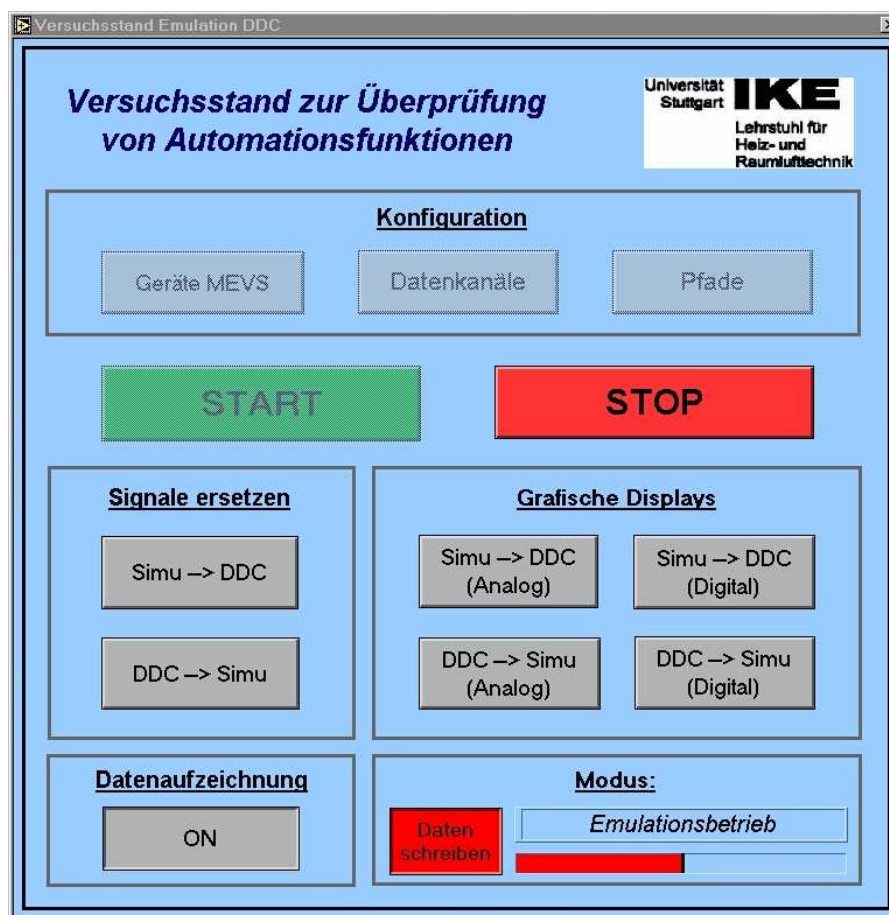


Bild 5.10: Bedienkonsole der Emulationsschnittstelle

Im Bereich „Konfiguration Datenfluss“ der Bedienkonsole werden zuerst die Geräte des Messwerterfassungs- und -ausgabesystems konfiguriert. Hierzu wird über die Schaltfläche „Geräte MEAS“ ein Konfigurationsprogramm (Fieldpoint Explorer [44]) aufgerufen. Über dieses Programm werden die einzelnen Ein- und Ausgabemodule des Messwerterfassungs- und -ausgabesystems erfasst und konfiguriert. Die gerätebezogenen Einstellungen dieser Module werden von dem Unterprogramm in einer Datei abgelegt. Die in dieser Datei enthaltenen Informationen zur Ansteuerung der Ein- und Ausgabemodule werden vom Programm der Emulationsschnittstelle automatisch übernommen.

Als nächstes wird über die Schaltfläche „Datenkanäle“ eine Eingabemaske zur Konfiguration der Datenkanäle, mit deren Hilfe der für die Emulation notwendige Informationsfluss zwischen Simulation und DDC-Gerät hergestellt wird (siehe Bild 5.11), aufgerufen. Beim Aufruf der Maske werden automatisch Name und Pfad einer Datei, in der bereits Konfigurationsdaten für die virtuelle Testumgebung vorliegen oder in die sie geschrieben werden sollen, abgefragt und anschließend angezeigt. Die eingegebenen Daten werden beim Verlassen der Maske in jedem Fall gesichert.

Um die einzelnen Datenströme innerhalb der Emulationsschnittstelle zu identifizieren und zu verwalten, werden die Datenkanäle durchnummeriert (siehe Bild 5.11, *Kanal-Nr.*). Die Nummerierung wird in der gleichen Reihenfolge, in der die Datenpunkte des DDC-Geräts mit den physikalischen Ein- bzw. Ausgänge der MEAS verbunden sind, durchgeführt. Die Anzahl der Datenpunkte, die über die Eingabemaske definiert werden kann, ist nicht begrenzt. Bei einer größeren Anzahl von Datenpunkten kann in der Maske mit Hilfe der Zeilen- und Spaltenangaben navigiert werden.

Kanal-Nr.	DP-Bezeichnung (DDC)	Beschreibung	Wertetyp	Signal Min-Wert	Signal Max-Wert	Steigung (Korrektur)	Offset (Korrektur)	Einheit	I/O (MEVS) Min-Wert	I/O (MEVS) Max-Wert
1	80L01_DL05MW01KLAU	Rückmeldung Stellgröße	Ana_KL	0	1	1	0	%	0,004	0,02
2	80L01_DM16MW01F_MI	Mischlufttemperatur	NTC_1	-50	150	1	0	C	0	0,02
3	80L01_DL26MW05LKR	Rückmeldung Stellgröße Ventil	Ana_Amp	1	0	1	0	V	0	0,02
4	80L01_DM13MW02LK__	Rücklauftemperatur Kühler	NTC_1	-50	126,5	1	0	C	0	0,02
5	80L01_DL22MW08LHRV	Rückmeldung Stellgröße Ventil	Ana_Amp	1	0	1	0	V	0	0,02
6	80L01_DM13MW03LHNE	Rücklauftemperatur Erhitzer	NTC_1	-50	150	1	0	C	0	0,02
7	80L01_DM25MW09F_AB	Feuchte Abluft	Ana_Amp	0	100	1	0	%rF	0	0,02
8	80L01_DM23MW04F_ZU	Feuchte Zuluft	Ana_Amp	0	100	1	0	%rF	0	0,02
9	80L01_DM07MW06F_AB	Ablufttemperatur	NTC_1	-50	150	1	0	C	0	0,02
10	80L01_DM05MW05F_ZU	Zulufttemperatur	NTC_1	-50	150	1	0	C	0	0,02
11	80L01_DM33MW07F_AB	Druck im Abluftkanal	Ana_Amp	0	1000	1	0	Pa	0	0,02
12	80L01_DM33MW06F_ZU	Druck im Zuluftkanal	Ana_Amp	0	1000	1	0	Pa	0	0,02
13	80L01_DM01MW10F_AU	Außenlufttemperatur	NTC_1	-50	150	1	0	C	0	0,02
14	80L01_DL01MW12FUAB	Rückmeldung Stellgröße FU	Ana_KL	0	1	1	0	%	0,004	0,02
15	80L01_DL00MW09FUZU	Rückmeldung Stellgröße FU	Ana_KL	0	1	1	0	%	0,004	0,02

Bild 5.11: Maske für die Konfiguration der Datenkanäle der Testumgebung

Für jeden Kanal innerhalb der Emulation wird zunächst die Bezeichnung des jeweiligen DDC-Datenpunkts (*DP-Bezeichnung*) sowie eine kurze *Beschreibung* zu diesem angegeben. Anschließend wird die Datenpunktart über die Größe *Wertetyp* definiert. Die Datenpunktarten, die in der Emulationsschnittstelle zur Verfügung stehen, sind in Tabelle 5.1 aufgelistet. Der Bereich, den die Werte des Signals des zu konfigurierenden Datenkanals annehmen können, wird über die Größen *Signal Min-Wert* und *Signal Max-Wert* angegeben. Die *Einheit* der am jeweiligen Datenpunkt übertragenen Daten ist eine weitere

Tabelle 5.1: Datenpunktarten in der Emulationsschnittstelle

Datenpunktart	Beschreibung
Ana_volt	analoges Ein- oder Ausgangssignal 0 – 10 V
Ana_amp	analoges Ein- oder Ausgangssignal 0 – 20 mA
NTC_1	Eingangssignal eines NTC-Temperaturfühlers
Digi	digitales Ein- oder Ausgangssignal

Größe, die bei der Konfiguration der Datenkanäle anzugeben ist. Geringfügige Abweichungen zwischen den in der virtuellen Testumgebung und den vom DDC-Gerät angezeigten Werten (z.B. aufgrund einer Kaltlötstelle in der Verdrahtung am Versuchsstand), werden über die Größen *Steigung (Korrektur)* und *Offset (Korrektur)* auf einfache Weise korrigiert. Als letzte Konfigurationsgrößen werden noch Informationen zu den Bereichen der an den Ein- und Ausgabegeräten der MEAS anliegenden oder auszugebenden elektrischen Signale (mA oder V) benötigt. Dieser Bereich wird in der Konfigurationsmaske mit Hilfe der Größen *I/O (MEAS) Min-Wert* und *Max-Wert* festgelegt.

Die Konfigurationsdaten, die mit der in Bild 5.11 dargestellten Eingabemaske erfasst werden, sind in Textdateien abgelegt. Die Einstellungen für die einzelnen Datenkanäle werden dabei – durch Tabulatoren getrennt – in jeweils eine Zeile geschrieben. Aufgrund des einfachen Textformats können die Konfigurationsdaten für die Datenkanäle auch außerhalb der Emulationsschnittstelle generiert oder zumindest vorbereitet werden, wenn z.B. ein Teil der benötigten Konfigurationsdaten bereits in Tabellenform vorliegt.

Nach der Konfiguration der Datenkanäle müssen noch über die Schaltfläche „Pfade“ die Verzeichnisse für die Konfigurations- sowie für die beiden ASCII-Dateien, über die DDC-Gerät und Simulation verbunden sind, angegeben werden. Sobald die Konfiguration der virtuellen Testumgebung abgeschlossen ist, kann die Überprüfung des betreffenden DDC-Geräts über die „Start“-Schaltfläche gestartet werden.

Im Betrieb stehen für die Bedienung der virtuellen Testumgebung in der Bedienkonsole der Emulationsschnittstelle die zwei Bereiche „Grafische Displays“ und „Signalbeeinflussung“ zur Verfügung. Bei der grafischen Visualisierung der während einer Emulation übertragenen Größen wird zwischen Datenrichtung (Simulation zu DDC und umgekehrt) und zwischen digitalen und analogen Signalen unterschieden (siehe Bild 5.10). Die Displays dienen vor allem dazu, während eines Emulationslaufs die Reaktionen von virtueller Anlage und DDC-Gerät anzuzeigen, wenn die in diesem implementierten Automationsfunktionen untersucht und überprüft werden.

In jedem der Displays wird der Verlauf der Daten aus bis zu 16 Datenkanälen angezeigt. Während bei den analogen Signalen alle Daten in einem einzigen Grafen dargestellt werden (siehe Bild 5.12, oben), besteht das grafische Display für die digitalen Signale aus 16 übereinander angeordneten Grafen (siehe Bild 5.12, unten). Dadurch lassen sich die Schaltzustände der einzelnen Signale stets gleichzeitig beobachten und so beispielsweise

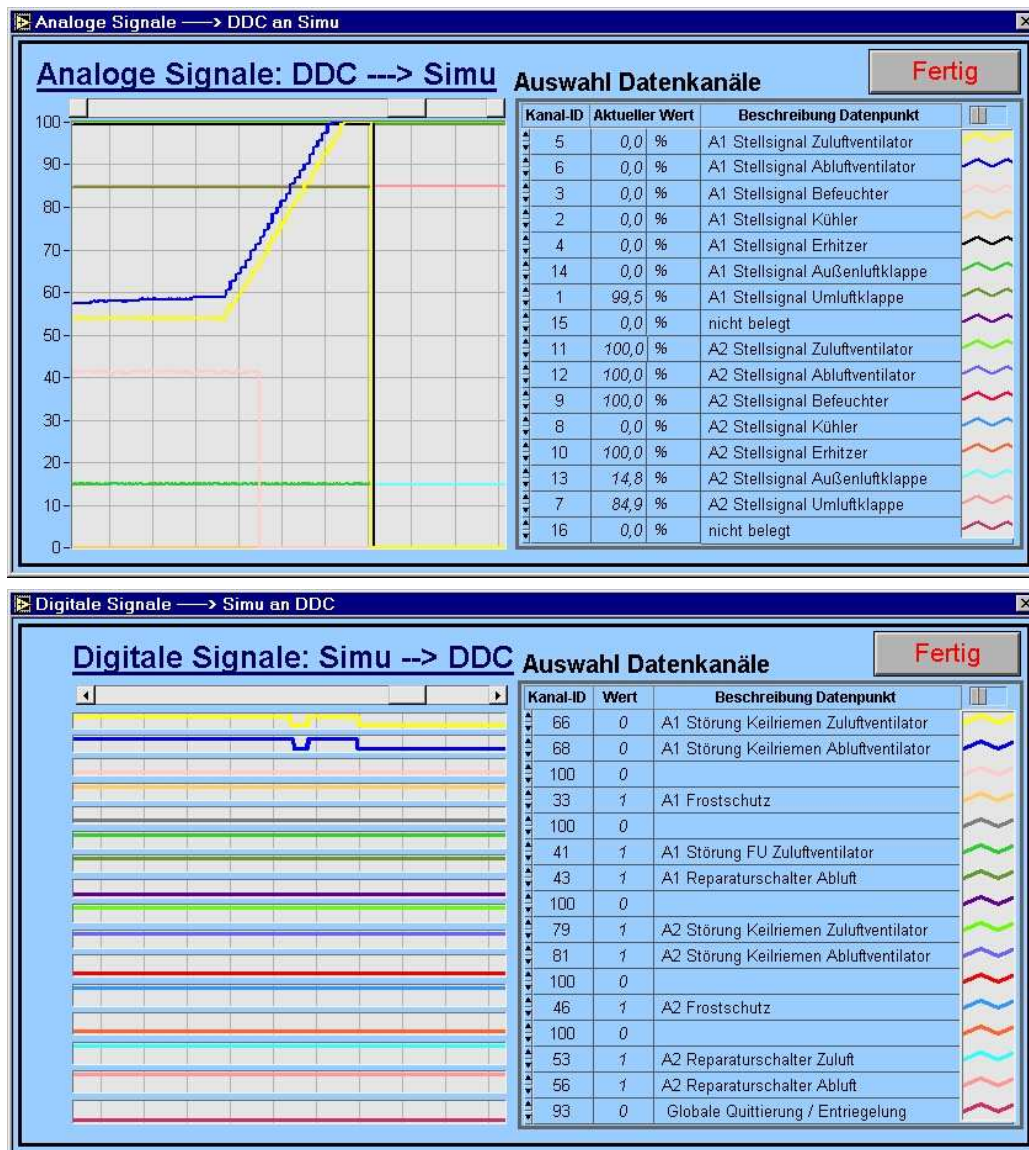


Bild 5.12: Displays zur Darstellung des Verlaufs von analogen und digitalen Größen während des Emulationsbetriebs

die Schaltreihenfolgen von verschiedenen Komponenten direkt ablesen. Die Displays zeigen stets den Verlauf der Signale über die letzten 20 Minuten des aktuellen Emulationslaufs. Über einen Scroll-Balken unterhalb der Grafen ist zusätzlich der gesamte bisherige Verlauf der Daten zu betrachten. Die darzustellenden Datenkanäle werden über die jeweilige in der Konfigurationsmaske zugewiesene Kanal-ID ausgewählt.

Da die Kanal-ID eine interne Größe der Emulationsschnittstelle darstellt, werden zwecks einer besseren Übersichtlichkeit die Bezeichnungen der DDC-Datenpunkte mit angezeigt. Zusätzlich zur grafischen Darstellung des Verlaufs der einzelnen Signale werden auch die jeweils aktuellen Werte für die analogen bzw. die Schaltzustände für die digitalen Signale als Zahlenwerte dargestellt. Bei den Analogsignalen werden zusätzlich die Einheiten der betreffenden Größen angegeben.

Über die Schaltflächen im Bereich „Signalbeeinflussung“ der Bedienkonsole können Werte für einzelne Datenkanäle manuell gesetzt werden. Im Open-Loop-Betrieb der virtuellen

Werte ersetzen

Signale manuell setzen

Zeile:

Kanal ID	Setz-Wert	Set	Akt. Wert	DP-Einheit	DP-Bezeichnung
2	-2,7	●	-2,7	C	80L01_DM16MW01F_MI
7	0,0	●	39,6	%rF	80L01_DM25MW09F_AB
8	0,0	●	39,2	%rF	80L01_DM23MW04F_ZU
9	0,0	●	21,8	C	80L01_DM07MW08F_AB
10	0,0	●	17,8	C	80L01_DM05MW05F_ZU
11	0,0	●	127,2	Pa	80L01_DM33MW07F_AB
12	0,0	●	243,4	Pa	80L01_DM33MW06F_ZU
14	79,0	●	79,0	%	80L01_DL01MW12FUAB
15	85,0	●	85,0	%	80L01_DL00MW09FUZU
1	0,0	●	0,5	%	80L01_DL05MW01KLAU
3	0,0	●	0,0	V	80L01_DL26MW05LKRV
4	0,0	●	16,3	C	80L01_DM13MW02LK_
5	0,0	●	0,0	V	80L01_DL22MW08LHRV
6	-5,0	●	-5,0	C	80L01_DM13MW03LHNE
70	0,0	●	1,0	On/Off	80L01_DL07BM10KLEU
72	0,0	●	1,0	On/Off	80L02_DL05BM04KLAU

Fertig

Bild 5.13: Eingabemaske zum manuellen Ersetzen von Werten in den Datenkanälen

Testumgebung kann auf diese Weise beispielsweise ein bestimmter stationärer Betriebszustand an das zu überprüfende DDC-Gerät angelegt und dessen Reaktion beobachtet werden. Im Closed-Loop-Modus werden mit Hilfe der Signalbeeinflussung z.B. gezielt Stör- oder Alarmmeldungen ausgelöst. Die Signale werden dabei für die beiden Datenflussrichtungen „Simulation zu DDC“ und „DDC zu Simulation“ getrennt gesetzt.

Beim Betätigen der jeweiligen Schaltfläche erscheint eine Eingabemaske, über die alle Signale der betreffenden Datenflussrichtung manuell gesetzt werden können (siehe Bild 5.13). In dieser Maske werden zwar nur die Einstellungen von 16 Kanäle gleichzeitig angezeigt. Über das Eingabefenster *Zeile* kann jedoch in weitere „Einstellzeilen“ navigiert werden.

Um ein Signal manuell zu setzen, wird zunächst über die *Kanal-ID* ein Datenkanal ausgewählt. Sobald ein Kanal ausgewählt ist, wird automatisch der an diesem anliegende *Akt. Wert*, die zugehörige *Einheit* sowie die *Bezeichnung* des zugehörigen DDC-Datenpunkts angezeigt. Die Reihenfolge der Kanal-IDs in den unterschiedlichen Zeilen ist beliebig wählbar und muss nicht fortlaufend sein (siehe Bild 5.13). Anschließend wird der für den Datenkanal zu setzende *Setz-Wert* eingegeben. Gesetzt wird der Wert erst, wenn die entsprechende Schaltfläche in der Spalte *Set* betätigt wird. Sobald ein Wert manuell gesetzt ist, ändert sich die Farbe der Schaltfläche *Set* von grün auf rot. Der *Akt. Wert* sollte stets den gleichen Wert wie der eingestellte *Setz-Wert* anzeigen. Wird der zu setzende Wert in der Eingabe von Fix-Wert geändert, muss die Schaltfläche erneut betätigt werden. Die manuell veränderten Werte bleiben auch dann gesetzt, wenn die Eingabemaske über die Schaltfläche „Fertig“ verlassen wird.

Signale aufzeichnen

Zeile:	Kanal ID	DP-Einheit	DP-Bezeichnung	
DDC → Sim	0	5	%	80L01_DL00ST09FUZU
		6	%	80L01_DL02ST12FUAB
		4	%	80L01_DL22ST08NERV
		2	%	80L01_DL26ST05LKRV
		3	%	80L01_DL32ST07LBFU
		14	%	80L01_DL05ST01KLAU
		1	%	80L01_DL06ST03KLUM
	23	On/Off		80L01_DL00SB09FUZU

Zeile:	Kanal ID	DP-Einheit	DP-Bezeichnung	
Sim → DDC	0	10	C	80L01_DM05MW05F_ZU
		9	C	80L01_DM07MW08F_AB
		13	C	80L01_DM01MW10F_AU
		2	C	80L01_DM16MW01F_MI
		8	%rF	80L01_DM23MW04F_ZU
		7	%rF	80L01_DM25MW09F_AB
		12	Pa	80L01_DM33MW06F_ZU
		11	Pa	80L01_DM33MW07F_AB

Einstellungen

Pfad zur Protokolldatei

Aufzeichnungsintervall:
 sec

Kanalauswahl beibehalten
☐ Ja ☒ Nein ☐ Nein

Steuerung der Datenaufzeichnung

Starten

Anhalten

Beenden

Bild 5.14: Protokollfunktion des Emulationsversuchsstands

Um die Daten auch nach Abschluss der Überprüfung von Funktionen auswerten bzw. um die Ergebnisse der Untersuchungen archivieren zu können, müssen diese aufgezeichnet werden. Hierfür wird in der Bedienkonsole des Emulationsprogramms im Bereich „Datenaufzeichnung“ eine Protokollfunktion aufgerufen (siehe 5.10). Mit dieser Funktion werden die in den jeweiligen Datenkanälen übertragenden Daten aufgezeichnet. Um die Datenmenge in den Protokolldateien zu begrenzen und übersichtlich zu halten, werden über die Eingabemaske der Protokollfunktion die jeweils aufzuzeichnenden Kanäle ausgewählt. Die Kanalauswahl geschieht für die beiden Datenflussrichtungen „DDC → Simulation“ und „Simulation → DDC“ in getrennten Eingabefeldern (siehe Bild 5.14). Die Protokolldaten werden in Form von Tabulator getrennten Tabellen in eine ASCII-Datei geschrieben.

Neben der Kanalauswahl sind noch drei weitere Einstellungen in Bezug auf die Protokollfunktion vorzunehmen. Hierbei wird zunächst der Pfad und der Dateiname der jeweiligen Protokolldatei angegeben. Des weiteren wird über das „Aufzeichnungsintervall“ festgelegt, in welchem zeitlichen Abstand die Daten aufgezeichnet werden. Über den Schalter „Kanalauswahl beibehalten“ wird festgelegt, ob die Kanaleinstellungen für den nächsten Aufruf der Protokollfunktion beibehalten werden sollen oder ob die Kanalauswahl beim Beenden des gegenwärtig laufenden Protokolls zurückgesetzt wird.

Die Protokollfunktion wird über die drei Schaltflächen „Starten“, „Anhalten“ und „Beenden“ gesteuert (siehe Bild 5.14). Über die Schaltfläche „Starten“ wird die Protokolldatei angelegt und die Datenaufzeichnung begonnen. Mit der Schaltfläche „Anhalten“ wird die Aufzeichnung unterbrochen. Die Protokolldatei bleibt dabei geöffnet. Mit „Beenden“ wird die Datenaufzeichnung beendet und die Protokolldatei geschlossen.

6 Simulationsmodelle für die Emulation

6.1 Voraussetzungen

6.1.1 Modellanforderungen in der Emulation

Eine spezielle Anforderung an Simulationsmodelle für eine Emulationsumgebung resultiert aus der Echtzeit, in der jede Emulation aufgrund der Integration der jeweils betrachteten realen Komponente ablaufen muss. Die Rechenzeit, die von der Simulation zur Abbildung der physikalischen Vorgänge innerhalb der die betreffende Komponente umgebenden virtuellen Anlage benötigt wird, muss in jedem Simulationszeitschritt kürzer sein als die Dauer der Vorgänge in einer entsprechenden realen Anlage. Übersteigt die Rechenzeit der Simulation die Echtzeit in einem einzigen Zeitschritt (z.B. aufgrund von Konvergenzproblemen), können die zeitlichen Abläufe der Realität nicht mehr genau genug nachgebildet werden. In diesem Fall muss die Emulation abgebrochen werden.

Die erforderliche Abbildungsgenauigkeit der Modelle ist Gegenstand einer weiteren grundlegenden Anforderung an die Simulation innerhalb einer Emulation. Die Modelle müssen das für die direkte Umgebung der betrachteten realen Komponente relevante Anlagenverhalten so detailliert wiedergeben, das die zu untersuchenden Eigenschaften der betreffenden Komponente nicht durch Abbildungsfehler oder -ungenauigkeiten verfälscht werden. Beispielsweise ist es bei der Untersuchung eines Reglers entscheidend, dass die entsprechende Regelstrecke in ihrem zeitlichen und physikalischen Verhalten sorgfältig nachgebildet wird. In diesem Fall ist selbst bei geringfügigen Abweichungen die Übertragbarkeit der Ergebnisse der Emulation in die Realität nicht mehr gewährleistet.

Bei der Emulation von realen Komponenten basiert die virtuelle Anlagenumgebung in der Regel auf einer existierenden oder zumindest auf einer geplanten realen Anlage. Insbesondere im Fall einer existierenden Anlage ergibt sich hieraus für die Simulationsmodelle die Anforderung, dass sie parametrierbar sein müssen. Durch die Parametrierung der Modelle wird das Verhalten der einzelnen virtuellen Komponenten in der Simulation an das z.B. durch Messungen ermittelte Verhalten ihrer realen „Gegenstücke“ angepasst. Für einen wirtschaftlichen Einsatz der Emulation muss jedoch auch Wert darauf gelegt werden, dass zum einen die Modelle in der Praxis auf möglichst einfache Weise parametriert werden können und dass zum anderen die Anzahl der Parameter möglichst beschränkt bleibt. Die erforderlichen Parameter sollten zudem in den üblicherweise verfügbaren Anlagendaten enthalten sein oder auf einfache Weise (z.B. durch die Messung bestimmter

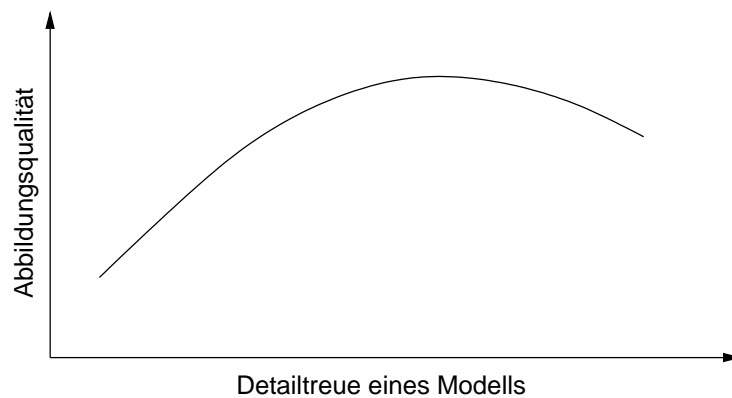


Bild 6.1: Abbildungsqualität bezogen auf die Detailtreue von Simulationsmodellen (schematisch)

Betriebspunkte) ermittelt werden können. Die Forderung nach einer beschränkten Anzahl von Parametern steht dabei nicht unbedingt im Widerspruch zur oben genannten Anforderung an die Genauigkeit der Modelle. Bei detailgetreuen Modellen wird häufig eine Vielzahl von Parametern benötigt. Da bei realen Anlagen erfahrungsgemäß selten alle Parameter für diese Modelle zur Verfügung stehen, werden für die unbekannten Parameter „Defaultwerte“ eingesetzt. Diese Defaultwerte führen jedoch in der Regel wieder zu einer Abnahme der Abbildungsqualität. Ein empirischer Zusammenhang zwischen der Detailtreue und Abbildungsqualität von Simulationsmodellen ist in Bild 6.1 skizziert. Demnach kann die Abbildungsqualität von Modellen optimiert werden, indem die Anzahl der Parameter und damit gewissermaßen die Detailtreue beschränkt werden.

Eine weitere Anforderung an Simulationsmodelle, die in einer Emulation eingesetzt werden, besteht darin, dass sie wahlweise in einer reinen Simulation oder in einer Emulation verwendet werden können. Jede Simulation hat aufgrund von mehr oder weniger willkürlich gewählten Startbedingungen eine so genannte Einschwingphase. Belastbare Aussagen können deshalb bei einer Simulation – und somit auch bei einer Emulation – erst getroffen werden, wenn diese „eingeschwungen“ ist. Für die Emulation bedeutet dies, dass aufgrund der in Echtzeit ablaufenden Vorgänge eine sehr lange Vorlaufzeit vor den eigentlichen Untersuchungen notwendig ist. Eine solche Vorlaufzeit würde jedoch die Wirtschaftlichkeit einer jeden Emulation in Frage stellen. Mit Simulationsmodellen, bei denen von einem reinen Simulations- in einen Emulationsbetrieb umgeschaltet werden kann, lässt sich diese Vorlaufzeit deutlich verkürzen. Mit solchen Modellen besteht die Möglichkeit, die virtuelle Anlage zunächst in einem so genannten Simulationsvorlauf in einen eingeschwungenen Zustand zu bringen und sobald dieser erreicht ist, in den Emulationsbetrieb umzuschalten.

6.1.2 Vorgehensweise bei der Modellierung

Um den in Kapitel 6.1.1 aufgeführten Anforderungen an Simulationsmodelle für die Emulation zu genügen, werden im Rahmen dieser Arbeit Modelle des verwendeten Simulationspakets TRNSYS [23] angepasst und zum Teil neu entwickelt. Im Hinblick auf einen

praktischen und wirtschaftlichen Einsatz der Modelle bei der Überprüfung von Automatisierungsfunktionen wird dabei das Ziel verfolgt, die Anzahl der Eingangsgrößen und Parameter der Modelle auf ein notwendiges Minimum zu beschränken. Aus diesem Grund werden nach Möglichkeit Kennlinienmodelle verwendet [38, 40].

Die Vorgehensweise bei der Entwicklung und -anwendung von Modellen auf der Basis des Kennlinienansatzes ist in Bild 6.2 dargestellt. Bei der Modellentwicklung wird zunächst das prinzipielle Komponentenverhalten durch Messungen an verschiedenen Typen (*I*, *II*, *III*, ...) der betreffenden Komponentenart ermittelt. Das aus diesen Messungen ermittelte Verhalten wird – nach Möglichkeit unter Zuhilfenahme von Wissen über die ursächlichen physikalischen Vorgänge (z.B. Mechanismen der Wärmeübertragung bei Wärmeübertragern) – durch eine oder mehrere allgemeine mathematische Kennlinien mit den charakteristischen Parametern „*A*, *B*, *C*, ...“ beschrieben. Bei Kennlinienmodellen handelt es sich somit um „Grey-Box“-Modelle, da im Gegensatz zu reinen Black-Box-Modellen, Wissen über die physikalischen Vorgänge in den Komponenten in die Modellierung einfließen kann.

Um bei der Modellanwendung eine Komponente *X* zu simulieren, werden die Parameter der Kennlinien den realen Vorgängen angepasst. Die Parameter werden an der betreffenden realen Komponente *X* durch Messungen unter definierten Bedingungen ermittelt. Die Messungen können gegebenenfalls auch im eingebauten Zustand durchgeführt werden. Im Idealfall werden die Messungen zur Parameterbestimmung jedoch bereits vom Hersteller der Komponente durchgeführt und die Parameter mit den Datenblättern der Komponente mitgeliefert.

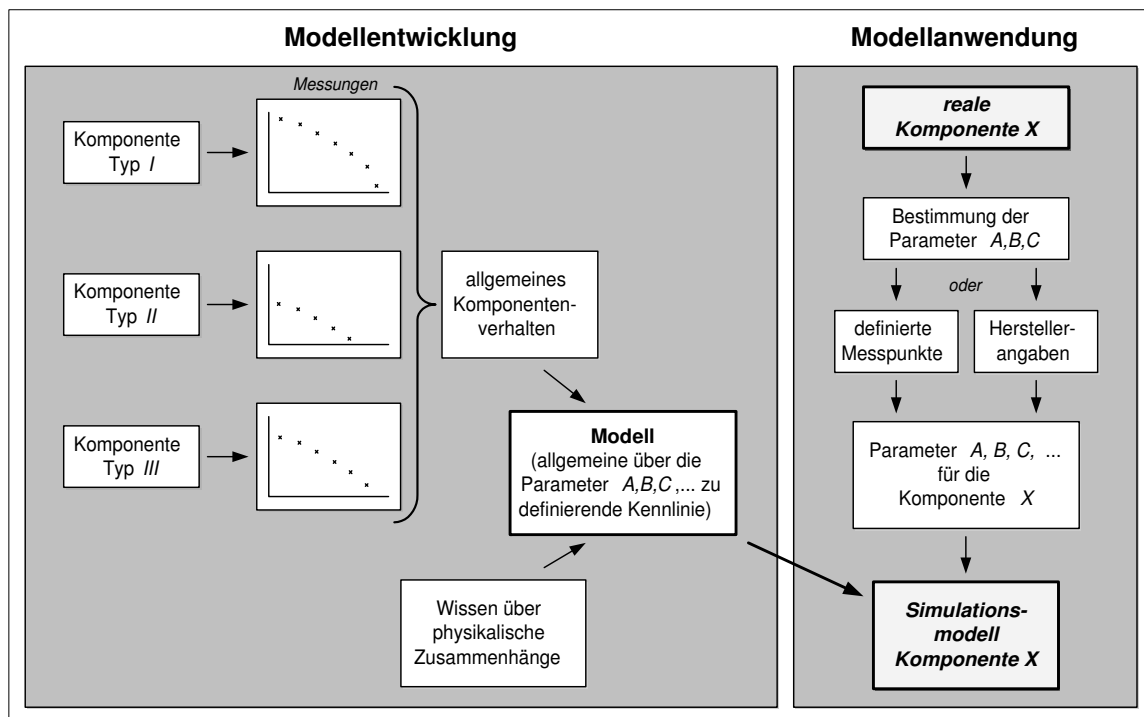


Bild 6.2: Vorgehensweise bei der Entwicklung und Anwendung eines auf dem Kennlinienansatz basierenden Simulationsmodells

Alle in der Emulation verwendeten Modelle werden dahingehend überarbeitet, dass auf einfache Weise zwischen Emulations- und Simulationsbetrieb umgeschaltet werden kann. Hierzu werden alle Komponentenmodelle, die über Regel- und Stellsignale mit der Anlagenregelung verbunden sind, so erweitert, dass sie ohne weitere Bearbeitung der Eingabedatei der Simulation sowohl in einer reinen Simulation als auch für die Emulation in der virtuellen Testumgebung verwendet werden können. Hierzu werden in den betreffenden Modellen alle Eingänge für analoge und digitale Regelsignale doppelt angelegt, so dass für jedes Signal jeweils ein Eingang für den Simulations- und für den Emulationsbetrieb zur Verfügung steht. Dadurch kann die simulierte Anlage entweder von einem Regelungsmodell innerhalb der Simulation oder von einem emulierten realen Regelungssystem gesteuert und geregelt werden. Zwischen der realen und der virtuellen Regelung wird mit Hilfe eines weiteren neu definierten Eingangs umgeschaltet.

Bei Simulationsmodellen, in denen die hydraulischen und thermischen Vorgänge innerhalb einer Anlage in kombinierter Weise berechnet werden, treten häufig hohe Rechenzeiten auf. Bei einer Emulation stehen diese jedoch im Gegensatz zur Forderung nach einer ausreichend schnellen Rechengeschwindigkeit der Simulation. Aus diesem Grund werden die Modelle in Bezug auf die hydraulische und die thermische Berechnung entkoppelt.

Die bei einer Emulation verwendeten Simulationsmodelle können die drei Gruppen „hydraulische“, „thermische“ und „zeitliche“ Modelle eingeordnet werden. Während mit hydraulischen und thermischen Modellen physikalische Vorgänge in den Anlagenkomponenten abgebildet werden, dienen die zeitlichen Modelle dazu, das Zeitverhalten von Anlagenkomponenten nachzubilden. Den zeitlichen Modellen ist auch das Simulationsmodul zugeordnet, mit dem der Ablauf der Emulation in Echtzeit gesteuert wird. Im Folgenden werden für alle drei Gruppen beispielhaft Simulationsmodelle, die im Rahmen dieser Arbeit für die Emulation angepasst und entwickelt wurden, beschrieben.

6.2 Hydraulische Modelle

6.2.1 Verteilsysteme

In bisherigen Simulationsmodellen werden die thermischen und hydraulischen Betriebszustände normalerweise iterativ mit Hilfe eines einzigen Gleichungslösers berechnet (siehe Bild 6.3). Da sich die beiden physikalischen Vorgänge bei der Berechnung gegenseitig beeinflussen, ergibt sich bei offenen Verteilsystemen mit mehreren Strömungsmaschinen (z.B. Zuluft- und Abluftventilator) in der Simulation ein komplexes Gleichungssystem. Insbesondere bei kritischen Betriebszuständen wie z.B. Anfahrvorgängen benötigt der Gleichungslöser häufig eine Vielzahl von Iterationen, um das Gleichungssystem in den einzelnen Simulationszeitschritten zu lösen. Eine hohe Anzahl von Iterationen hat jedoch auch eine hohe Rechenzeit pro Zeitschritt zur Folge. Da insbesondere bei der Emulation von Regelungssystemen die Simulation mit sehr kleinen Zeitschritten – diese liegen im Sekundenbereich – betrieben werden muss, besteht die Gefahr, dass durch eine zu hohe

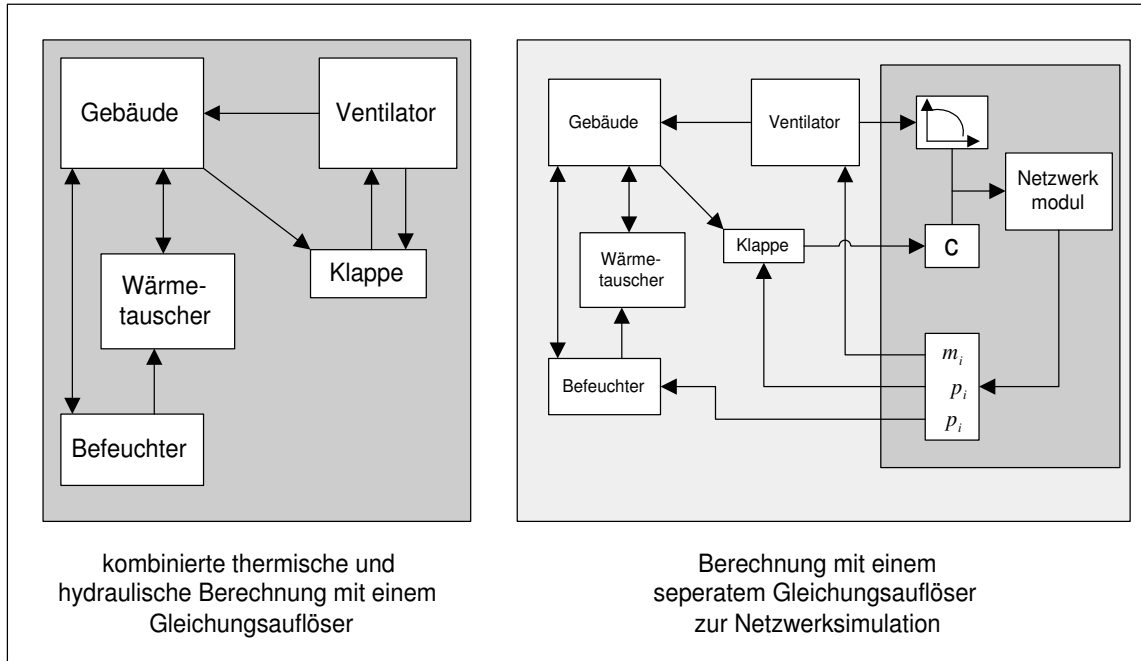


Bild 6.3: Alte und neue Vorgehensweise bei der kombinierten thermischen und hydraulischen Simulation

Anzahl von Iterationen die Rechenzeit der Simulation die von der Emulation geforderte Echtzeit überschreitet. Dies hätte den Abbruch des jeweiligen Emulationsvorgangs zur Folge.

Um Emulationsabbrüche aufgrund von Rechenzeiten, die länger sind als der reale Ablauf in Echtzeit, zu vermeiden, wird für die Emulation von DDC-Geräten ein neues Simulationsmodell erstellt, mit dem ausgedehnte, vermaschte und auch offene Verteilsysteme effektiver berechnet werden können. In dem Modell, das auf der Grundlage der Arbeiten von Stephan zur Berechnung von Heizrohrnetzen [21] beruht, werden die hydraulischen Zustände wie die sich einstellenden Volumenströme und statischen Drücke in einem von der thermischen Berechnung getrennten iterativen Rechengang ermittelt. Der Aufbau des Modells wird im Folgenden beschrieben.

Grundlage für die Berechnung der Strömungsverhältnisse bildet die Einteilung des betrachteten Verteilsystems in Knoten und Elemente. Jedes Element befindet sich dabei stets zwischen zwei Knoten, für die mindestens eine der drei folgenden Randbedingungen gilt:

$$\begin{aligned}
 p &= \text{const.} \\
 \dot{m} &= \text{const.} \\
 \sum_i \dot{m} &= 0
 \end{aligned}
 \tag{6.1}$$

Der in den Randbedingungen verwendete Massenstrom \dot{m} wird im Folgenden durch den Volumenstrom \dot{V} ersetzt, da in den hier betrachteten Luftkanal- und Wasserrohrvertei-

systemen die Dichte ρ des jeweiligen Mediums näherungsweise als konstant angenommen werden kann.

Die Elemente in einem Verteilsystem können in Bezug auf die auftretenden Druckdifferenz in zwei verschiedene Arten unterteilt werden. Bei der ersten Elementart tritt aufgrund des jeweiligen Strömungswiderstands R eine statische Druckdifferenz Δp auf. Diese wird mit Gleichung (6.2) in Abhängigkeit des Volumenstroms \dot{V} berechnet.

$$\Delta p = R \dot{V}^n \quad (6.2)$$

mit $1 < n < 2$ ($n = 2$ für turbulente Strömung)

Die zweite Elementart wird von Strömungsmaschinen wie z.B. Ventilatoren oder Pumpen gebildet. Diese Elemente bewirken – im Gegensatz zur ersten Elementart – eine statische Druckerhöhung $\Delta p_{ström}$. Die Druckerhöhung für die einzelnen Betriebspunkte der Komponenten wird üblicherweise von den Herstellern in Form von Kennliniendiagrammen angegeben. In diesen Diagrammen ist die statische Druckerhöhung $\Delta p_{ström}$ in Abhängigkeit des Volumenstroms $\dot{V}_{ström}$, der Drehzahl $n_{ström}$ und der Baugröße der Strömungsmaschine angegeben. Im hier beschriebenen Modell für Verteilsysteme wird die statische Druckerhöhung mit Hilfe von Gleichung (6.3) berechnet. Diese Gleichung gibt die Kennlinie für einen durch die jeweilige Drehzahl n festgelegten Betriebspunkt wieder.

$$\Delta p_{ström} = p_0 + R_{ström} \dot{V}^2 \quad (6.3)$$

Um für die hydraulischen Widerstände R dieselbe Einheit wie für den Druckabfall Δp zu erhalten, wird \dot{V} mit Hilfe des Einheitsvolumenstroms $\dot{V}_0 = 1 \text{ l/s}$ als dimensionsloser Volumenstrom definiert [46]:

$$\dot{V} = \frac{\dot{V}_{gem}}{\dot{V}_0} \quad (6.4)$$

mit

\dot{V}_{gem} gemessener/berechneter Volumenstrom
 \dot{V}_0 Einheitsvolumenstrom

Schwerkrafteinflüsse, die durch unterschiedliche geometrische Höhen im Kanalsystem hervorgerufen werden, beeinflussen die Strömungsverhältnisse in einem Verteilsystem ebenfalls. Die daraus resultierenden statischen Druckunterschiede Δp_{grav} zwischen den einzelnen Knoten werden im Modell mit Hilfe von Gleichung (6.5) berücksichtigt.

$$\Delta p_{grav} = (p_{geo,li} - p_{geo,re}) \frac{\rho_m}{\rho_{m,ref}} \quad (6.5)$$

mit

$p_{geo,li}$	statischer Druck am linken Elementknoten
$p_{geo,re}$	statischer Druck am rechten Elementknoten
ρ_m	Dichte des Mediums am betrachteten Element
$\rho_{m,ref}$	Dichte an einem definierten Referenzpunkt im Verteilsystem

Mit den Randbedingungen für die Knoten (siehe Gleichung (6.1)) und den Gleichungen (6.2) und (6.3) für die Elemente kann ein Verteilsystem mathematisch mit einem Gleichungssystem zweiter Ordnung beschrieben werden, indem die entsprechenden Bilanzen für alle Knoten aufgestellt werden. Um das resultierende Gleichungssystem numerisch lösen zu können, werden die Elementgleichungen entsprechend der in Gleichung (6.6) beschriebenen Weise im Arbeitspunkt linearisiert.

$$\Delta p = \left(R \dot{V}^{n-1} \right) \dot{V} = R^* \dot{V} \quad (6.6)$$

mit

R^* Ersatzwiderstand im linearisierten
Arbeitspunkt

Das so gewonnene lineare Gleichungssystem (siehe Gleichung (6.7)) wird schließlich iterativ mit Hilfe eines modifizierten Aitken-Algorithmus gelöst.

$$\overline{\overline{A}} \cdot \vec{p} = \vec{V} \quad (6.7)$$

mit

$\overline{\overline{A}}$ Matrix mit Widerstandskoeffizienten
 \vec{p} Vektor mit Druckhöhen
 \vec{V} Vektor mit Volumenströmen

Für die Abbildung der verschiedenen Strömungswiderstände R in einem Verteilsystem (siehe Gleichung (6.2)) besteht im Modell die Möglichkeit, zwischen vier verschiedenen Widerstandsarten zu unterscheiden. Bei der ersten Widerstandsart R_{reib} wird der statische Druckabfall durch Reibungsvorgängen an den Rohr- oder Kanalwandungen verursacht. Rohr- oder Kanalreibungswiderstände werden im Modell nach Gleichung (6.8) berechnet.

$$R_{reib} = \frac{\lambda L}{d_h} \frac{8}{g \pi^2 d_h^4} \quad (6.8)$$

mit

λ	Reibungszahl
L	Rohr- oder Kanallänge
d_h	hydraulischer Durchmesser
g	Fallbeschleunigung

Bei Widerstandselementen („Einzelwiderständen“) wie Filtern, Wärmeübertragern oder Formstücken wird der Widerstand R_{el} mit Hilfe der Parameter Widerstandszahl ζ_{el} und hydraulischer Durchmesser d_h beschrieben:

$$R_{el} = \zeta_{el} \frac{8}{g \pi^2 d_h^4} \quad (6.9)$$

mit

ζ_{el} Widerstandszahl des Elements

Der hydraulische Widerstand R_{komp} von Komponenten, deren Widerstandszahl nicht bekannt oder verfügbar ist, wird mit Hilfe von Gleichung (6.10) bestimmt. Hierzu muss jedoch auch der jeweilige Exponent n der Druckabfallgleichung (6.2) bekannt sein. Als Parameter werden – neben dem Exponenten n – Werte für den Druckabfall und den Volumenstrom in einen beliebigen Arbeitspunkt benötigt.

$$R_{komp} = \frac{\Delta p_{komp,AP}}{\rho_0 g \dot{V}_{komp,AP}^n} \quad (6.10)$$

mit

$\Delta p_{komp,AP}$	Druckabfall im Arbeitspunkt
$\dot{V}_{komp,AP}$	Volumenstrom im Arbeitspunkt
ρ_0	Dichte des Mediums

Eine weitere Art von Einzelwiderständen stellen veränderliche Widerstände R_{var} wie z.B. Stellklappen oder Ventile dar. Diese Widerstände werden durch ihren „ k_v -Wert“ beschrieben (siehe Gleichung (6.11)). Der k_v -Wert entspricht dabei dem Volumenstrom in m^3/h , der sich bei einer Klappen- oder Ventilposition H und einer Druckdifferenz von $\Delta p_0 = 10^5 Pa$ an dem Widerstand einstellt.

$$R_{var} = \frac{\Delta p_0}{\rho_0 g k_v^2} \cdot 3600^2 \quad (6.11)$$

mit

Δp_0	Referenzdruckabfall ($= 10^5 Pa$)
k_v	Volumenstrom bei Δp_0 und Ventilstellung H

Der für Gleichung (6.11) benötigte k_v -Wert wird im Modell ausgehend von der jeweiligen Klappen- oder Ventilposition H mit Hilfe von vorgegebenen Schließkennlinien berechnet. Dabei kann zwischen Kennlinien mit linearem und gleichprozentigem Schließverhalten unterschieden werden. Beide Kennlinien werden mit Hilfe der Parameter $k_{v,S}$ -Wert und $k_{v,0}$ -Wert beschrieben. Der $k_{v,S}$ -Wert gibt dabei den Volumenstrom an, der sich an einer vollständig geöffneten Klappe bzw. Ventil und einem daran anliegenden Differenzdruck von $\Delta p_0 = 10^5 Pa$ einstellt. Der $k_{v,0}$ -Wert gibt den Durchfluss bei gleichem Differenzdruck und geschlossenem Stellorgan wieder.

Bei einer linearen Kennlinie wird der k_v -Wert abhängig von der aktuellen Klappenstellung H nach Gleichung (6.12) berechnet:

$$k_v = k_{v,0} + H(k_{v,S} - k_{v,0}) \quad (6.12)$$

mit

$k_{v,S}$	Volumenstrom bei vollständig geöffneter Klappe und $\Delta p_0 = 10^5 Pa$
$k_{v,0}$	Volumenstrom bei vollständig geschlossener Klappe und $\Delta p_0 = 10^5 Pa$
H	Klappenstellung

Für Klappen oder Ventile, deren Schließverhalten mit einer gleichprozentigen Kennlinie annähern lässt, gilt Gleichung (6.13).

$$k_v = k_{v,0} e^{-\ln \frac{k_{v,S}}{k_{v,0}} H} \quad (6.13)$$

Die Ein- und Ausgabegrößen, die für das Verteilsystemmodell benötigt werden bzw. von diesem ausgegeben werden, sind in Bild 6.4 dargestellt. Das zu simulierende Verteilsystem wird mit Hilfe einer Eingabedatei konfiguriert. In dieser Datei sind alle Parameter, die zur Beschreibung der Elemente in den Gleichungen (6.8) bis (6.13) benötigt werden, sowie die Randbedingungen für die Knoten enthalten. Die Datei, die nur zu Beginn der Simulation eingelesen wird, ist über den Parameter LU (Logical Unit) mit dem Simulationskern verbunden. Mit Hilfe eines zweiten Parameters wird das Medium (Luft oder Wasser), das in dem Verteilsystem fließt, bestimmt.

Die für das Simulationsmodell benötigten Inputs sind in zwei Arten unterteilt. Zuerst werden die Klappenpositionen H_n für die einzelnen Stellorgane n eingegeben. Anschließend folgen für jede im Verteilsystem definierte Strömungsmaschine k jeweils vier Wertepaare ($\Delta p_{k,i}$, $\dot{V}_{k,i}$ mit $i = 1 \dots 4$). Mit diesen Wertepaaren wird die für den jeweiligen Betriebspunkt gültige Kennlinie eingelesen.

Die Ausgabegrößen des Modells bestehen aus den sich an den einzelnen Elementen einstellenden Massenströmen \dot{m}_{el} , den zugehörigen statischen Druckdifferenzen Δp_{el} und den absoluten Drücken p_{el} vor dem jeweiligen Element.

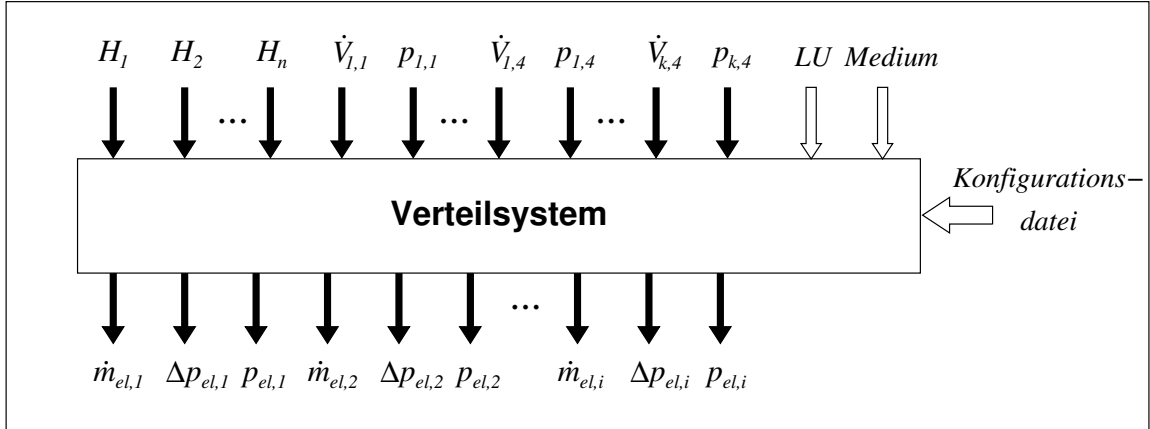


Bild 6.4: Ein- und Ausgabegrößen des Modells für Verteilsysteme

6.2.2 Strömungsmaschinen

Das Simulationsmodell zur Berechnung des Verhaltens von Strömungsmaschinen wie Ventilatoren und Pumpen basiert auf einem Kennlinienmodell von Madjidi [38]. Da die Druckerhöhung und die Leistungsaufnahme von Ventilatoren oder Pumpen nicht exakt ableitbar sind, wird das Betriebsverhalten von Strömungsmaschinen in diesem Modell mit Hilfe von Kennlinien nach DIN 24163 [47] beschrieben. In dieser Norm werden die Druckerhöhung Δp und der Wirkungsgrad η der betrachteten Komponente in Abhängigkeit des geförderten Volumenstroms \dot{V} und der Drehzahl n beschrieben.

Diese Zusammenhänge werden im Modell mit den biquadratischen Polynomgleichungen (6.14) und (6.15) wiedergegeben.

$$\Delta p = c_1 n^2 + c_2 n + c_3 n \dot{V} + c_4 \dot{V} + c_5 \dot{V}^2 + c_6 \quad (6.14)$$

$$\eta = d_1 n^2 + d_2 n + d_3 n \dot{V} + d_4 \dot{V} + d_5 \dot{V}^2 + d_6 \quad (6.15)$$

Die Koeffizienten c_1 bis c_6 und d_1 bis d_6 werden bei Madjidi innerhalb des Modells mit Hilfe von linearen Gleichungssystemen für die beiden Gleichungen (6.14) und (6.15) berechnet. Die Gleichungssysteme werden mit Werten für Δp , η , \dot{V} und n aus sechs verschiedenen Arbeitspunkten, die als Parameter in das Modell eingegeben werden, gebildet. Die Arbeitspunkte werden dabei den Herstellerunterlagen bzw. den Kennliniendiagrammen der jeweiligen Komponente entnommen. Sofern von der betrachteten Komponente gemessene Betriebsdaten für verschiedene Arbeitspunkte vorliegen, können auch diese als Parameter für das Modell verwendet werden. Die Genauigkeit, mit der das reale Betriebsverhalten vom Modell nachgebildet wird, hängt bei Madjidi sehr stark von der richtigen Auswahl sowie von der Genauigkeit, mit der die Arbeitspunkte bestimmt werden, ab. Aufgrund der geringen Anzahl von sechs Stützpunkten wirken sich selbst kleine Abweichungen sehr stark auf die Abbildungsqualität des Modells aus.

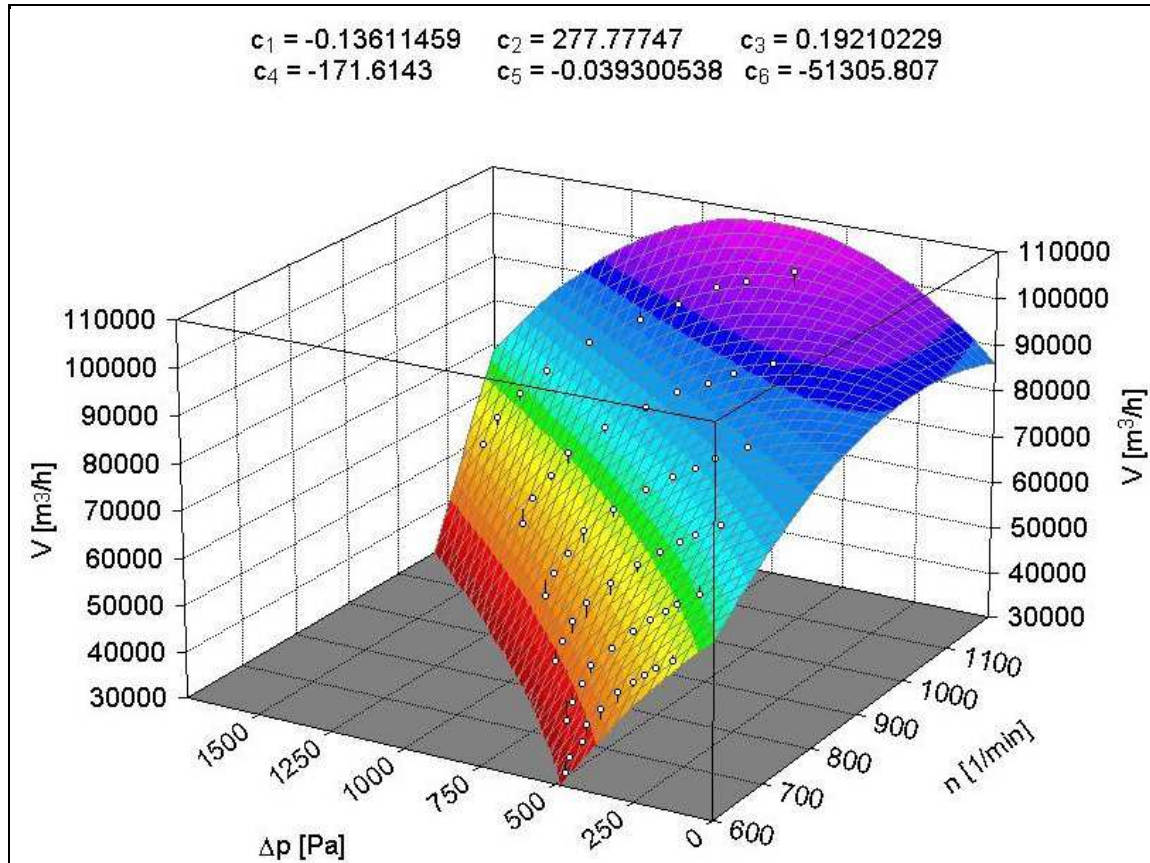


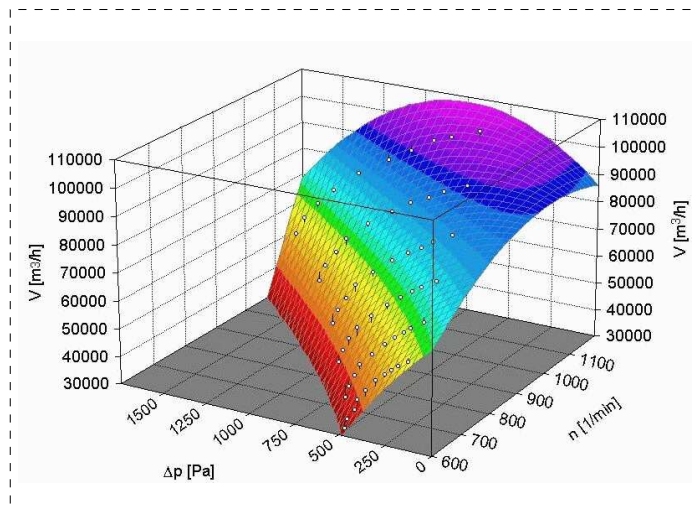
Bild 6.5: Kennlinienfeld eines Ventilators (erstellt mit TableCurve 3D)

Um eine möglichst hohe Genauigkeit für die Wiedergabe des jeweiligen Kennlinienfelds zu erreichen, muss das Modell für den Einsatz in der Emulationsumgebung verbessert werden. Deshalb werden die Koeffizienten der Gleichungen (6.15) und (6.15) nicht mehr aus einer limitierten Anzahl von Arbeitspunkten innerhalb des Modells berechnet. Die benötigten Koeffizienten werden aus einer beliebigen Anzahl von Arbeitspunkten vorab mit Hilfe des Curve-Fitting-Programms TableCurve 3D [48] bestimmt und direkt als Parameter in das Simulationsmodell eingegeben.

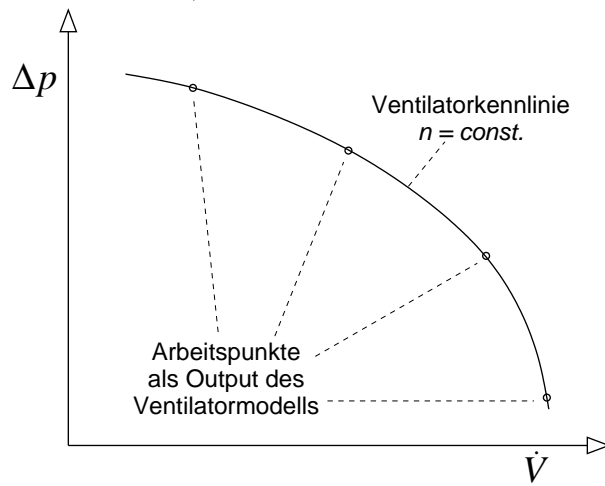
Hierzu werden aus dem Kennliniendiagramm des Herstellers systematisch Arbeitspunkte ausgelesen. Die Genauigkeit der Koeffizienten – und damit des Simulationsmodells – steigt mit der Anzahl der verwendeten Arbeitspunkte. In Bild 6.5 sind die Koeffizienten für einen Ventilator sowie das zugehörige dreidimensionale Kennlinienfeld als Ausgabe des Programms TableCurve 3D dargestellt. Die in Bild 6.5 dargestellte Kennlinienfläche wurde mit 50 aus dem Kennliniendiagramm des Ventilatorherstellers ausgelesenen Arbeitspunkten bestimmt.

Eine weitere grundlegende Änderung des Modells für Ventilatoren und Pumpen betrifft die Berechnung der sich jeweils in der Anlage einstellenden Betriebspunkte des Systems „Strömungsmaschine-Verteilssystem“ sowie der zugehörigen Druckerhöhung Δp und des Volumenstroms \dot{V} am Ventilator bzw. Pumpe. Diese werden entsprechend der in Kapitel 6.2.1 beschriebenen Entkopplung von hydraulischer und thermischer Berechnung im

a) Ventilatormodell



↓ Output

b) Kennlinie ($n = \text{const.}$)

↓ Input

c) Verteilsystemmodell

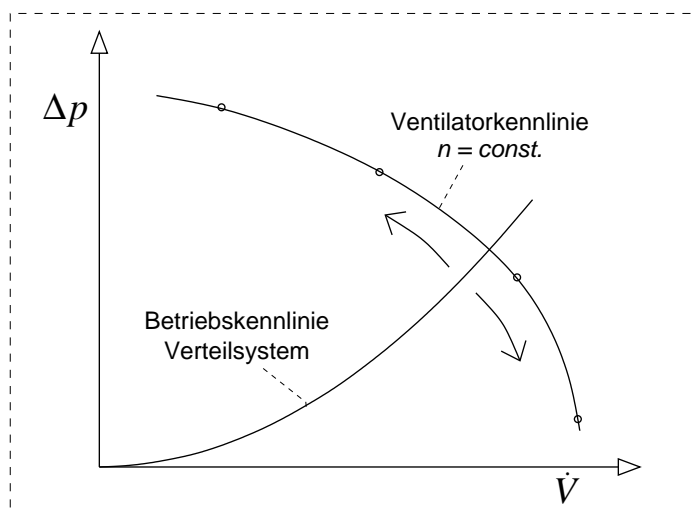


Bild 6.6: Verbindung von Ventilator- und Verteilsystemmodell

eigenständigen Verteilsystemmodell ermittelt. Um den Betriebspunkt des Verteilsystems und damit die Druck- und Volumenstromverhältnisse in allen Systemteilen zu berechnen, benötigt dieses Modell als Eingangsgröße die für die eingestellte Drehzahl n gültige Betriebskennlinie der Strömungsmaschine. Der Betriebspunkt ist definiert als der Schnittpunkt von Förderkennlinie und Widerstandskennlinie des Verteilsystems, die sich aus den Einzelwiderständen ergibt (siehe Bild 6.6c).

Die Betriebskennlinie der jeweiligen Strömungsmaschine wird im Modell für die jeweils vorgegebene Ventilator- bzw. Pumpendrehzahl n aus dem durch die Gleichungen (6.15) und (6.15) bestimmten Kennlinienfeld abgeleitet. Die für die Drehzahl n gültige Kennlinie wird parametrisiert, indem in dieser an vier definierten Stützpunkten die Volumenströme \dot{V} und die Druckerhöhungen Δp ermittelt werden. Diese Stützpunkten werden schließlich an das Verteilsystemmodell übergeben (siehe Bild 6.6).

Die für das Modell für Strömungsmaschinen benötigten Eingangs- und Ausgangsgrößen sowie die Parameter des Modells sind in Bild 6.7 dargestellt. Die Parameter für das überarbeitete Modell bestehen aus den jeweils sechs Koeffizienten c_1 bis c_6 und d_1 bis d_6 für die Definition der Kennlinienfelder $\Delta p = f(\dot{V}, n)$ und $\eta = f(\dot{V}, n)$ sowie aus der Angabe des Drehzahlbereichs n_{min} bis n_{max} des Ventilators bzw. der Pumpe. Einen weiteren Parameter stellt die Zeitkonstante T_1 dar, über die das zeitliche Verhalten der Strömungsmaschinen bzw. deren Reaktion auf Veränderungen des Stellsignals eingestellt wird. Die Eingangsgrößen des Modells sind die Temperatur ϑ_{ein} und der Feuchtegehalt x_{ein} des geförderten Mediums sowie der Absolutdruck p_{ein} am Eintritt der Strömungsmaschine und die jeweils eingestellte Drehzahl n . Die gegenwärtig anliegende Druckerhöhung Δp geht ebenfalls als Input in das Modell ein.

Die Ausgabegrößen bestehen – neben den Zustandsgrößen des geförderten Mediums ϑ_{aus} , x_{aus} und p_{aus} – aus den vier Wertepaaren von Δp und \dot{V} , mit denen die für die eingestellte Drehzahl n gültige Δp - \dot{V} -Kennlinie beschrieben wird.

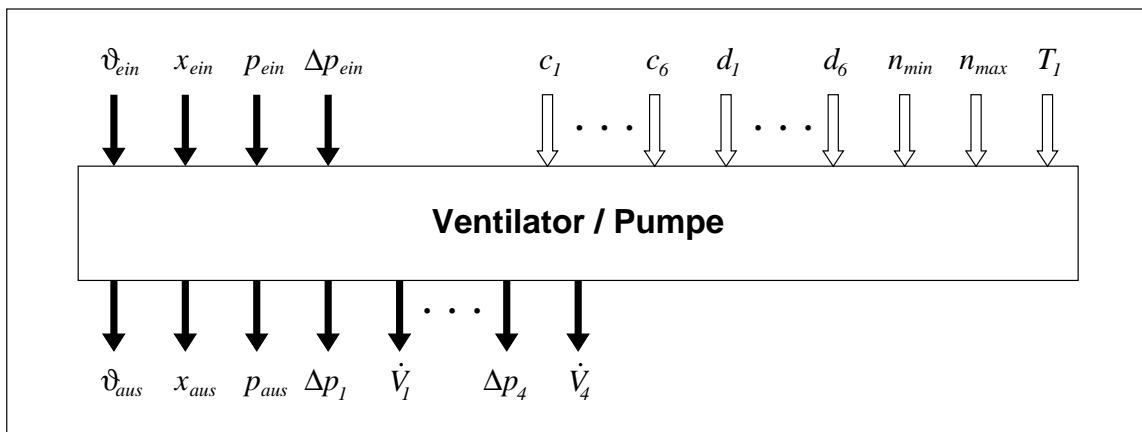


Bild 6.7: Ein- und Ausgabegrößen des Ventilator- bzw. Pumpenmodells

6.3 Thermische Modelle

6.3.1 Wärmeübertrager

Für die Modellierung von Luft-Wasser-Wärmeübertragern stehen die zwei verschiedenen Modellansätze Geometriemodell [49] und Kennlinienmodell [38] zur Verfügung. Die Ansätze unterscheiden sich neben der Art und Weise, in der das thermische Verhalten eines Wärmeübertragers nachgebildet wird, auch in Bezug auf die zur Konfiguration benötigten Parameter. Beim Geometriemodell wird das thermische Verhalten mit Hilfe von empirischen Gleichungen, in die im Wesentlichen geometrische Abmessungen des Wärmeübertragers (z.B. Kanalgröße, Rohr- und Rippenlänge) eingehen, berechnet. Da diese Größen bei jedem Wärmeübertrager fest vorgegeben sind, lassen sich Geometriemodelle bei Ungenauigkeiten in der Abbildung nicht an das reale Verhalten anpassen. Zudem sind häufig nicht alle notwendigen Parameter verfügbar, da die erforderlichen teilweise sehr ins Detail gehenden Angaben wie z.B. Rippendicke, häufig nicht in den Herstellerunterlagen angegeben werden. Eine Abbildung des realen Betriebsverhaltens von Wärmeübertragern ist deshalb mit diesen Modellen selten möglich.

Beim Kennlinienmodell dagegen basieren die notwendigen Eingabeparameter auf dem realen Verhalten der jeweils vorliegenden Wärmeübertrager. Die erforderlichen Kennlinienparameter können beispielsweise durch Prüfstandsversuche (z.B. Typprüfungen nach VDI 2076 [50]) oder auch durch Feldmessungen an den bereits eingebauten Komponenten bestimmt werden. Madjidi verwendet für die Abbildung der Kennlinien – ähnlich wie bei den Ventilatoren – auch bei Wärmeübertragern eine biquadratische Polynomgleichung [38]. Die Kennlinie beschreibt dabei den empirischen Zusammenhang zwischen der so genannten Abkühlzahl Φ_1 bzw. der Aufwärmzahl Φ_2 und den luft- und wasserseitigen Massenströmen \dot{m}_L und \dot{m}_W . Für Wärmeübertrager ist eine quadratische Gleichung als Kennlinie nur bedingt geeignet, da das physikalische Verhalten dieser Komponenten eher einen exponentiellen Verlauf hat. Eine quadratische Funktion kann, wenn überhaupt, nur mit einer großen Anzahl von gemessenen Betriebspunkten an das reale Betriebsverhalten angepasst werden.

Um die Anzahl der für die Modellbildung benötigten gemessenen Betriebspunkte zu reduzieren, wird deshalb im Rahmen dieser Arbeit ein neues Kennlinienmodell für die Simulation von Wärmeübertragern entwickelt. Dem in Bild 6.2 dargestellten Ansatz folgend wird dabei für die Definition der Kennlinie Wissen über die physikalischen Zusammenhänge bei der Wärmeübertragung in Wärmeübertragern verwendet.

Der in einem festen Betriebspunkt eines Wärmeübertragers übertragene Wärmestrom \dot{Q} lässt sich mit Hilfe von Gleichung (6.16) berechnen. Die mittlere Übertemperatur $\Delta\vartheta_m$ wird dabei direkt aus den gemessenen Ein- und Austrittstemperaturen der beiden in einem Wärmeübertrager fließenden Medien bestimmt. Die Kenngröße für den Wärmedurchgang kA lässt sich dagegen nur indirekt und nur für den jeweiligen Betriebspunkt bestimmen, da der kA -Wert keine konstante Größe ist.

$$\dot{Q} = kA \Delta\vartheta_m \quad (6.16)$$

mit

\dot{Q}	Wärmestrom
k	Wärmedurchgangskoeffizient
A	wärmeübertragende Fläche
$\Delta\vartheta_m$	mittlere Temperaturdifferenz

Um den kA -Wert für einen bestimmten Betriebspunkt zu bestimmen, wird die Wärmeleistung \dot{Q} mit Hilfe des Massenstroms \dot{m} und der Ein- und Austrittstemperatur ϑ_{ein} und ϑ_{aus} eines der beiden Medienströme ermittelt (siehe Gleichungen (6.17) und (6.18)):

$$\dot{Q} = \dot{m} c_p (\vartheta_{ein} - \vartheta_{aus}) \quad (6.17)$$

mit

\dot{m}	Massenstrom
c_p	spezifische Wärmekapazität
ϑ_{ein}	Eintrittstemperatur
ϑ_{aus}	Austrittstemperatur

Der kA -Wert (abgeleitet aus dem Quotienten $\dot{Q}/\Delta\vartheta_m$ in Gleichung (6.18)) ist stets nur für einen bestimmten Arbeitspunkt gültig.

$$kA = \frac{\dot{Q}}{\Delta\vartheta_m} \quad (6.18)$$

Um die übertragene Wärmeleistung eines Wärmeübertragers in einem Simulationsmodell kontinuierlich bestimmen zu können, muss in diesem der Verlauf des kA -Wertes über den gesamten Betriebsbereich abgebildet werden. Deshalb wird im Folgenden eine Kennlinie für den kA -Wert sowie ein Verfahren für die Bestimmung der zugehörigen Parameter am Beispiel eines Luft-Wasser-Wärmeübertragers abgeleitet. Die Ausgangsdefinition des kA -Wertes für Wärmeübertrager ist:

$$\frac{1}{kA} = \frac{1}{\alpha_L A_L} + \frac{1}{\lambda F^*} + \frac{1}{\alpha_W A_W} \quad (6.19)$$

mit

α_L	luftseitiger Wärmeübergangskoeffizient
A_L	wärmeübertragende Fläche luftseitig
λ	Wärmeleitwiderstand im Wärmeübertrager
F^*	Formkoeffizient

α_W	wasserseitiger Wärmeübergangskoeffizient
A_W	wärmeübertragende Fläche wasserseitig

Der Kehrwert des kA -Wertes setzt sich demnach zusammen aus den Reziprokwerten der flächenbezogenen Wärmeübergänge $\alpha_L A_L$ auf der Luftseite und $\alpha_W A_W$ auf der Wasserseite sowie des Wärmedurchgangs λF^* der im Wärmeübertrager verbauten Rohre. Eine Analyse der Gleichung (6.19) ergibt, dass alle darin vorkommenden Größen bis auf die Wärmeübergangskoeffizienten α_L und α_W im gesamten Betriebsbereich konstant sind. Die beiden Wärmeübergangskoeffizienten verändern sich dagegen in Abhängigkeit des Massenstrom \dot{m} (bzw. der Geschwindigkeit w) und der Temperatur ϑ des jeweiligen Mediums (siehe Gleichung (6.20)).

$$\alpha = C f(\dot{m}) f(\vartheta) \quad (6.20)$$

Der Temperatureinfluss auf die Wärmeübergangskoeffizienten ist innerhalb der Temperaturbereiche, in denen Wärmeübertrager in heiz- und raumluftechnischen Anlagen normalerweise betrieben werden, gering und kann deshalb in sehr guter Näherung vernachlässigt werden. Die Koeffizienten α , die auf der inneren und äußeren Übertragungsseite eines Wärmeübertragers wirksam sind, können somit vereinfacht als Potenzfunktionen des jeweiligen Massenstroms \dot{m} abgebildet werden (siehe Gleichung (6.21)).

$$\alpha = C \dot{m}^n \quad (6.21)$$

Mit der in Gleichung (6.21) getroffenen Vereinfachung für die Berechnung der Wärmedurchgangskoeffizienten α kann der kA -Wert – ausgehend von Gleichung (6.19) – in Abhängigkeit der Massenströme \dot{m}_L und \dot{m}_W dargestellt werden.

$$\frac{1}{kA} = \frac{1}{C_L \dot{m}_L^{n_L} A_L} + \frac{1}{\lambda F^*} + \frac{1}{C_W \dot{m}_W^{n_W} A_W} \quad (6.22)$$

Gleichung (6.22) lässt sich wiederum vereinfachen, indem diejenigen Größen in den einzelnen Termen auf der rechten Seite, die sich während des Betriebs nicht verändern, wie folgt zusammengefasst werden:

$$\frac{1}{kA} = \frac{1}{C_L^* \dot{m}_L^{n_L}} + B + \frac{1}{C_W^* \dot{m}_W^{n_W}} \quad (6.23)$$

mit

$$C_L^* = C_L A_L$$

$$B = \frac{1}{\lambda F^*}$$

$$C_W^* = C_W A_W$$

Mit Gleichung (6.23) wird der für den jeweiligen Betriebspunkt eines Wärmeübertragers gültige kA -Wert mit Hilfe der jeweiligen Massenströme berechnet. Da diese Gleichung den Verlauf der spezifischen Wärmeleistung über den gesamten Betriebsbereich wiedergibt, kann sie somit als grundlegende Kennlinie für ein Simulationsmodell für Wärmeübertrager verwendet werden. Für den Einsatz dieser Kennlinie in der Anlagensimulation wird jedoch ein Verfahren benötigt, mit dem die Parameter C_L^* und n_L auf der Luftseite, B für den Wärmedurchgang sowie C_W^* und n_W auf der Wasserseite für den jeweiligen zu simulierenden Wärmeübertrager bestimmt werden.

Aufgrund der in Gleichung (6.23) implizit enthaltenen Potenzfunktionen ist eine direkte Bestimmung der Parameter z.B. auf der Basis eines linearen Gleichungssystems nicht möglich. Deshalb wird ein ursprünglich grafisches Verfahren numerisch umgesetzt, so dass die benötigten Parameter auf der Grundlage von fünf gemessenen Betriebspunkten bestimmt werden können [51, 52].

Bei diesem Verfahren werden die Parameter C^* und n für jedes Medium getrennt bestimmt. Hierfür müssen für jedes Medium drei unterschiedliche fest definierte Betriebspunkte an dem betreffenden Wärmeübertrager eingestellt und gemessen werden. Bei den unterschiedlichen Betriebspunkten wird nur der jeweils betrachtete Massenstrom variiert. Die Eintrittstemperaturen beider Medien und der Massenstrom des jeweils anderen Mediums werden konstant gehalten. Die Massenströme werden dabei so gewählt, dass einer der Betriebspunkte für beide Medien verwendet werden kann. Deshalb genügen in der Praxis fünf gemessene Betriebspunkte. Im Folgenden wird die Vorgehensweise zur Bestimmung der Kennlinienparameter aus den gemessenen Betriebspunkten beispielhaft für die Luftseite eines Luft-Wasser-Wärmeübertragers beschrieben.

Da sich der wasserseitige Konvektionsanteil des kA -Wertes bei der Bestimmung der Parameter für das Medium Luft aufgrund des konstant gehaltenen Wassermassenstroms \dot{m}_W nicht verändert, können die konstanten Größen in Gleichung (6.23) weiter zusammengefasst werden. Für die Luftseite des Wärmeübertragers ergibt sich somit folgende vereinfachte Gleichung:

$$\frac{1}{kA} = f(\dot{m}_L) = \frac{1}{C_L^* \dot{m}_L^{n_L}} + D_{W,\lambda} \quad (6.24)$$

mit

$$D_{W,\lambda} = B + \frac{1}{C_W^* \dot{m}_W^{n_W}}$$

Für die erforderlichen drei gemessenen Betriebspunkte für die Luftseite mit den Massenströmen $\dot{m}_{L,1}$, $\dot{m}_{L,2}$ und $\dot{m}_{L,3}$ ($\dot{m}_{L,1} < \dot{m}_{L,2} < \dot{m}_{L,3}$) werden die jeweils zugehörigen kA -Werte bestimmt. Anschließend werden jeweils für die Betriebspunkte 1 und 2 sowie 1 und 3 die Differenzen der zugehörigen Reziprokwerte der kA -Werte gebildet (siehe Gleichungen (6.25) und (6.26)). Hierdurch wird der konstante Anteil $D_{W,\lambda}$ aus Gleichung (6.24) eliminiert.

$$\left(\frac{1}{kA}\right)_1 - \left(\frac{1}{kA}\right)_2 = \frac{1}{C_L^*} \left(\frac{1}{\dot{m}_{L,1}^{n_L}} - \frac{1}{\dot{m}_{L,2}^{n_L}} \right) \quad (6.25)$$

$$\left(\frac{1}{kA}\right)_1 - \left(\frac{1}{kA}\right)_3 = \frac{1}{C_L^*} \left(\frac{1}{\dot{m}_{L,1}^{n_L}} - \frac{1}{\dot{m}_{L,3}^{n_L}} \right) \quad (6.26)$$

In den Gleichungen (6.25) und (6.26) sind somit nur noch der Koeffizient C_L^* sowie der Massenstromexponent n_L der Luft unbekannt. Indem die beiden Differenzgleichungen ins Verhältnis gesetzt werden, kann der unbekannte Koeffizient C_L^* herausgekürzt werden. Durch weiteres Umformen nimmt die resultierende Gleichung, die nur noch den Massenstromexponenten n_L als Unbekannte enthält, die folgende Form an:

$$\frac{\left(\frac{1}{kA}\right)_1 - \left(\frac{1}{kA}\right)_3}{\left(\frac{1}{kA}\right)_1 - \left(\frac{1}{kA}\right)_2} = \frac{\left[\left(\frac{\dot{m}_{L,3}}{\dot{m}_{L,1}} \right)^{n_L} - 1 \right] \left[\frac{\dot{m}_{L,2}}{\dot{m}_{L,1}} \right]^{n_L}}{\left[\left(\frac{\dot{m}_{L,2}}{\dot{m}_{L,1}} \right)^{n_L} - 1 \right] \left[\frac{\dot{m}_{L,3}}{\dot{m}_{L,1}} \right]^{n_L}} \quad (6.27)$$

Für die Bestimmung des Massenstromexponenten n_L in Gleichung 6.27 beschreibt Kühne [52] ein grafisches Verfahren. Um eine eindeutige Lösung der nichtlinearen Gleichung zu erhalten, wird bei diesem Verfahren vorausgesetzt, dass die Massenströme $\dot{m}_{L,1}$, $\dot{m}_{L,2}$ und $\dot{m}_{L,3}$ in einem bestimmten Größenverhältnis zueinander stehen. So muss der Massenstrom $\dot{m}_{L,2}$ ca. das 2- bis 3-fache des Massenstroms $\dot{m}_{L,1}$ betragen, während für das Verhältnis von $\dot{m}_{L,3}/\dot{m}_{L,1}$ der Faktor 10 gefordert wird. Um den Aufwand für den Anwender des Simulationsmodells zu verringern, wird das grafische Verfahren zur Bestimmung des Massenstromexponenten n_L durch ein numerisches Verfahren ersetzt [53].

Die für die Wasserseite des Luft-Wasser-Wärmeübertragers benötigten Parameter werden auf die gleiche Weise bestimmt wie für die Luftseite. Der Zusammenhang, der sich für den Exponent n_W des Wassermassenstroms aufgrund der in den entsprechenden Betriebspunkten gemessenen kA -Werte ergibt, ist in Gleichung (6.28) dargestellt. Diese Gleichung wird ebenfalls auf der Basis des Verfahrens von Kühne gelöst.

$$\frac{\left(\frac{1}{kA}\right)_4 - \left(\frac{1}{kA}\right)_6}{\left(\frac{1}{kA}\right)_4 - \left(\frac{1}{kA}\right)_5} = \frac{\left[\left(\frac{\dot{m}_{W,3}}{\dot{m}_{W,1}} \right)^{n_W} - 1 \right] \left[\frac{\dot{m}_{W,2}}{\dot{m}_{W,1}} \right]^{n_W}}{\left[\left(\frac{\dot{m}_{W,2}}{\dot{m}_{W,1}} \right)^{n_W} - 1 \right] \left[\frac{\dot{m}_{W,3}}{\dot{m}_{W,1}} \right]^{n_W}} \quad (6.28)$$

In Bezug auf die kA -Werte in den Gleichungen (6.27) und (6.28) ist zu beachten, dass $(kA)_3$ und $(kA)_6$ identisch sind. Für die Berechnung beider Werte wird der gleiche gemessene Betriebspunkt ($\dot{m}_L = \dot{m}_{L,3}$ und $\dot{m}_W = \dot{m}_{W,3}$) verwendet, da bei der Messung der Betriebspunkte des einen Mediums stets der maximale Massenstrom des anderen Mediums eingestellt wird.

Sobald die Massenstromexponenten n_L und n_W ermittelt sind, werden den Gleichungen (6.24) bis (6.26) die restlichen Parameter C_L^* , C_W^* und B der Kennliniengleichung (6.23) für den kA -Wert bestimmt. Somit kann der Verlauf des kA -Wertes über den gesamten Betriebsbereich des betrachteten Wärmeübertragers in Abhängigkeit der Massenströme \dot{m}_L und \dot{m}_W beschrieben werden.

Der im Modell auf der Basis der Kennlinie aus Gleichung (6.23) ermittelte kA -Wert wird dazu verwendet, die Luftaustrittstemperatur $\vartheta_{L,aus}$ des Wärmeübertragers, die sich aufgrund der Eintrittsgrößen $\vartheta_{L,ein}$, \dot{m}_L und \dot{m}_W ergibt, zu bestimmen. Zusätzlich muss bei der Berechnung der Austrittstemperatur $\vartheta_{L,aus}$ noch die Massenstromführung in dem betreffenden Wärmeübertrager berücksichtigt werden. Hierzu werden die folgenden Formeln verwendet [54]:

Gleichstrom:

$$\vartheta_{L,aus,gl} = (\vartheta_{W,ein} - \vartheta_{L,ein}) \left(\frac{1 - e^{-x_{gl}}}{1 + \frac{W_L}{W_W}} \right) + \vartheta_{L,ein} \quad (6.29)$$

Gegenstrom:

$$\vartheta_{L,aus,gg} = (\vartheta_{W,ein} - \vartheta_{L,ein}) \left(\frac{1 - e^{-x_{gg}}}{\frac{W_L}{W_W} - e^{-x_{gg}}} \right) + \vartheta_{L,ein} \quad (6.30)$$

Kreuzstrom:

$$\vartheta_{L,aus,kr} = \left(\frac{\vartheta_{L,aus,gl} + \vartheta_{L,aus,gg}}{2} \right) \quad (6.31)$$

Die in den Gleichungen (6.29) bis (6.31) verwendeten Abkürzungen W_L , W_W und x sind wie folgt definiert:

$$W_L = \dot{m}_L c_{pL}$$

$$W_W = \dot{m}_W c_{pW}$$

$$x_{gl} = kA \left(\frac{1}{W_W} + \frac{1}{W_L} \right)$$

$$x_{gg} = kA \left(\frac{1}{W_W} - \frac{1}{W_L} \right)$$

Wenn $\vartheta_{L,aus}$ bekannt ist, kann mit Hilfe der Gleichung (6.17) zunächst die übertragene Wärme \dot{Q} berechnet werden. Angewandt auf die Wasserseite des Wärmeübertragers liefert dieselbe Gleichung die Wasseraustrittstemperatur $\vartheta_{W,aus}$.

Im Kennlinienmodell für Wärmeübertrager wird in gleicher Weise wie bei allen anderen Modellen nur das thermische Verhalten ermittelt. Die hydraulischen Vorgänge werden im

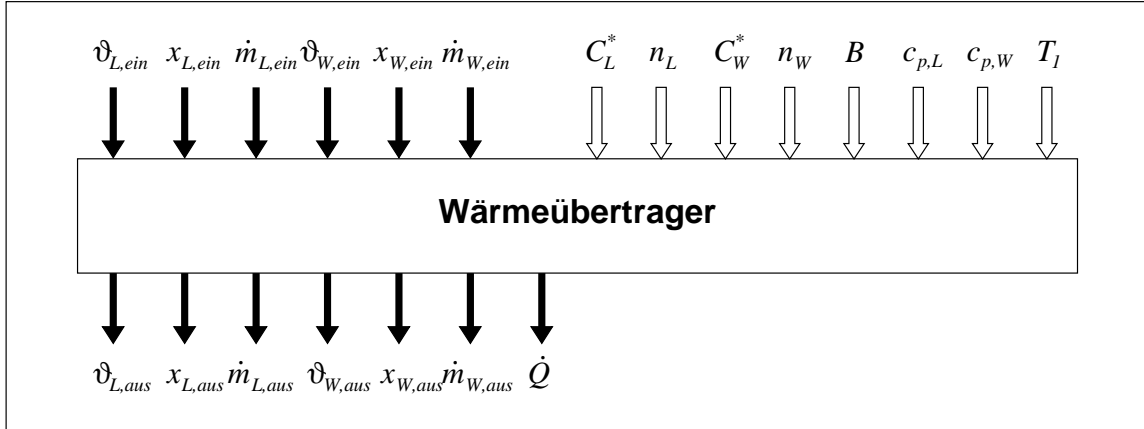


Bild 6.8: Ein- und Ausgabegrößen des Kennlinienmodells für Wärmeübertrager

Modell für Verteilsysteme berechnet. Das zeitliche Verhalten wird ähnlich wie in den anderen Modellen mit Hilfe eines dämpfenden PT_1 -Glieds nachgebildet. Das PT_1 -Glied ist dabei der Ausgabe der berechneten Größen vorgeschaltet. Daraus ergeben sich für das Kennlinienmodell für Wärmeübertrager die in Bild 6.8 dargestellten Ein- und Ausgabegrößen.

Die Größen C_L^* , n_L , C_W^* , n_W und B , mit denen die Kennlinie des kA -Wertes beschrieben wird, sowie die Zeitkonstante T_1 gehen als Parameter in das Modell ein. Die variablen Eingabegrößen bestehen aus der Temperatur $\vartheta_{L,ein}$ und der Feuchte $x_{L,ein}$ der Luft sowie der Wassertemperatur $\vartheta_{W,ein}$ am Wärmeübertrager eintritt. Ebenfalls als veränderliche Eingänge liegen die Massenströmen $\dot{m}_{L,ein}$ und $\dot{m}_{W,ein}$ an. Als Outputs sind der Luftzustand am Austritt (Temperatur $\vartheta_{L,aus}$ und Feuchte $x_{L,aus}$) sowie die austretende Wassertemperatur $\vartheta_{W,aus}$ definiert. Die übertragene Wärmeleistung \dot{Q} wird ebenfalls ausgegeben.

6.4 Zeitliche Modelle

6.4.1 Klappen

Das Simulationsmodell für Stellorgane wie Klappen ist aufgrund der Umstellung der hydraulischen Berechnung (siehe Kapitel 6.2.1) auf die Nachbildung des zeitlichen und gegebenenfalls des thermischen Verhaltens beschränkt. Charakteristische Parameter für Stellorgane wie $k_{v,0}$ - oder $k_{v,S}$ -Wert werden deshalb im Gegensatz zu bisherigen Modellen nicht mehr als Eingangsgrößen benötigt, da diese bereits in der Eingabedatei des Verteilsystemmodells angegeben werden.

Das zeitliche Verhalten von Klappen wird über den Parameter Schließzeit T_{zu} definiert. Dieser Parameter gibt an, wie schnell ein am Stellmotor einer Klappe anliegendes Stellsignal in einen entsprechenden Hub H umgesetzt wird (siehe Gleichung 6.32). T_{zu} ist dabei die Zeitspanne, die benötigt wird, um die vollständig geöffnete Klappe zu schließen. Da Klappen in der Regel von Schrittmotoren angetrieben werden, wird für die Berechnung

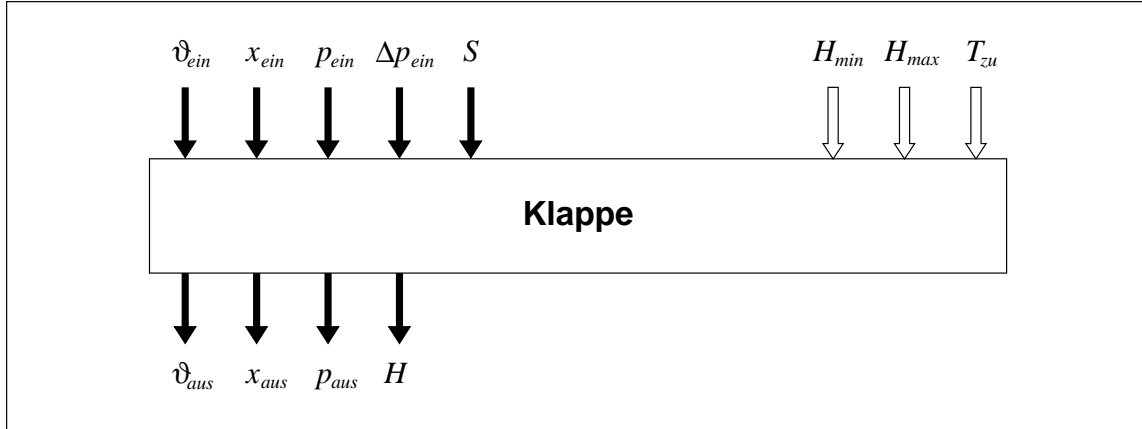


Bild 6.9: Ein- und Ausgabegrößen des Modells für Klappen

des sich tatsächlich einstellenden Hubs davon ausgegangen, dass das jeweilige Stellsignal zeitlich linear umgesetzt wird.

$$H = H_{min} + \frac{\Delta t}{T_{zu}} \cdot (H_{max} - H_{min}) \quad (6.32)$$

mit

Δt	Zeitschrittweite der Simulation
T_{zu}	Schließzeit der Klappe
H_{min}	minimaler Hub
H_{max}	maximaler Hub

Die veränderlichen Eingangsgrößen für das Simulationsmodell bestehen aus der Temperatur ϑ_{ein} , der Feuchte x_{ein} und dem Absolutdruck p_{ein} am Eintritt sowie dem sich an der Klappe einstellende Druckabfall Δp_{ein} und dem jeweils anliegenden Stellsignal S (siehe Bild 6.9). Die Parameter für das veränderte Klappenmodell bestehen aus den Werten für den maximal und minimal möglichen Hub H_{min} und H_{max} sowie der Schließzeit T_{zu} . Die Parameter H_{min} und H_{max} dienen dazu, den Stellbereich des jeweiligen Stellorgans zu begrenzen für den Fall, dass z.B. eine Klappe aus mechanischen Gründen nicht zu 100 % geöffnet werden kann.

Die wichtigste Ausgangsgröße des Modells ist der sich einstellende Hub H . Die Temperatur ϑ_{aus} , die Feuchte x_{aus} und der Absolutdruck p_{aus} am Austritt der Klappe werden ebenfalls ausgegeben.

6.4.2 Stellglieder

Komponenten einer heiz- und raumluftechnischen Anlage wie Ventilatoren oder Wärmeübertrager werden mit Hilfe von Stellgliedern geregelt. Diese bestehen beispielsweise bei Ventilatoren aus Frequenzumformern oder bei Wärmeübertragern aus Stellmotoren für

die entsprechenden Ventile. Mit den Stellgliedern werden Regelsignale für die Komponenten umgesetzt, indem das „abstrakte“ Regelsignal in eine physikalische Größe wie z.B. einen Ventilhub oder eine Drehstromfrequenz bei einem Ventilator, die die entsprechende Drehzahl zur Folge hat, umgesetzt wird. Der Einfluss der Stellglieder auf das eigentliche physikalische Verhalten der betreffenden Komponenten besteht meist nur darin, dass sie sich durch ihr zeitliches Verhalten verzögernd bzw. dämpfend auf die Umsetzung der Regelsignale auswirken. Bei der Modellierung von Stellgliedern genügt es deshalb deren zeitliches Verhalten nachzubilden. Die technische Ausführung der Stellglieder im Einzelnen ist für die Simulation bzw. Emulation nicht von Bedeutung.

Die Stellglieder für die verschiedenen Komponenten können dabei ein völlig unterschiedliches Zeitverhalten haben. Während ein Schrittmotor, mit dem ein Ventil angesteuert wird, meist mit einem linearen Zeitglied nachgebildet werden kann, lässt sich beispielsweise das Verhalten der Stelleinheit „Frequenzumformer-Motor“ bei einem Ventilator durch ein verzögerndes PT_1 -Glieder annähern. Um das Stellgliedmodell für eine möglichst große Anzahl von Komponenten einsetzen zu können, werden in dem Modell verschiedene zeitliche Verhaltensweisen wie lineares oder dämpfende Zeitverhalten (PT_1 -Verhalten) umgesetzt. Die Funktion des Stellgliedmodells wird mit Hilfe von Gleichung (6.33) beschrieben.

$$S = R_{sim/emul} \cdot S_{max} \cdot f(\Delta t) \quad (6.33)$$

mit

$R_{sim/emul}$	Regelsignal aus Simulation bzw. Emulation
S_{max}	maximales Stellsignal
$f(\Delta t) = 1$	ohne Verzögerungsverhalten
$f(\Delta t) = \frac{\Delta t}{T_1}$	lineares Verhalten
$f(\Delta t) = 1 - e^{-\frac{\Delta t}{T_1}}$	PT_1 -Verhalten
Δt	Simulationszeit
T_1	Zeitkonstante

Für Gleichung (6.33) gilt außerdem:

$$\begin{aligned} S &= S_{min} && \text{wenn } S < S_{min} \\ S &= S_{max} && \text{wenn } S > S_{max} \end{aligned}$$

Mit Hilfe Gleichung (6.33) wird das Regelsignal $R_{sim/emul}$ – dieses nimmt Werte von 0 bis 1 an – in das für die betreffende Komponente erforderliche Stellsignal S umgewandelt. Der Term $f(\Delta t)$ beinhaltet dabei das jeweilige zeitliche Verhalten. Die aus dem Stellglied resultierende Stellgröße besteht in der Regel aus einer „physikalischen“ Größe wie zum

Beispiel einer Drehzahl oder einem Ventilhub. Diese Größen sind jedoch stets auf einen zulässigen Wertebereich begrenzt. Dieser Wertebereich wird mit Hilfe der Parameter S_{min} und S_{max} angegeben. S_{max} dient somit in Gleichung (6.33) gleichzeitig gewissermaßen als Skalierungsfaktor, um den Wertebereich des jeweiligen Stellglieds festzulegen. Zusätzlich wird in dem Modell die Möglichkeit geschaffen, über das Stellglied den Arbeitsbereich der damit verbundenen Komponente nach unten zu begrenzen. Dadurch werden Iterations-schwierigkeiten aufgrund von Berechnungsvorgänge in Arbeitsbereichen, die nicht in den jeweiligen Modellen definiert sind, vermieden.

Während bei einer reinen Simulation das Regelsignal stets von einem Reglermodell kommt, muss bei einer Emulation das Signal eines realen Reglers eingebunden werden. Im Modell für Stellglieder sind deshalb getrennte Eingänge für ein simulationsinternes und ein externes Regelsignal definiert. Zwischen diesen beiden Eingänge wird mit Hilfe eines Schalters S_{schalt} , der ebenfalls auf einem Modelleingang liegt, umgeschaltet. Dadurch kann das Signal, auf dem die auszugebende Stellgröße basiert, während einer laufenden Simulation zwischen dem Signal eines simulierten Reglers R_{sim} (Simulationsbetrieb) und dem eines realen Reglers R_{emu} (Emulationsbetrieb) umgeschaltet werden. Diese Schaltmöglichkeit wird z.B. bei einem Simulationsvorlauf, durch den bei einer Emulation ein schnelles Einschwingen des Simulationsmodells erreicht wird, benötigt. Des weiteren wird durch die Definition von zwei getrennten Eingängen der Aufwand für die Integration der Simulation in eine Emulationsumgebung deutlich minimiert. Bei der Erweiterung eines Simulationsmodells zu einer Emulation müssen somit bei den Stellgliedern lediglich die Emulations-eingänge verknüpft werden.

Für das Stellgliedmodell werden die in Bild 6.10 dargestellten Eingangsgrößen und Parameter benötigt. Die veränderlichen Eingangsgrößen werden von den Regelsignalen des simulierten und des realen Reglers R_{sim} und R_{emu} sowie dem zugehörigen Schaltsignal S_{schalt} gebildet. Als Parameter gehen die Ober- und Untergrenze S_{min} und S_{max} des Wertebereichs des Stellglieds ein. Über den Parameter P_{verh} wird das Zeitverhalten des Stellglieds ausgewählt. Der Parameter T_I enthält die zugehörige Zeitkonstante. Das ausgehende Stellsignal S bildet den einzigen Ausgang des Modells.

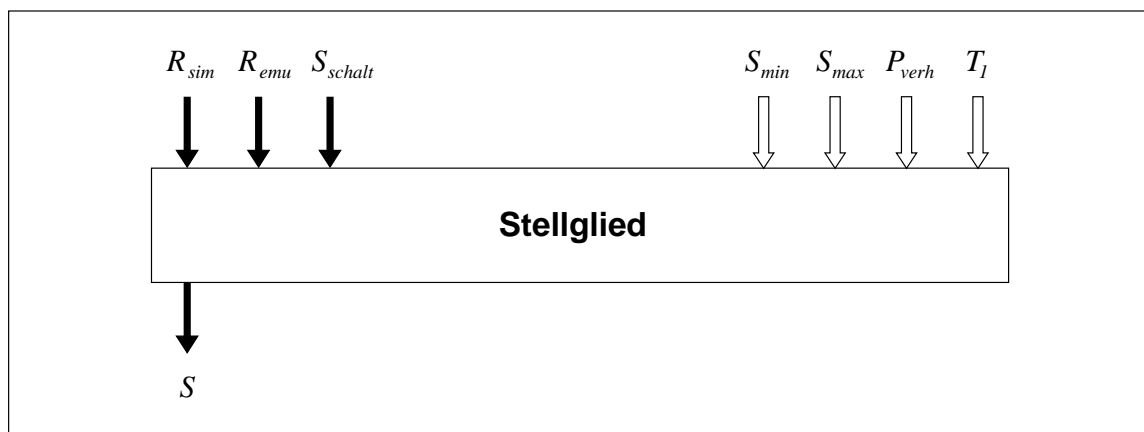


Bild 6.10: Ein- und Ausgabegrößen des Stellgliedmodells

6.4.3 Emulationsmodul

Im Vergleich zu einer Simulation werden bei einer Emulation zwei zusätzliche Funktionen benötigt. Zum einen muss der zeitliche Ablauf der Simulation so verzögert werden, dass diese in Echtzeit abläuft, da der „virtuelle“ Anlagenbetrieb aufgrund der Leistungsfähigkeit moderner Computer normalerweise deutlich schneller berechnet wird. Zum anderen müssen bei einer Emulation ständig Daten zwischen der Simulation und der realen Komponente bzw. dem Datenerfassungssystem der virtuellen Testumgebung ausgetauscht werden (siehe Kapitel 5.2). Da dieser Datenaustausch in jedem Zeitschritt in einer fest definierten Reihenfolge geschehen muss, sind die beiden bei einer Emulation zusätzlich erforderlichen Funktionen eng miteinander verbunden.

Während im realen Betrieb einer Anlage die Betriebsdaten kontinuierlich vorliegen, werden die Betriebszustände in der Simulation nur für diskrete Zeitschritte berechnet. Dabei werden die Betriebszustände, die sich nach Ablauf der Zeitschrittweite Δt_{sim} in der virtuellen Anlage einstellen, auf der Grundlage der Anlagenzustände bzw. Eingangsgrößen, die zu Beginn des jeweiligen Simulationszeitschrittes vorherrschen, berechnet. Da die Daten, die an der realen Komponente als Messdaten aufgenommen werden, zu den in der Simulation benötigten Eingangsgrößen zählen, müssen diese bei einer Emulation zu Beginn eines Zeitschrittes bereitgestellt und eingelesen werden. Die errechneten Anlagendaten dürfen dagegen erst nach Ablauf des Zeitschrittes an die reale Komponente ausgegeben bzw. dort eingestellt werden, da sie in einer realen Anlage auch erst zu diesem Zeitpunkt dort vorliegen.

Hieraus ergibt sich der durch das Emulationsmodul zu steuernde zeitliche Ablauf. Dieser Ablauf wird in 4 Phasen unterteilt (siehe Bild 6.11):

1. Einlesen der Messdaten der realen Komponente
2. Berechnen des Betriebszustands am Ende des jeweiligen Zeitschrittes
3. Anhalten der Simulation bis zur Echtzeit
4. Ausgabe der errechneten Betriebsdaten an die realen Komponenten

Der zeitliche Ablauf innerhalb des Emulationsmoduls wird im Folgenden genauer beschrieben. Zu Beginn eines jeden Zeitschrittes i liest das Modul die aktuellen Daten, die vom Datenerfassungssystem an der realen Komponente (hier dem DDC-System) gemessen und in einer Schnittstellendatei abgelegt werden, ein. Da diese Datei nur die aktuellen Daten enthalten darf, wird sie nach jedem Messvorgang überschrieben. Für den Einlesevorgang steht deshalb ein definiertes Zeitfenster t_{ein} zur Verfügung. Dieses Zeitfenster wird benötigt, da im Falle eines gleichzeitigen Schreibvorgangs von Seiten des Datenerfassungssystems die Schnittstellendatei zugegriffen möglicherweise kurzzeitig „blockiert“ ist und somit das Emulationsmodul erst verzögert auf die Datei zugreifen kann.

Nachdem die Messdaten der realen Komponente erfolgreich eingelesen sind, wird in der zweiten Phase die Berechnung des Betriebszustands gestartet. Direkt im Anschluss daran

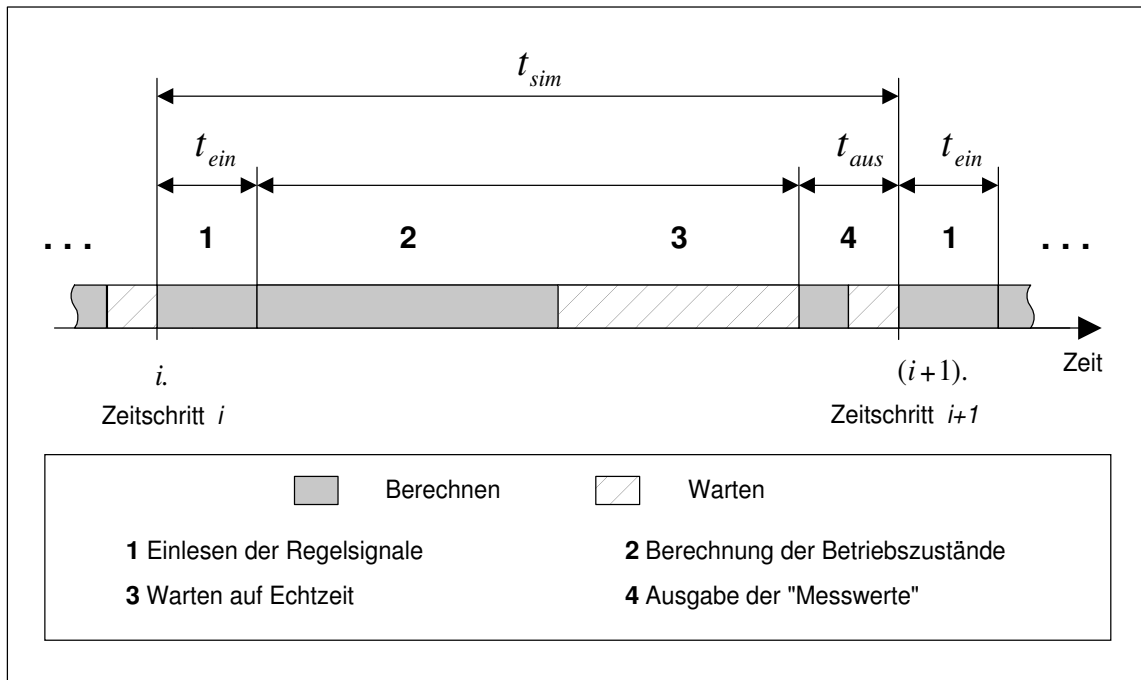


Bild 6.11: Zeitlicher Ablauf innerhalb der Simulation bei einer Emulation

wird die Simulation in der dritten Phase „angehalten“, bis der Zeitpunkt t_{aus} , der den Beginn des Zeitfensters für die Datenausgabe bestimmt, erreicht ist.

In der Zeitspanne Δt_{aus} wird die Datenausgabe über die zweite Schnittstellendatei gestartet. Diese Datei wird ähnlich wie die erste Schnittstellen von der Simulation bzw. dem darin enthaltenen Emulationsmodul ständig überschrieben. Da somit auch hier sowohl die Simulation als auch das Datenerfassungssystem auf die Datei zugreifen, wird hier ebenfalls ein Zeitfenster für die Dateioperationen benötigt. Dadurch wird sichergestellt, dass die errechneten Betriebszustände zu Beginn des neuen Zeitschrittes an der realen Komponente anliegen. Im Unterschied zum Zeitfenster beim Einlesen der Komponentendaten wird beim Ausgabezeitfenster jedoch noch zusätzlich eine Wartefunktion benötigt. Da die Dateiausgabe in Echtzeit stets vor dem Beginn des nächsten Zeitschrittes beendet ist, muss die Simulation erneut bis zum Startzeitpunkt des neuen Zeitschrittes „angehalten“ werden.

Zusätzlich zu den Funktionen „Steuerung des zeitlichen Ablaufs“ und „Datenaustausch“ kann mit Hilfe des Emulationsmoduls auch eine beliebige Simulationsvorlaufzeit $t_{Vorlauf}$ definiert werden. Während des Simulationsvorlaufs wird das in der Emulation verwendete Modell zunächst ohne zeitliche Verzögerung als reine Simulation betrieben. Wie bereits beschrieben wird durch den Vorlauf erreicht, dass die bei jeder Simulation auftretenden Einschwingvorgänge bei Beginn der eigentlichen Emulation abgeklungen sind und somit keine ungewollten Störeinflüsse durch willkürliche Startbedingungen vorhanden sind. Erst nach Ablauf der vorgegebenen Vorlaufzeit wird die Simulation zeitlich so verzögert, dass sie in Echtzeit abläuft. Der detaillierte Programmablauf des Emulationsmoduls ist im Anhang in Bild B.1 dargestellt.

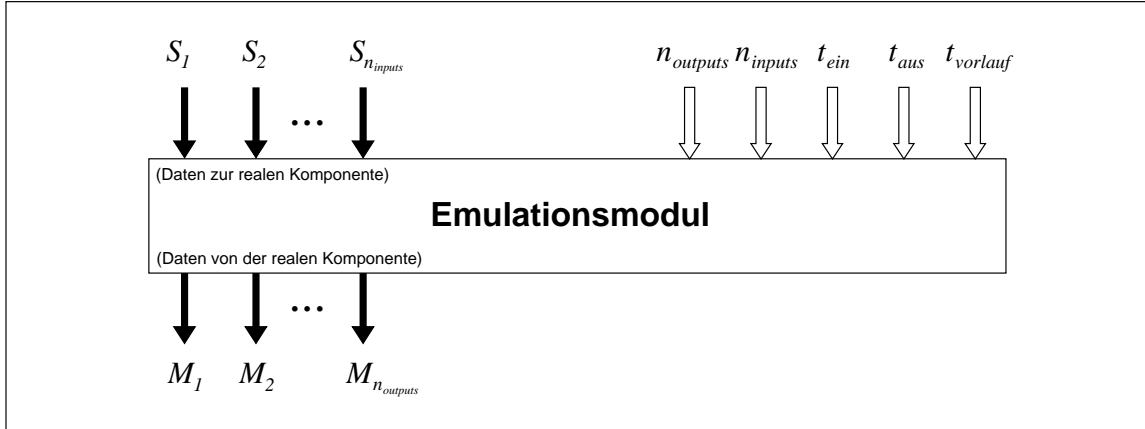


Bild 6.12: Ein- und Ausgabedaten des Emulationsmoduls

Die für das Emulationsmodul benötigten Eingangsgrößen sind in Bild 6.12 dargestellt. Über die Eingänge S_1 bis $S_{n_{inputs}}$ werden die Daten, die von der virtuellen Anlage an die reale Komponente übertragen werden, in das Emulationsmodul eingelesen und von diesem in die entsprechende Schnittstellendatei geschrieben. Mit den Parametern wird das Emulationsmodul hinsichtlich der Anzahl der in die Simulation einzulesenden Messwerte $n_{outputs}$ und der Anzahl n_{inputs} der berechneten und auszugebenden Daten konfiguriert. Mit drei weiteren Parametern wird die Steuerung des Zeitablaufs konfiguriert. Über die Parameter Δt_{ein} und Δt_{aus} wird die Länge der Zeitfenster für das Einlesen und das Ausgeben der Daten festgelegt. Der Parameter $t_{Vorlauf}$ bestimmt die Länge des Simulationsvorlaufs. Über die Ausgangsgrößen M_1 bis $M_{n_{outputs}}$ werden die Messwerte der realen Komponente, die vom Emulationsmodul eingelesen werden, an die virtuellen Komponenten in der Simulation weitergeleitet.

7 Anwendung in einer realen Anlage

7.1 Vorgehensweise

Das im Kapitel 4 beschriebene Verfahren zur anlagen- und zeitunabhängigen Überprüfung von Funktionen der Gebäudeautomatisierung wird im Folgenden auf ein reales, als Beispiel dienendes Gebäudeautomatisierungssystem angewendet. Das verwendete Regelungssystem ist bereits in einer bestehenden raumlufttechnischen Anlage in Betrieb. Um die Testprozeduren des entwickelten Verfahrens auf die ausgewählte Anlage anwenden zu können, wird zunächst eine TRNSYS-Simulation auf der Basis der in Kapitel 6 beschriebenen Komponentenmodelle erstellt und in die Emulationsumgebung eingebunden. Anschließend wird eine Kopie der in der betreffenden Anlage verwendeten Regelungssoftware auf die in der virtuellen Testumgebung installierten Regelungsgeräte (siehe Kapitel 5) installiert.

Im Folgenden wird zunächst ein kurzer Überblick über die Demonstrationsanlage gegeben. Dazu wird der Aufbau und der Verwendungszweck der Anlage kurz beschrieben. Anschließend wird auf die Struktur des Regelungssystem, mit dem die zugrunde gelegte Anlage geregelt und gesteuert wird, eingegangen. Schließlich werden als Beispiele die Ergebnisse einiger Tests zur Überprüfung der Automatisierungsfunktionen des betrachteten Systems dargestellt und diskutiert.

7.2 Beschreibung der Demonstrationsanlage

7.2.1 Aufbau und Nutzung des Gebäudes

Das Gebäude ist eine als Stahlkonstruktion ausgeführte Halle, die ca. 310 *m* lang, 110 *m* breit und 12 *m* hoch ist. Die Halle ist in vier räumlich getrennte Bereiche unterteilt (siehe Bild 7.1). Im Bereich „Prozess 1“ werden Computersysteme konfiguriert, zusammengebaut und getestet. Dieser Bereich wird aus dem „Lager 1“ mit Teilen versorgt. Die fertigen Systeme werden im Bereich „Prozess 2“ verpackt und für den Versand vorbereitet oder im „Lager 2“ zwischengelagert. In den Bereich „Prozess 1“ ist zudem ein halboffener Bürobereich integriert. Der gesamte Gebäudekomplex wird mit einem Gebäudeleitsystems, dem mehrere DDC-Unterstationen zugeordnet sind, geregelt.

Da hier nur die prinzipielle Anwendbarkeit des entwickelten Verfahrens erbracht werden soll, wird das Verfahren nicht auf das komplette Gebäudeleitsystem angewandt. Es werden

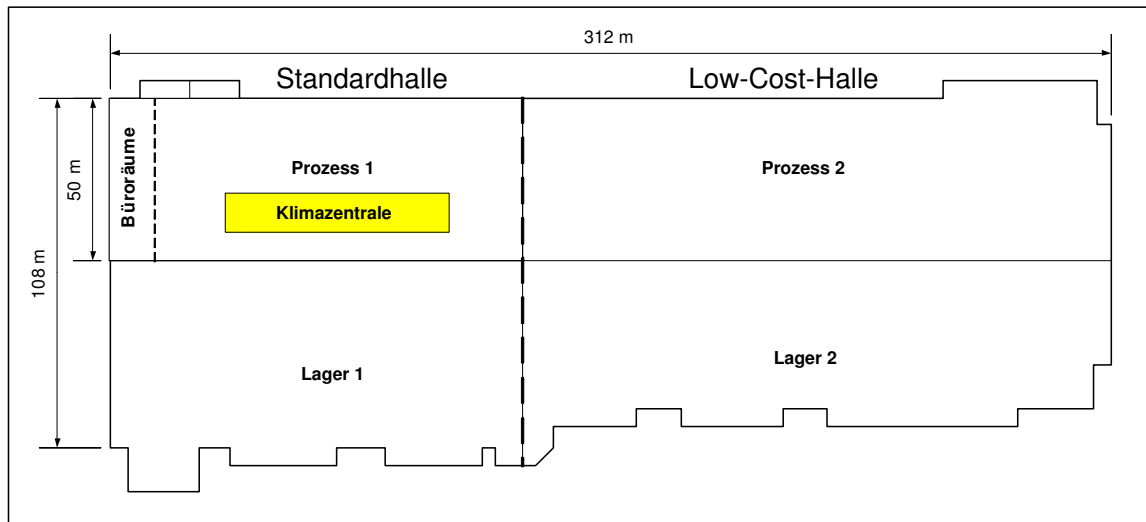


Bild 7.1: Grundriss des verwendeten Beispielobjekts

nur die Automatisierungsfunktionen eines Teilsystems des in dem Gebäude installierten Automatisierungssystems betrachtet. Die Testprozeduren werden auf die Regelungsanlage, mit der die raumluftechnischen Anlagen für den Bereich „Prozess 1“ geregelt und gesteuert werden, angewendet. Im Gebäudemodell der Simulation werden alle Bereiche der Halle abgebildet, um die Randbedingungen und Einflüsse, die sich aus der unterschiedlichen Nutzung der einzelnen Bereiche auf den Bereich „Prozess 1“ ergeben, zu erfassen.

Die Halle wird hierzu im Gebäudemodell in unterschiedliche Zonen unterteilt. Während die Bereiche „Lager 1“, „Lager 2“ und „Prozess 2“ jeweils als eine einzelne große Zone zusammengefasst werden, wird der Bereich „Prozess 1“ in mehrere kleinere Zonen unterteilt. Die Zonen werden jeweils über Variabel-Volumenstromregler mit Zuluft versorgt. Dadurch kann auf unterschiedliche Lastsituationen in den verschiedenen Bereichen der ausgedehnten Halle besser reagiert werden. Unterschiedliche Lastbedingungen in den einzelnen Zonen der Produktionshalle ergeben sich vor allem aus einer unterschiedlichen Nutzung (Produktion und Büro), aber auch aufgrund unterschiedlicher innerer Lasten (z.B. durch unterschiedliche Produktionsprozesse). Da die Zuluft in der halben Höhe der 12 m hohen Halle zugeführt, die Abluft jedoch direkt unter der Hallendecke abgeführt wird, wird in der Simulation zu jeder Zuluftzone zudem noch eine Abluftzone zugeordnet. Die Abluftzonen liegen dabei direkt über der jeweiligen Zuluftzone (siehe Bild 7.2, unten). Der Queraustausch zwischen den Zonen wird vereinfacht über einen variablen Luftaustausch in Höhe des jeweiligen Abluftvolumenstroms definiert. Mit der Trennung in zwei übereinanderliegende Zonen wird angestrebt, mögliche Temperaturschichtungen, die sich auf die Abluftbedingungen und damit auf das zentrale Klimagerät auswirken, zumindest vereinfacht zu berücksichtigen.

Aufgrund der Anforderungen an das Raumklima, die bei der Verarbeitung von elektronischen Bauteilen bestehen, wird der gesamte Hallenbereich „Prozess 1“ von einer Klimaanlage mit Zuluft versorgt. Die Lagerbereiche und der Produktionsbereich „Prozess 2“ werden dagegen nur belüftet und bei Bedarf beheizt.

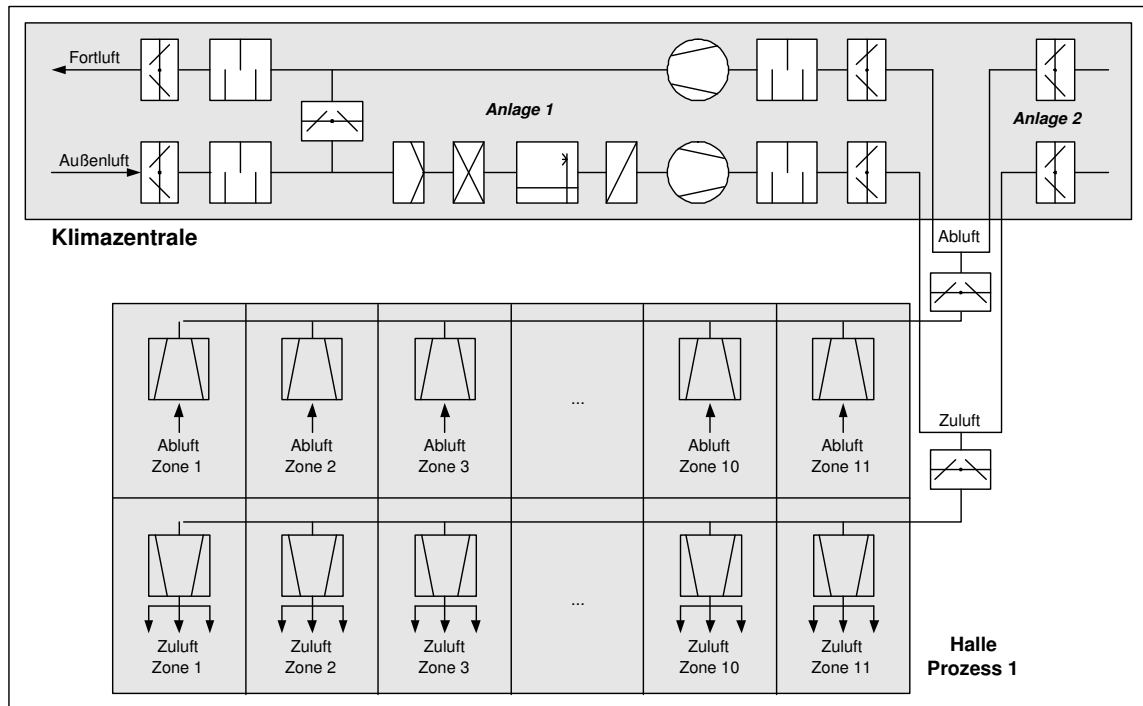


Bild 7.2: Aufbau der RLT-Anlage und der Zonen des Bereichs „Prozess 1“

7.2.2 Raumluftechnische Anlage

Die Klimazentrale, mit der der Bereich „Prozess 1“ versorgt wird, befindet sich auf dem Dach der Halle. Sie besteht aus zwei identisch aufgebauten Anlagen mit variablen Volumenstrom und einer maximalen Förderleistung von je $70.000 \text{ m}^3/\text{h}$. Die in den beiden Anlagen konditionierte Zuluft wird über einen gemeinsamen Zuluftkanal zu den Variabel-Volumenstromreglern und von dort in die einzelnen Zonen des Bereichs „Prozess 1“ gefördert. Die Abluft wird ebenfalls über einen gemeinsamen Kanal aus den Zonen abgeführt. In Bild 7.2 ist der Aufbau einer der beiden Anlagen sowie die Verbindung zu den Volumenstromreglern in den Zonen schematisch dargestellt. Der Anschluss der zweiten, symmetrisch aufgebauten Anlage ist ebenfalls skizziert. Beide Anlagen können über Zuluft- und Abluftklappen gegeneinander verriegelt werden.

Die Anlagen bestehen jeweils aus den Komponenten Mischkammer, Luftfilter, Lufterwärmer, Luftbefeuchter, Lufterwärmer, Zu- und Abluftventilator sowie Schalldämpfer (siehe Bild 7.2, oben). Aufgrund der Lastsituation in der Halle wird – unter der Vorgabe, dass der Außenluftanteil im Heizfall auf 5 % begrenzt ist, – auf einen Luftvorerwärmer verzichtet.

Die beiden Anlagen werden abwechselnd je als Führungsanlage, über die die Hauptlast gedeckt wird, eingesetzt. Dadurch wird gewährleistet, dass sich die Anlagen gleichmäßig abnutzen. Durch den Einsatz von zwei Anlagen ist auch beim Ausfall einer Anlage eine Grundversorgung des Produktionsbereichs „Prozess 1“ sichergestellt, so dass in einem Notfall selbst unter extremen Lastbedingungen die Produktion noch kontrolliert zurückgefahren werden kann und kein Schaden an den Produkten entsteht.

7.2.3 Installiertes Automatisierungssystem

In der Halle ist ein Gebäudeleitsystem vom Typ EXCEL 5000 der Firma Honeywell AG [55] installiert. Das Automatisierungssystem besteht aus einem Leitreechner, an dem 24 eigenständige Regelgeräte bzw. Unterstationen über ein herstellerspezifisches Bussystem (C-Bus) angeschlossen sind. Die Unterstationen, für die DDC-Geräte des Typs EXCEL 500 eingesetzt werden, sind über das gesamte Gebäude verteilt (siehe Bild 7.3). Auf diese Weise können die einzelnen Teilsysteme stets in der Nähe der zu regelnden Anlagen und Systeme angeordnet werden. So gibt es unter anderem für die Heizzentrale, die Kälteerzeugung und die oben beschriebene Klimazentrale jeweils separate Unterstationen. Die einzelnen Automatisierungsstationen können über das Bussystem auch untereinander Daten austauschen. Die DDC-Geräte sind dabei so programmiert, dass sie auch autark – das heißt ohne Verbindung zum GLT-System – betrieben werden können.

Die entwickelten Testprozeduren zur Überprüfung von Automatisierungsfunktionen werden beispielhaft auf ein Teilsystem – d.h. auf eine DDC-Unterstation – des Automatisierungssystems angewendet. Hierfür wird die DDC-Unterstation C_{05} , in der die Regelung und Steuerung der Klimazentrale des Bereichs „Prozess 1“ mit beiden oben beschriebenen RLT-Anlagen implementiert ist, ausgewählt (siehe Bild 7.3).

Die Unterstation C_{05} enthält zwei gleich aufgebaute Automatisierungsprogramme, mit denen die beiden RLT-Anlagen der Klimazentrale geregelt und gesteuert werden. Diese Programme, die teilweise miteinander verknüpft sind, bilden mehrere PI-Regler ab. Diese Regler sind jeweils in vorgefertigten Programmmodulen enthalten, mit denen die einzelnen Komponenten Wärmeübertrager, Befeuchter, Luftkühlregister sowie die Mischklappensysteme geregelt und gesteuert werden. Diese Module enthalten bereits alle für die Regelung und Steuerung der entsprechenden Komponenten notwendigen Automatisierungsfunktionen. Die Funktionen werden normalerweise während der Inbetriebnahme an die Erfordernisse der Anlage angepasst, indem die entsprechenden Parameter verändert

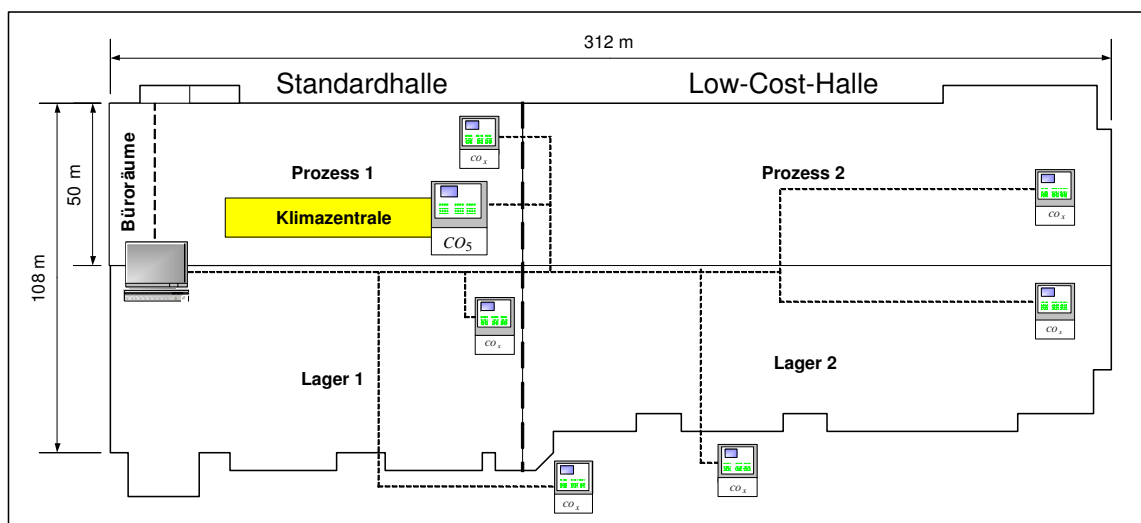


Bild 7.3: Skizze des Building-Energy-Management-Systems

und angepasst werden. Um die in der Planung festgelegte Betriebsweise der Gesamtanlage zu erreichen, werden vor allem die Kriterien, nach denen die verschiedenen Luftbehandlungseinheiten Erwärmer, Kühler, Befeuchter und Mischklappensystem geschaltet werden, mit Hilfe von Parametern angepasst.

Die in der Unterstation C_{05} implementierten Sicherheitsfunktionen werden ebenfalls über Parameter konfiguriert. Beispiele für solche Funktionen sind die Frostschutzüberwachung bei Wärmeübertragern oder die Keilriemenüberwachung bei Ventilatoren. Neben den Automatisierungsfunktionen für die Regelung sind in der Unterstation C_{05} des Weiteren noch Funktionen für die Steuerung implementiert. Über diese Funktionen wird beispielsweise das Anlaufverhalten von einzelnen Komponenten oder auch das der gesamten Anlage beeinflusst. Hierzu gehören Verzögerungsschaltungen für die verschiedenen Ventilatoren, mit denen Spitzen bei der Stromlast vermieden werden sollen. Andere Automatisierungsfunktionen beinhalten Mindestlaufzeiten oder -auszeiten für einzelnen Komponenten. Mit den Mindestauszeiten wird das ständige An- und Abschalten von Komponenten vermieden, wenn sich die Anlage beispielsweise in der Übergangsphase zwischen Heiz- und Kühlfall befindet.

Die DDC-Unterstation C_{05} ist über 123 Datenpunkte mit den beiden RLT-Anlagen verbunden. Über 14 analoge Ausgänge werden die Stellglieder der einzelnen Anlagenkomponenten angesteuert. Die Positionsrückmeldungen von den einzelnen Stellgliedern sind Teil der 31 analogen Eingänge, über die auch Sensoren, mit denen die Luftzustände in den Anlagen erfasst werden, mit der Regelung verbunden sind. Die Luftzustände werden über die Messwerte der Temperaturen und Feuchten am Anlagenein- und -ausgang erfasst. Über 58 digitale Eingänge werden Stör-, Betriebs- und Warnmeldungen aufgenommen. Die einzelnen Anlagenkomponenten werden über 21 digitale Ausgänge für den Betrieb freigegeben bzw. gesperrt. Zusätzlich zu den direkt verbundenen Datenpunkten gehen noch vier „globale Datenpunkte“ in die Regelprogramme der Unterstation C_{05} ein. Die globalen Datenpunkte beinhalten Messwerte der Außentemperatur und -feuchte, die an anderen DDC-Unterstationen anliegen, sowie digitale Signale wie z.B. die „Sammelquittierung“, mit der die Anlage nach dem Beheben von Störungen wieder freigegeben wird. Die Signale werden über das Bussystem C-Bus des Gebäudeleitsystems an die Unterstation C_{05} übertragen. Die Bezeichnungen und die Beschreibungen der einzelnen Datenpunkte der Unterstation C_{05} sind im Anhang in den Tabellen A.1 bis A.5 aufgelistet.

Tabelle 7.1: Datenpunkttypen in der DDC-Unterstation C_{05}

Datenpunkttyp	Anzahl	Beschreibung
analoge Ausgänge	14	Stellsignale
analoge Eingänge	31	Messwerte, Stellsignalsrückmeldungen
digitale Ausgänge	21	Freigabe- und Schaltsignale
digitale Eingänge	58	Stör-, Warn- und Betriebsmeldungen
globale Datenpunkte	4	Messwerte, Quittierung von Störmeldungen

7.3 Ergebnisse der Anwendung der Testprozeduren

7.3.1 Anfahrverhalten des Automatisierungssystems

Beschreibung der Automatisierungsfunktion

Beim Start einer heiz- und raumlufttechnischen Anlage werden die einzelnen Komponenten vor allem aus technischen Gründen zeitlich versetzt in Betrieb genommen. So müssen beispielsweise alle Luftklappen im Zentralgerät einer RLT-Anlage geöffnet sein, bevor die Ventilatoren in Betrieb gehen. Andernfalls besteht die Gefahr, dass Teile der raumlufttechnischen Anlage durch zu hohe Drücke Schaden nehmen. Um hohe elektrische Lastspitzen zu vermeiden, muss des Weiteren sichergestellt werden, dass Komponenten, die beim Anfahren eine hohe elektrische Leistung benötigen (z.B. Ventilatoren), mit genügendem zeitlichen Abstand in Betrieb genommen werden.

Vorgehensweise bei der Überprüfung

Um das Anfahrverhalten des betrachteten Automatisierungssystems zu testen, werden zunächst die Datenkanäle, über die die Fühlerwerte aus der virtuellen Anlage übertragen werden, mit Hilfe der Eingabemaske zum manuellen Ersetzen von Werten (siehe Bild 5.13) auf feste Werte gesetzt. Um das Verhalten der entsprechenden Regelkreise der beiden Anlagen (siehe Kapitel 7.2.2), die mit dem betrachteten Automatisierungssystem betrieben werden, vergleichen zu können, werden die Fühler in beiden Anlagen auf die gleichen Werte gesetzt. Die für diesen Test verwendeten Werte sind in Tabelle 7.2 aufgelistet. Die Fühlerwerte werden dabei so gewählt, dass sie in jedem Fall von den vorgegebenen Sollwerten der Regelung abweichen. Hierdurch wird sichergestellt, dass die entsprechenden Regelkreise zu arbeiten beginnen. Sobald die manuelle Einstellung der Fühlerwerte beendet ist, wird das in der Automatisierungsstation enthaltene Regelungsprogramm zurückgesetzt und neu gestartet.

Tabelle 7.2: Randbedingungen bei der Überprüfung des Anfahrverhaltens

Anlagengröße	Wert	Veränderungen während des Tests
Außenlufttemperatur	$4,8^{\circ}C$	keine
Zulufttemperatur	$17,8^{\circ}C$	keine
Ablufttemperatur	$22,8^{\circ}C$	keine
Feuchte Zuluft	$39,2\%$	keine
Feuchte Abluft	$39,6\%$	keine
stat. Differenzdruck Zuluft	$1 Pa$	keine
stat. Differenzdruck Abluft	$1 Pa$	keine

Ergebnis der Überprüfung

Das mit Hilfe des Emulators ermittelte Verhalten des Automatisierungssystems beim Start der Anlage ist in Bild 7.4 dargestellt. Dieses Bild enthält Bildschirmaufnahmen, die direkt von digitalen und analogen Displays des Emulationsversuchsstands aufgenommen wurden. Die Displays zeigen dabei stets einen Zeitraum von ca. 20 Minuten. Der Verlauf der gesamten bei dem Versuch übertragenen Daten ist ebenfalls in einer Protokolldatei dokumentiert. Der obere Teil des Bildes beinhaltet den Verlauf der digitalen Schalt- und Freigabesignale für die einzelnen Komponenten der beiden raumlufttechnischen Anlagen A1 und A2. Im unteren Teil des Bildes ist der Verlauf der von der Regelung ausgegebenen Stellsignale dokumentiert.

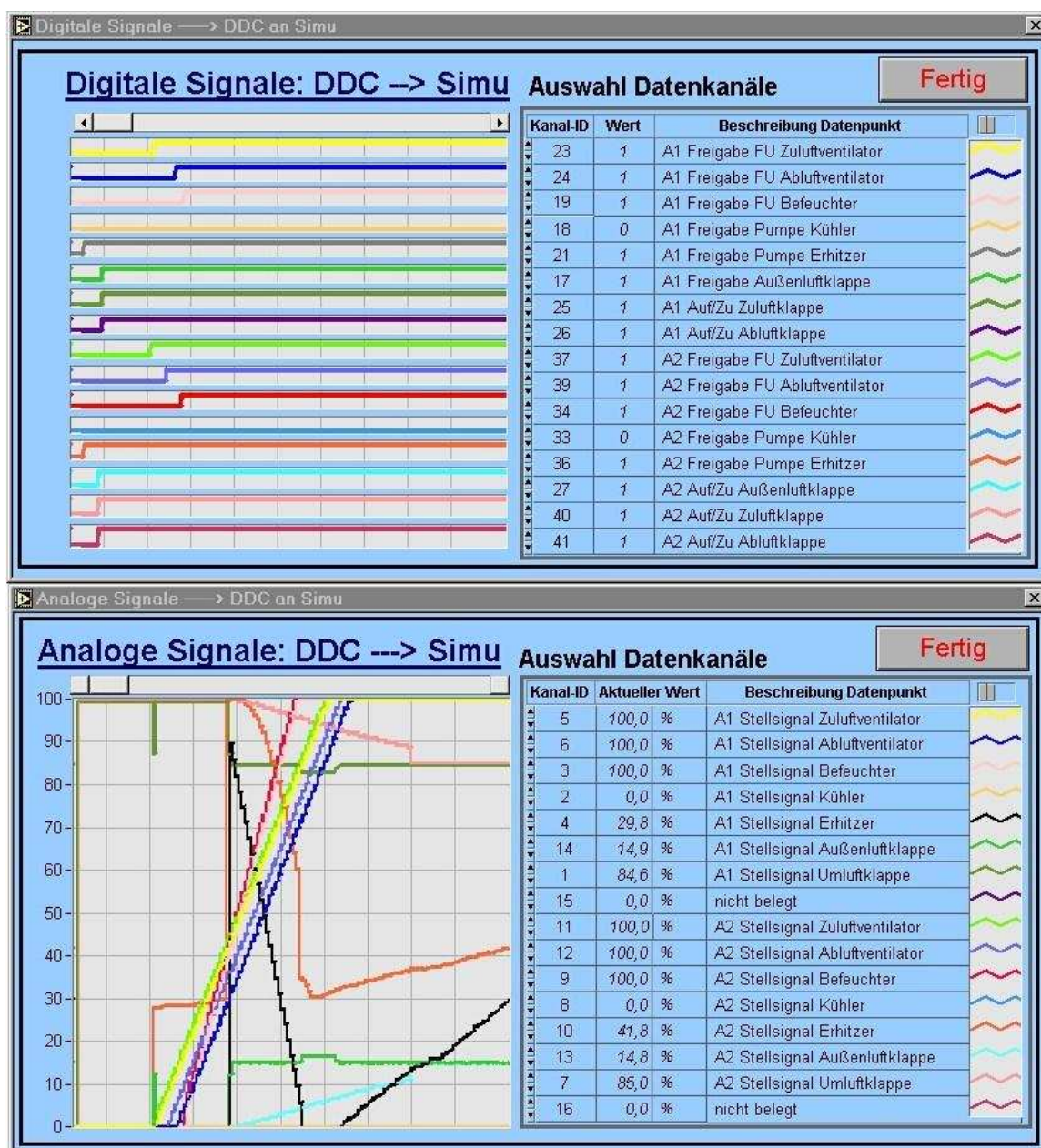


Bild 7.4: Verhalten des Automatisierungssystems beim Start der Anlage

Wie aus Bild 7.4 ersichtlich ist, gehen die beiden Anlagen nahezu gleichzeitig in Betrieb. Die Freigabesignale für Anlage A1 werden dabei in kurzem zeitlichen Anstand nach den Signalen für Anlage A2, die als erstes hochgefahren wird, gegeben. Die Reihenfolge, in der die Komponenten der jeweiligen Anlage geschaltet werden, ist prinzipiell für beide Anlagen gleich. Bei den Zeitabständen zwischen den einzelnen Freigabesignalen zeigen sich jedoch Unterschiede.

Die Reihenfolge der Freigabesignale wird am Beispiel der Anlage A2 erläutert. Das erste Signal gibt den Lufterwärmer frei (*Kanal-ID 36*). Mit einem zeitlichen Abstand von ca. 2 Minuten werden die Zu- und Abluftklappe (*ID 40* und *41*) sowie die Außenluftklappe (*ID 27*) freigegeben. Nach einer weiteren Verzögerung von ca. 4 Minuten – in dieser Zeit werden die Zu- und Abluftklappen aufgefahen – werden in einem zeitlichen Abstand von jeweils ca. 1 Minute die Frequenzumformer des Zuluftventilators (*ID 37*), des Abluftventilators (*ID 39*) sowie der Pumpe des Befeuchters (*ID 34*) freigegeben. Die verschiedenen Frequenzumformer werden verzögert freigegeben, um ein Zusammentreffen der Leistungsspitzen der einzelnen Frequenzumformer zu vermeiden.

Werden die Anlagen A1 und A2 jeweils für sich betrachtet, sind keine Unstimmigkeiten bei den zeitlichen Abständen zwischen den Freigaben der Frequenzumformern zu erkennen. Bei der gleichzeitigen Analyse der Verläufe von beiden Anlagen zeigt sich jedoch, dass die Freigabesignale der beiden Zuluftventilatoren in einem sehr kurzen Abstand erfolgen. Dies wird insbesondere deutlich, wenn der Verlauf der Stellsignale (siehe Bild 7.4, unterer Bereich) betrachtet wird. Die Linien für die beiden Zuluftventilatoren (*ID 5* und *11*) liegen nahezu aufeinander. Daraus resultiert beim Anfahren im realen Betrieb eine übermäßige elektrische Leistungsspitze. Der gleiche Sachverhalt gilt auch für die Frequenzumformer der Luftbefeuchter (*ID 3* und *9*).

Bei den Stellsignalen fällt des Weiteren auf, dass die Signale für die Komponenten, mit denen die Zulufttemperatur beeinflusst wird (Lufterwärmer und Außen- und Umluftklappen), in den beiden Anlagen trotz gleicher Randbedingungen einen völlig unterschiedlichen Verlauf haben. Dies wird insbesondere bei den Stellsignalen für die Lufterwärmer deutlich (*ID 4* und *10*). Da die Anlagen identisch aufgebaut sind und die Fühlerwerte über die Emulationssoftware jeweils auf die gleichen Werte gesetzt sind, müsste das Regelverhalten für beide Lufterwärmer bis auf eine gewisse zeitliche Verschiebung gleich sein. Die festgestellten Abweichungen zwischen den Anlagen deuten auf einen Fehler in einem der Automatisierungsprogramme der beiden Anlagen hin.

Im Gegensatz zur vorgestellten Methode zur Überprüfung von Automatisierungsfunktionen bleiben die festgestellten Mängel in der Programmierung der zeitlichen Steuerung bei der bisherigen Inbetriebnahmepraxis normalerweise unentdeckt. Zum einen wird hierbei jede Anlage für sich betrachtet, zum anderen ist es im betrachteten Automatisierungssystem nur schwer möglich, die Reihenfolge der Freigabesignale für die Komponenten beider Anlagen gleichzeitig zu verfolgen. Somit besteht – im Gegensatz zur beschriebenen Überprüfung in der virtuellen Testumgebung – keine Möglichkeit festzustellen, dass die Zuluftventilatoren zu kurz hintereinander geschaltet werden. Auch der unterschiedliche Verlauf der Stellsignale für die Lufterwärmer fällt aus den gleichen Gründen normalerweise

se weder bei der Inbetriebnahme noch im laufenden Betrieb auf. Wird diese Abweichung durch Zufall dennoch festgestellt, wird meist von voneinander abweichenden Randbedingungen in beiden Anlagen oder von einem Installationsfehler in einer der Klimaanlage ausgegangen.

Eine systematische Fehlersuche in einem Automationssystem ist mit den bisher verfügbaren Möglichkeiten bei der Inbetriebnahme nur mit großen Aufwand möglich. Im vorliegenden Fall ist es beispielsweise nahezu nahezu unmöglich sicherzustellen, dass an beiden Anlagen exakt dieselben Randbedingungen anliegen.

7.3.2 Vergleich der Lufterwärmerregelungen

Beschreibung der Automatisierungsfunktion

Mit der Automatisierungsfunktion „Lufterwärmerregelung“ wird die Zulufttemperatur im Heiz- oder Entfeuchtungsfall auf dem im Regelprogramm vorgegebenen Sollwert gehalten. Häufig bestehen die Eingangsgrößen dieser Automatisierungsfunktion nur aus dem Messwert der Zulufttemperatur selbst und einem gegebenenfalls veränderlichen Sollwert. Zusätzlich können noch andere Größen in die Regelung mit eingehen. Da die hier betrachtete Anlage im Heizfall mit einem sehr hohen Umluftanteil (95 %) betrieben wird, verbessert sich das Verhalten der Lufterwärmerregelung, wenn bei dieser die Ablufttemperatur in den Anlagen berücksichtigt wird.

Im Abschnitt 7.3.1 wird festgestellt, dass sich die Lufterwärmerregelungen der Anlagen A1 und A2 unterschiedlich verhalten. Deshalb werden im Folgenden als Beispiel die Auswirkungen der verschiedenen möglichen Einflussgrößen auf die Lufterwärmerregelung untersucht.

Vorgehensweise bei der Überprüfung

Für den Vergleich der Lufterwärmerregelungen werden an beiden Anlagen die Randbedingungen für Außenluft- und Ablufttemperatur so gewählt und festgesetzt, dass das Automatisierungssystem in den Heizbetrieb schaltet (siehe Tabelle 7.3). Sobald sich die virtuellen Anlagen auf dem Versuchsstand in einem quasistationärem Betrieb befinden, werden die sich einstellenden Werte für die Zulufttemperaturen ebenfalls manuell festgesetzt. Anschließend werden bei den beiden Anlagen A1 und A2 den Fühlerwerten „Zulufttemperatur“ (ID 10 und ID 25) sowie „Ablufttemperatur“ (ID 9 und ID 24) Sprünge von -2 K bzw. $+2\text{ K}$ aufgeprägt (siehe Bild 7.5, oben und Tabelle 7.3). Die Temperatursprünge werden nach einer Dauer von ca. 1 Minute wieder zurückgenommen.

Ergebnis der Überprüfung

Beim Vergleich der sich aus den eingestellten Randbedingungen ergebenden Zulufttemperaturwerte der beiden Anlagen zeigt sich, dass sich bei Anlage A2 ein um $0,6\text{ K}$ niedrigerer Wert als bei Anlage A1 einstellt (siehe Bild 7.5, oben, ID 10 und ID 25). Die Reaktion

Tabelle 7.3: Randbedingungen beim Vergleich der Lufterwärmerregelungen

Anlagengröße	Wert	Veränderungen während des Tests
Außenlufttemperatur	$4,8^{\circ}C$	keine
Zulufttemperatur A1	$20,6^{\circ}C$	Temperatursprung um $-2 K$ (Dauer ca. 1 Minute)
Zulufttemperatur A2	$20,3^{\circ}C$	Temperatursprung um $-2 K$ (Dauer ca. 1 Minute)
Ablufttemperatur A1	$22,8^{\circ}C$	Temperatursprung um $+2 K$ (Dauer ca. 1 Minute)
Ablufttemperatur A2	$22,8^{\circ}C$	Temperatursprung um $+2 K$ (Dauer ca. 1,5 Minuten)
Feuchte Zuluft	$39,2\%$	keine
Feuchte Abluft	$39,6\%$	keine
stat. Differenzdruck Zuluft	$300 Pa$	keine
stat. Differenzdruck Abluft	$260 Pa$	keine

der Automatisierungsfunktionen „Lufterwärmerregelung“ auf die aufgeprägten Temperatursprünge ist im unteren Teil von Bild 7.5 dargestellt. Die Temperatursprünge von $-2 K$ bei der Zulufttemperatur führen bei beiden Anlagen mit einer kurzen Verzögerung zunächst zu einem sprunghaften Ansteigen des Stellsignals für die jeweiligen Erwärmer (*ID 4* und *ID 10*). Anschließend steigen die Stellsignale aufgrund der bleibenden Abweichung der Zulufttemperatur vom Sollwert stetig an, um die aufgeprägte Abweichung vom Sollwert zu kompensieren. Nach der Rücknahme der Temperatursprünge fallen die Stellsignale wieder nahezu auf den Ausgangswert zurück.

Die Temperatursprünge von $+2 K$ bei den Ablufttemperaturen führen nur bei der Anlage A1 zu einer Reaktion beim Stellsignal des Erwärmers (siehe Bild 7.5, *ID 4*). Nach einer kurzen Verzögerung fällt, wie zu erwarten, das Stellsignal stark ab. Ähnlich wie bei der Zulufttemperatur geht das Stellsignal nach der Rücknahme des Temperatursprungs nahezu auf den Ausgangswert zurück. Das Stellsignal der Lufterwärmerregelung bei Anlage A2 (*ID 10* in Bild 7.5, unten) reagiert im Gegensatz hierzu überhaupt nicht auf den Temperatursprung bei der Ablufttemperatur. Dies bedeutet, dass bei der Anlage A2 die Ablufttemperatur nicht in die Zulufttemperaturregelung eingeht.

Der Aufwand, der bei Untersuchungen in der realen Anlage entsteht, um die Ursachen für die beim Vergleich der Lufterwärmerregelungen gefundenen Abweichungen festzustellen, ist – verglichen mit der vorgestellten Überprüfungsmethode – sehr viel höher. Zunächst muss sichergestellt werden, dass die Randbedingungen für beide Anlage über den Untersuchungszeitraum identisch sind. Die für die Überprüfung erforderlichen Temperatursprünge können nur direkt an den entsprechenden Fühlern aufgeprägt werden (z.B. mit Hilfe von

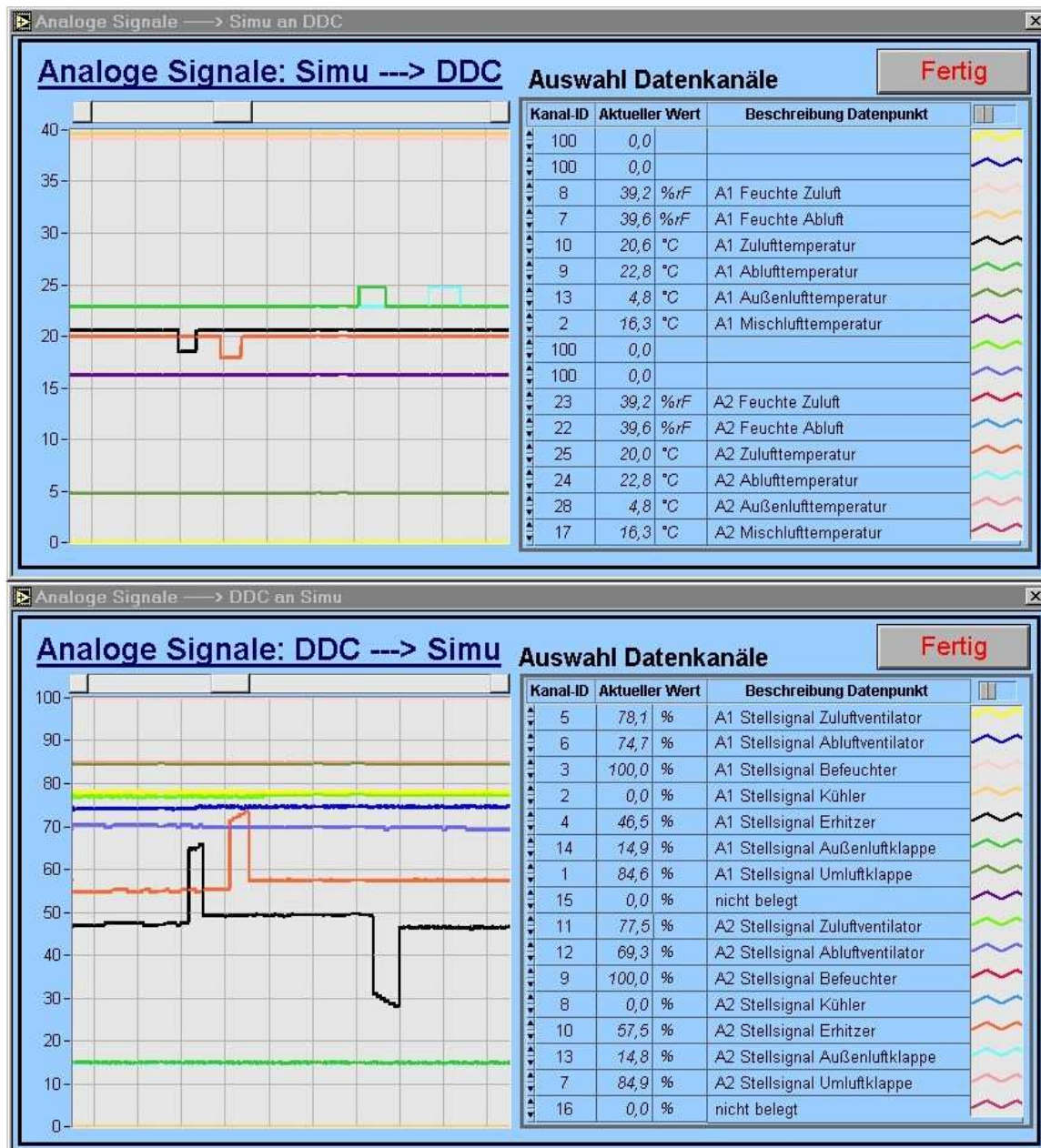


Bild 7.5: Vergleich der Lufterwärmerregelung der beiden Anlagen

Eispray) – sofern diese überhaupt von außen zugänglich sind. Ein weiteres Hindernis für die Durchführung einer solchen Untersuchung ergibt sich aus der räumlichen Distanz zwischen dem jeweiligen Fühler und der Anzeige des Automatisierungssystems. Diese hat einen hohen personellen Aufwand zur Folge, da für die Untersuchung ohne eine virtuelle Testumgebung mindestens zwei Personen erforderlich sind.

Wenn Abweichungen – wie die hier festgestellten – keine direkten Auswirkungen auf die geforderten Raumluftbedingungen haben, werden die Ursachen für diese aufgrund des Zeitdrucks, der bei der Inbetriebnahme eines Automatisierungssystems herrscht, sowie aufgrund des erforderlichen Aufwands in der Praxis meist nicht weiter untersucht.

7.3.3 Auslösen eines Frostschutzalarms

Beschreibung der Automatisierungsfunktion

Die Automatisierungsfunktion „Frostschutzalarm“ ist eine Sicherheitsfunktion und dient dazu, Anlagenschäden infolge von zu niedrigen Lufttemperaturen insbesondere an Wärmeübertragern zu verhindern. Hierzu werden in der Anlage vor den Wärmeübertragern so genannte Temperaturwächter installiert. Diese liefern im Gegensatz zu Temperaturfühlern keine analogen Messwerte, sondern die digitalen Signale „Entstört“ oder „Störung“. Das Signal „Störung“ wird dabei ausgelöst, sobald ein am Temperaturwächter voreingestellter Temperaturwert unterschritten wird.

Im Störfall, das heißt, wenn eine Störung bzw. ein Frostschutzalarm an das Automatisierungssystem gemeldet wird, muss dieses automatisch Maßnahmen auslösen, um ein Einfrieren der Wärmeübertrager zu verhindern. Hierzu werden alle Komponenten der betroffenen Anlage bis auf den Lufterwärmer ausgeschaltet. Der Lufterwärmer wird anschließend solange mit der maximalen Leistung betrieben, bis die Störung behoben ist. Nach der Behebung der Störung muss die Anlage wieder in Betrieb gehen.

Vorgehensweise bei der Überprüfung

Bei der Überprüfung der Automatisierungsfunktion „Frostschutzalarm“ werden die Umgebungsbedingungen für beide Anlagen A1 und A2 so gewählt, dass zu Beginn des Tests in beiden Anlagen die Zulufttemperatur über die Mischklappensysteme geregelt wird (siehe Tabelle 7.4 und Bild 7.6, unten). Im quasistationären Betrieb wird über die manuelle Eingabefunktion des Emulationsversuchsstands an der Anlage A1 ein Frostschutzalarm

Tabelle 7.4: Startbedingungen bei der Überprüfung eines Frostschutzalarms

Anlagengröße	Wert	Veränderungen während des Tests
Außenlufttemperatur	4,8° C	keine
Zulufttemperatur	20,6° C	keine
Ablufttemperatur	22,8° C	keine
Feuchte Zuluft	50,5 %	keine
Feuchte Abluft	46,5 %	keine
stat. Differenzdruck Zuluft	300 Pa	keine
stat. Differenzdruck Abluft	260 Pa	keine
Frostschutzalarm A1	„Entstört“	für ca. 4 Minuten auf „Störung“ gesetzt
Globale Quittierung	„aus“	zur Entriegelung der Anlage kurzzeitig auf „ein“ gesetzt

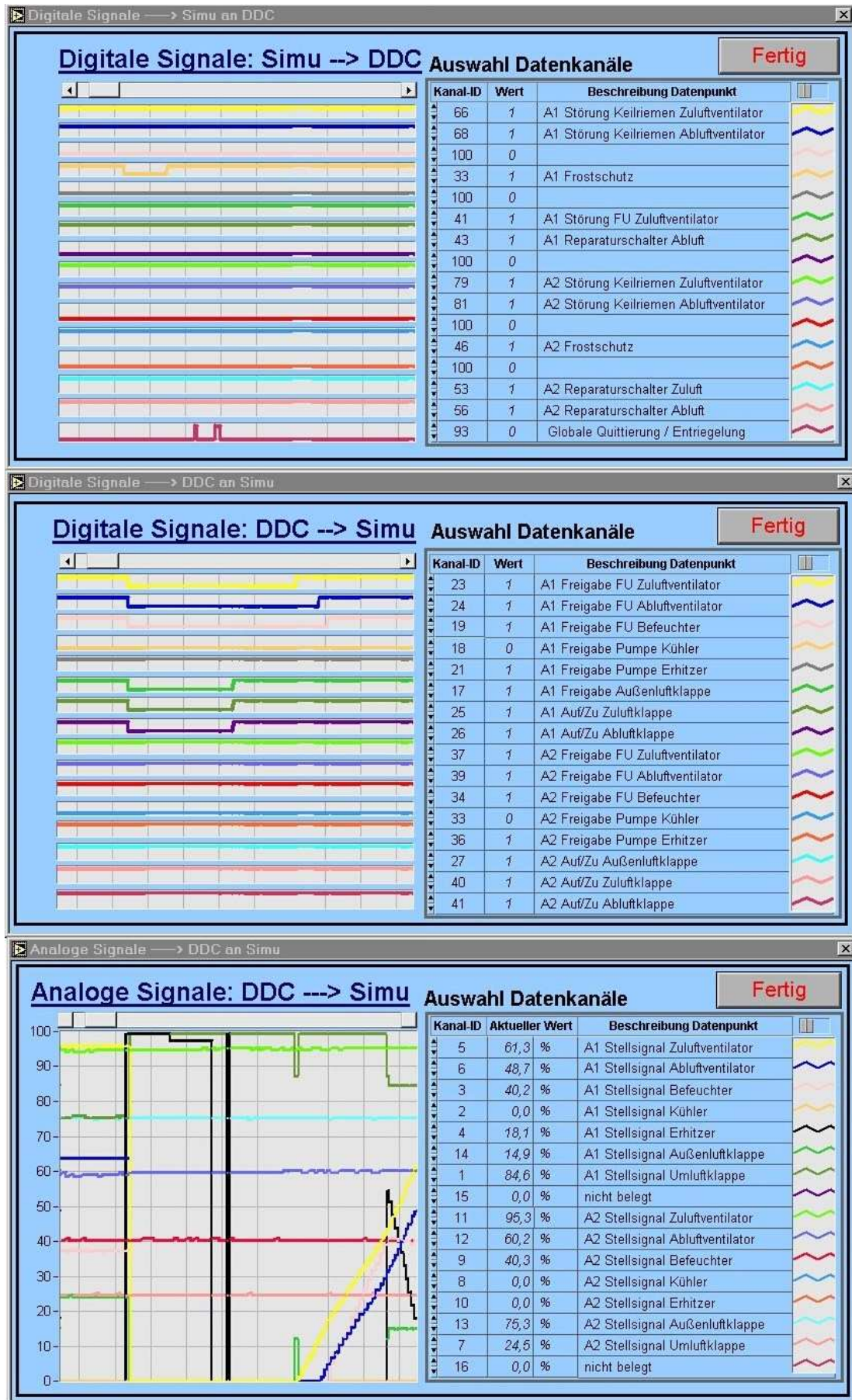


Bild 7.6: Schalt- und Stellsignale beim Auslösen eines Frostschutzalarms

ausgelöst (siehe Bild 7.6, oben, *ID 33*). Anschließend werden die digitalen Freigabe- und Stellsignale, die vom Automatisierungssystem an die beiden Anlagen ausgegeben werden, beobachtet.

Nach dem Zurücksetzen der Störmeldung auf „*Entstört*“ wird der digitale Datenpunkt „Globale Quittierung“ (Bild 7.6, oben, *ID 93*) ebenfalls über die manuelle Eingabefunktion auf „*ein*“ gesetzt, um die Verriegelung der Anlage, die stets bei Anlagenstörungen ausgelöst wird, aufzuheben. Diese „*Entriegelung*“ ist Voraussetzung dafür, dass die Anlage wieder in Betrieb genommen werden kann.

Ergebnis der Überprüfung

Das Verhalten der Anlage *A1* bei einem Frostschutzalarm ist in Bild 7.6 dargestellt. Der obere Teil des Bildes enthält die digitalen Signale, über die die Störmeldungen aus den beiden virtuellen Anlagen übertragen werden. Im störungsfreien Betrieb nehmen diese Signale stets den Wert „1“ an. Im mittleren Teil von Bild 7.6 sind die digitalen Freigabe-signale vom Automatisierungssystem an die Anlagen dargestellt, während der untere Teil die analogen Stellsignale des DDC-Geräts an die Anlagen zeigt.

Kurze Zeit nach dem Auslösen des Frostschutzalarms bei Anlage *A1* (*ID 33*) werden alle Komponenten bis auf den Erwärmer ausgeschaltet (siehe Bild 7.6, oben und Mitte). In entsprechender Weise nehmen alle Stellsignale für die übrigen Komponenten wie Ventilatoren und Befeuchter den Wert 0 an. Das Stellsignal für den Erwärmer geht dagegen sprunghaft von 0 auf 100 %. Sofort nach dem Zurücksetzen des Frostschutzalarms sinkt das Stellsignal des Erwärmers ab. Nach wenigen Minuten fällt das Erwärmerstellsignal auf 0.

Wenige Minuten nach dem „*Betätigen*“ des Entriegelungsschalters über die Eingabemaske zum manuellen Setzen von Werten (siehe Bild 7.6, oben, *ID 93*) geht die Anlage *A1* wieder in Betrieb. Hierbei werden nacheinander das Klappensystem (*ID 17, 25* und *26*), die Ventilatoren (*ID 23* und *24*) sowie der Befeuchter (*ID 19*) freigegeben. Die Automatisierungsfunktion „*Frostschutzalarm*“ arbeitet somit fehlerfrei.

Der Aufwand, um Sicherheitsfunktionen von Automatisierungsfunktionen an der realen Anlage zu testen, ist im Vergleich zur hier beschriebenen Vorgehensweise wesentlich höher. Wie in Kapitel 3.3.2 beschrieben, werden bei der Überprüfung solcher Funktionen die entsprechenden Störmeldesignale durch Eingriffe in die Anlage ausgelöst (z.B. mit Eisspray oder durch Abklemmen von der Spannungsversorgung). Hieraus resultiert wiederum ein extremer personeller und zeitlicher Aufwand, der zur Folge hat, dass das in der Praxis selbst Sicherheitsfunktionen bei der Inbetriebnahme nur stichprobenartig überprüft werden. Der Aufwand wird mit der vorgestellten Methode deutlich reduziert, so dass alle relevanten Funktionen untersucht werden können. Mit Hilfe vorab definierten Eingabedateien in die Simulation der virtuellen Testumgebung besteht sogar die Möglichkeit, solche Tests weitgehend automatisiert ablaufen zu lassen.

7.3.4 Schaltsequenz der Komponenten bei der Zulufttemperaturregelung

Beschreibung der Automatisierungsfunktion

In einer heiz- und raumlufttechnischen Anlage wird die Zuluft je nach Lastfall (Heizen oder Kühlen) und Umgebungsbedingungen (z.b. Außenluft- und Abluftzustand) mit unterschiedlichen Komponenten wie Lufterwärmer, Mischklappensystem oder Luftkühler konditioniert. In der Automatisierungsfunktion „Schaltsequenz“ ist dabei hinterlegt, mit welchen Komponenten die geforderten Zuluftbedingungen unter den jeweils gegebenen Lastzuständen und Umgebungsbedingungen mit dem kleinstmöglichen energetischen Aufwand erreicht werden können.

Mit Funktion „Schaltsequenz“ wird die Reihenfolge, in der die einzelnen Komponenten bei sich verändernden Lasten geschaltet werden, festgelegt. Eine weitere Aufgabe der Funktion ist es, sicherzustellen, dass die einzelnen Komponenten nicht „gegeneinander“ arbeiten, das heißt, dass beispielsweise im reinen Heiz- oder Kühlfall Lufterwärmer und Luftkühler nicht gleichzeitig betrieben werden können.

Vorgehensweise bei der Überprüfung

Die Überprüfung der Schaltsequenz der einzelnen Komponenten zur Zuluftkonditionierung wird am Beispiel der Anlage A1 durchgeführt. Die Umgebungsbedingungen für Anlage A2 werden während des Tests konstant auf den gleichen Werten gehalten, die zu Beginn an Anlage A1 als Randbedingungen angelegt werden (siehe Tabelle 7.5). Diese Werte sind dabei so gewählt, dass sich beide Anlagen im Heizbetrieb mit einer Lufterwärmerleistung von 100 % befinden.

Für die Überprüfung der Schaltreihenfolge der Komponenten von Anlage A1 werden die anliegenden Temperaturen während des Versuchs so verändert, dass die Anlage vom Heizfall auf den Kühlfall umschalten muss (siehe Tabelle 7.5 und Bild 7.7). Hierzu werden zunächst nach einer Zeit von $t = 9 \text{ min}$ nach Versuchsbeginn die Zuluft- und die Ablufttemperatur um 7 K bzw. $2,4 \text{ K}$ erhöht. Anschließend werden zusätzlich noch dem Außenluft- sowie dem Mischlufttemperatursensor Temperatursprünge von 6 K bzw. $5,7 \text{ K}$ aufgeprägt. Anschließend wird der Verlauf der Stellsignale für die Komponenten Lufterwärmer, Außen- und Umluftklappe und Luftkühler beobachtet.

Zusätzlich zur Schaltreihenfolge wird mit Hilfe weiterer Veränderungen bei Außenluft- und Mischlufttemperatur das Verhalten der betrachteten Automatisierungsfunktion für den Fall untersucht, dass die Außenlufttemperatur über der Ablufttemperatur liegt. Hierzu wird die Außenlufttemperatur nach einer Versuchslaufzeit von $t = 57 \text{ min}$ um 12 K sowie nach weiteren 6 Minuten nochmals um 4 K erhöht. Der Mischlufttemperatur wird in diesem Zusammenhang ebenfalls ein weiterer Temperatursprung von 6 K ($t = 63 \text{ min}$) aufgeprägt.

Tabelle 7.5: Randbedingungen bei der Überprüfung der Schaltreihenfolge der Komponenten bei der Zulufttemperaturregelung in Anlage A1

Anlagengröße	Wert	Veränderungen während des Tests
Außenlufttemperatur	12,0° C	<ul style="list-style-type: none"> – $t = 11 \text{ min}$: Temperatursprung +6,0 K – $t = 57 \text{ min}$: Temperatursprung +12,0 K – $t = 63 \text{ min}$: Temperatursprung +4,0 K – $t = 68 \text{ min}$: Temperatursprung –29,0 K
Mischlufttemperatur	16,3° C	<ul style="list-style-type: none"> – $t = 11 \text{ min}$: Temperatursprung +5,7 K – $t = 61 \text{ min}$: Temperatursprung +6,0 K – $t = 68 \text{ min}$: Temperatursprung –11,7 K
Zulufttemperatur	15,0° C	<ul style="list-style-type: none"> – $t = 9 \text{ min}$: Temperatursprung +7,0 K – $t = 63 \text{ min}$: Temperatursprung +1,0 K – $t = 68 \text{ min}$: Temperatursprung –4,2 K
Ablufttemperatur	22,8° C	<ul style="list-style-type: none"> – $t = 9 \text{ min}$: Temperatursprung +2,4 K – $t = 68 \text{ min}$: Temperatursprung –2,4 K
Feuchte Zuluft	39,2 %	keine
Feuchte Abluft	39,6 %	keine
stat. Differenzdruck Zuluft	300 Pa	keine
stat. Differenzdruck Abluft	260 Pa	keine

Abschließend werden die Fühlerwerte wieder so eingestellt, dass sich für die Anlage ein Heizfall ergibt. Hierdurch wird die Schaltreihenfolge beim Wechsel der Anlage vom Kühlbetrieb in den Heizbetrieb untersucht.

Ergebnis der Überprüfung

Da die Displayanzeige des Emulationsversuchsstands auf einen Zeitraum von ca. 20 Minuten beschränkt ist (siehe Kapitel 5.3.2), können die Ergebnisse der Überprüfung der Automatisierungsfunktion „Schaltsequenz“ – diese hat eine Dauer von mehr als 1,5 Stunden – nicht mit Hilfe von Screenshots dargestellt werden. Für die Ergebnisdarstellung werden deshalb die mit der Protokollfunktion während des Versuchs aufgezeichneten Daten grafisch aufbereitet (siehe Bild 7.7).

Infolge der aufgeprägten großen Temperatursprünge bei Zu- und Ablufttemperatur nach 9 Minuten sowie bei Außen- und Mischlufttemperatur nach 11 Minuten fällt das Stellsignal für den Lufterwärmer von 100 % steil ab und geht anschließend mit einem etwas flacheren Verlauf bis auf 0 % zurück. Sofort nachdem der Lufterwärmer vollständig abgeschaltet ist,

beginnt das Mischklappensystem mit Außenluft- und Umluftklappe zu arbeiten, um die Sollwertabweichung bei der Zuluft durch Mischen von Außen- und Abluft zu beseitigen. Hierbei wird der Außenluftanteil an der Zuluft in linearer Weise bis auf 100 % erhöht. Da die Zulufttemperatur aufgrund der manuell festgesetzten Werte weiterhin vom Sollwert abweicht, geht der Luftkühler mit einer Verzögerung von ca. 8 Minuten in Betrieb. Die verzögerten Freigabe des Luftkühlers hat ihre Ursache darin, dass im Kühlfall der Sollwert der Zulufttemperatur Band von 4 K hat. Dadurch werden häufige Schaltvorgänge in der Übergangsphase vom Mischluft- zum Kühlbetrieb vermieden. Das Stellsignal des Kühlers steigt ebenfalls in linearer Weise bis auf 100 % an.

Das Stellsignal für Außenluft- und Umluftklappe ist im Kühlbetrieb abhängig vom Verhältnis der Außenluft- zur Ablufttemperatur. Im Fall, dass die Außenlufttemperatur niedriger als die Ablufttemperatur ist, wird die Anlage mit dem maximalen Außenluftanteil betrieben. Steigt die Außenlufttemperatur über die der Abluft, wird der Außenluftanteil aus energetischen Gründen auf den Minimalwert beschränkt. Diese Betriebssituation wird mit Hilfe der Temperatursprünge bei der Außenlufttemperatur nach 57 und 63 Minuten eingestellt. Normalerweise müsste das Stellsignal für die Außenluftklappe auf den Minimalwert zurückgefahren werden. Die Klappe bleibt jedoch vollständig geöffnet.

Das abschließende Zurücksetzen der Randbedingungen auf einen Heizfall führt dazu, dass die Komponenten für die Zuluftkonditionierung in umgekehrter Reihenfolge ab- bzw. angeschaltet werden. Zunächst wird der Luftkühler abgeschaltet. Im Anschluss daran fährt

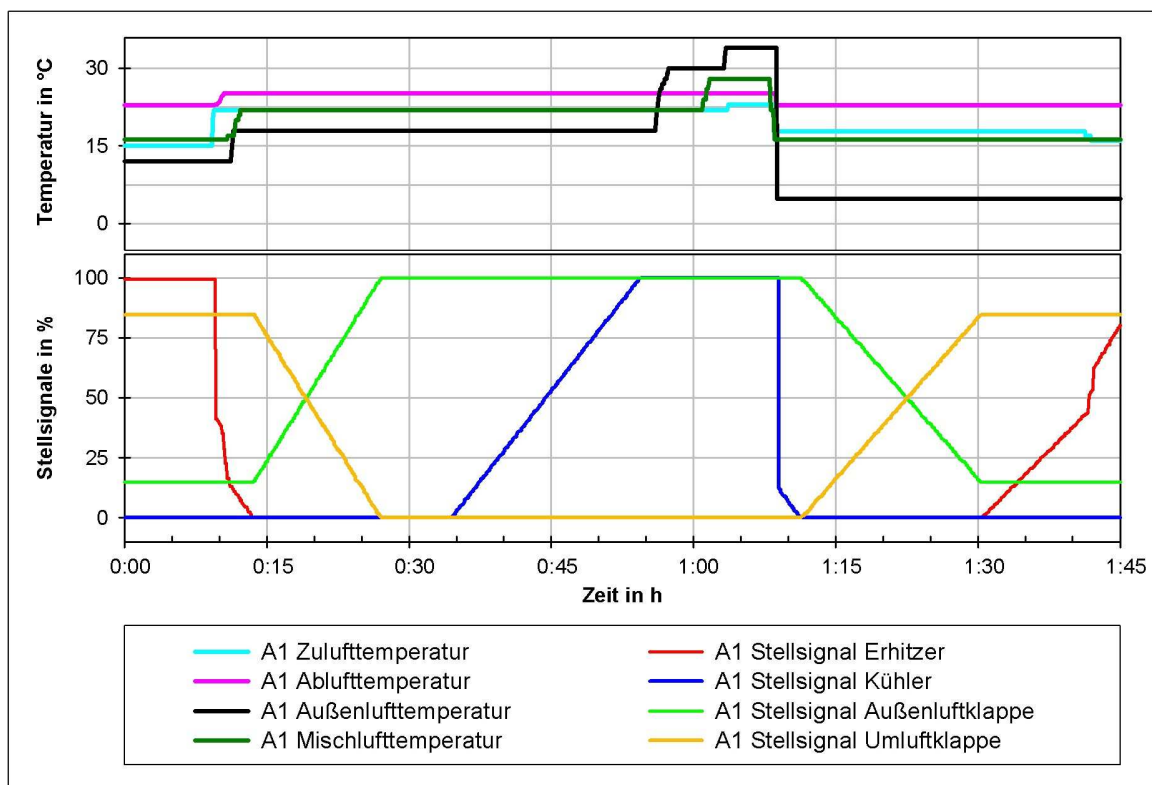


Bild 7.7: Schaltreihenfolge der Luftbehandlungskomponenten bei einem Wechsel vom Heiz- zum Kühlfall

das Mischklappensystem den Außenluftanteil auf den Mindestwert zurück. Sobald dieser erreicht ist, geht der Lufterwärmer wieder in Betrieb.

Die Schaltreihenfolge der Komponenten zur Zuluftkonditionierung erweist sich sowohl für den Wechsel vom Heiz- zum Kühlfall als auch umgekehrt als prinzipiell richtig. Durch die Möglichkeit, im Kühlfall in der virtuellen Anlage Extrembedingungen für Außenluft- und Ablufttemperaturen einzustellen, kann jedoch ein Mangel bei der Steuerung des Mischklappensystems aufgezeigt werden. Dieser Fehler, der im Anlagenbetrieb zu einen höheren Energieverbrauch führt, wird bei den derzeitigen Inbetriebnahmeprozessen nur gefunden, wenn zufällig den hier gewählten Versuchsbedingungen ähnliche Wetter- und Lastbedingungen herrschen. Das Verhalten der hier betrachteten Automatisierungsfunktion in der bisherigen Praxis in kurzer Zeit systematisch zu untersuchen, ist schon aufgrund der Tatsache, dass wetterabhängige Randbedingungen nicht beeinflusst werden können, nicht möglich. Um die gleichen Untersuchungen wie bei der hier beschriebenen Überprüfung direkt an der realen Anlage durchzuführen, muss diese solange beobachtet werden, bis sich die im Versuch aufgeprägten Wetterbedingungen in der Realität ergeben.

7.3.5 Überprüfen einer Ventilatorregelung

Beschreibung der Automatisierungsfunktion

In der betrachteten Anlage werden die Luftströme für die Zu- und Abluft geregelt, indem der statische Differenzdruck an einer vorgegebenen Stelle in den jeweiligen Luftkanälen mit der Automatisierungsfunktion „Ventilatorregelung“ konstant gehalten wird. Die Ventilatorregelung hat zudem die Aufgabe, Druckschwankungen im Kanalsystem, die sich beispielsweise aus veränderten Klappenstellungen bei den VVS-Klappen in den Räumen oder beim Mischklappensystem in der jeweiligen Klimaanlage ergeben, auszugleichen.

Vorgehensweise bei der Überprüfung

Die Zuluft- und Abluftventilatoren der beiden Anlagen A1 und A2 werden separat geregelt. In diesem Beispiel wird die prinzipielle Funktionsweise der Regelung des Abluftventilators in Anlage A1 überprüft. Bei Versuchsbeginn befinden sich beide Anlagen in einem quasistationären Betriebszustand mit den in Tabelle 7.6 aufgelisteten Randbedingungen. Diese sind bis auf die statische Druckdifferenz im Abluftbereich gleich. Während die Druckdifferenz bei Anlage A2 genau dem Sollwert von 260 Pa entspricht, ist der entsprechende Wert bei Anlage A1 manuell auf 0 Pa festgesetzt, so dass vom Automatisierungssystem das maximale Stellsignal ausgegeben wird.

Zu Beginn des Versuchs wird in Anlage A1 der Wert für den statischen Differenzdruck auf der Abluftseite über einen Zeitraum von ca. 4 Minuten kontinuierlich angehoben, bis er dem Sollwert von 260 Pa entspricht. Anschließend wird der Wert für den Differenzdruck nacheinander für jeweils ca. 2 Minuten um 3 Pa abgesenkt bzw. 2 Pa angehoben, um kleinere Druckschwankungen nachzubilden (siehe Tabelle 7.6 und Bild 7.8). Abschließend

Tabelle 7.6: Randbedingungen bei der Überprüfung einer Ventilatorregelung

Anlagengröße	Wert	Veränderungen während des Tests
Außenlufttemperatur	4, 8° C	keine
Zulufttemperatur	20, 6° C	keine
Ablufttemperatur	22, 8° C	keine
Feuchte Zuluft	39, 2 %	keine
Feuchte Abluft	39, 6 %	keine
stat. Differenzdruck Zuluft	300 Pa	keine
stat. Differenzdruck Abluft A1	0 Pa	<ul style="list-style-type: none"> – Erhöhen auf 260 Pa über einen Zeitraum von ca. 4 Minuten – Absenkung um 3 Pa für ca. 2 Minuten – Erhöhung um 2 Pa für ca. 2 Minuten – sprungartige Erhöhung um 10 Pa für ca. 1 Minute mit anschließendem langsamen Absenken auf 260 Pa – sprungartige Absenkung um 10 Pa für ca. 1,5 Minute
stat. Differenzdruck Abluft A2	260 Pa	keine

wird der Differenzdruck für einen kurzen Zeitraum sprungartig auf 10 Pa über den Sollwert angehoben und danach auf 10 Pa unter den Sollwert abgesenkt. Der Differenzdruck wird zwischen den einzelnen Anhebungen und Senkungen stets wieder auf den Sollwert von 260 Pa zurückgesetzt.

Ergebnis der Überprüfung

Die Regelung des Abluftventilators der Anlage A1 reagiert auf die bei Versuchsbeginn vorgenommene Anhebung des statischen Differenzdrucks auf den Sollwert bereits ca. 40 Pa bevor dieser erreicht ist. Dabei sinkt das Stellsignal nahezu linear ab, bis der Differenzdruck dem Sollwert entspricht (siehe Bild 7.8). Anschließend bleibt das Stellsignal konstant, bis der Druckwert entsprechend den Angaben in Tabelle 7.6 leicht abgesenkt wird. Infolge der Absenkung steigt das Stellsignal zunächst kurz steil und dann im weiteren Verlauf flach an. Sobald der Differenzdruck wieder auf den Sollwert zurückgestellt wird, sinkt das Stellsignal wieder leicht ab und bleibt dann konstant. Bei der geringfügigen Anhebung des Differenzdrucks reagiert die Ventilatorregelung in ähnlicher Weise. In diesem Fall sinkt jedoch das Stellsignal erwartungsgemäß. Die sprungartigen Druckerhöhungen bzw. -absenkungen führen zu den prinzipiell gleichen Reaktion, mit dem Unterschied, dass in diesen Fällen das Stellsignal deutlich stärker abfällt bzw. ansteigt.

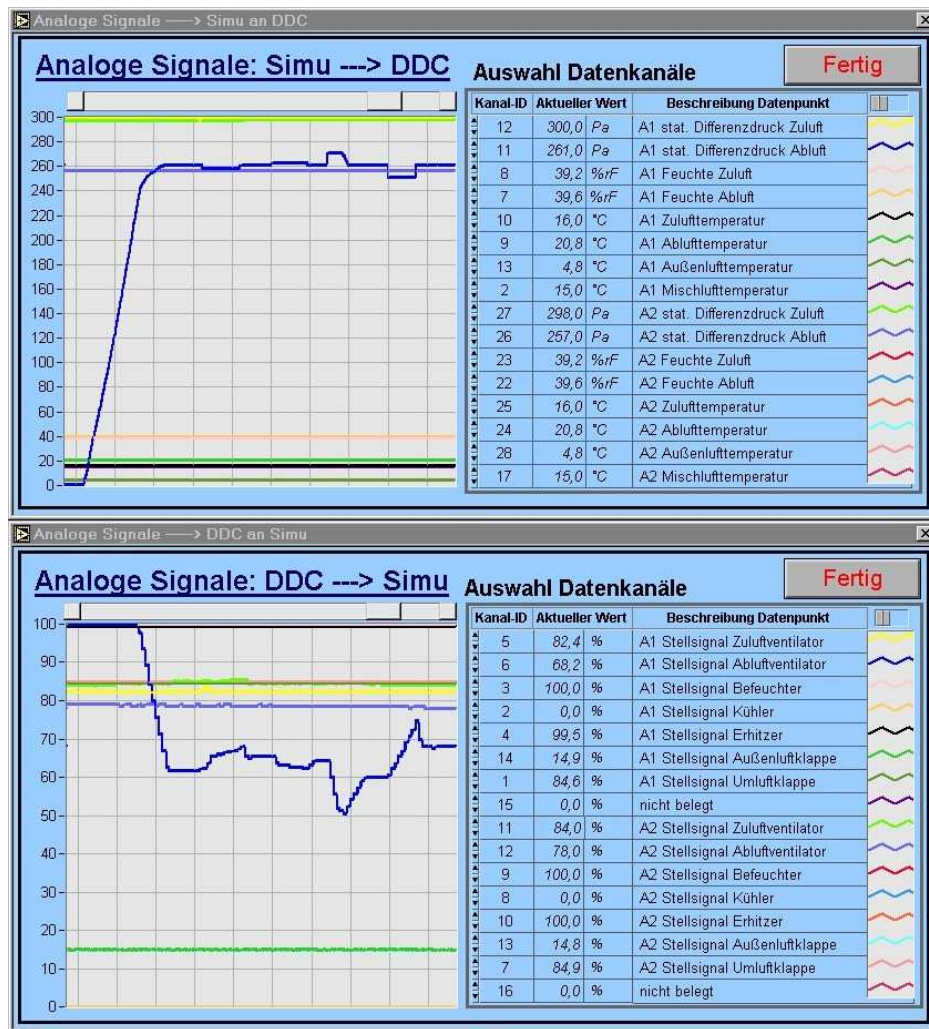


Bild 7.8: Verhalten des Regelkreises zur Zuluftventilatorregelung

Mit dem Test der Automationsfunktion „Ventilatorregelung“ wird bereits vor der Installation in der realen Anlage nachgewiesen, dass diese prinzipiell richtig arbeitet (richtiger Wirk Sinn, Ansprechverhalten). Der Vorteil hiervon ist, dass auf diese Weise die Ursachen für eventuell auftretende Fehler bei der Inbetriebnahme der zu regelnden Komponente auf die Installation begrenzt werden können. Die Inbetriebnahme dieser Funktion in der realen Anlage beschränkt sich darauf, die Regelungsparameter zu kontrollieren und gegebenenfalls anzupassen.

8 Zusammenfassung

Neu erstellte heiz- und raumluftechnische Anlagen befinden sich wider der allgemeinen Erwartung häufig nicht in ihrem planungsgemäßen Zustand. Die Anlagen funktionieren zwar im Hinblick darauf, dass beispielsweise die geforderten Raumlufbedingungen erreicht werden, weisen aber dennoch energetische Mängel auf, die für den Endverbraucher nicht erkennbar sind. Diese Mängel sind vor allem darauf zurückzuführen, dass prinzipielle Fehler in den Automatisierungsfunktionen zur Steuerung und Regelung der Anlagen bei der Inbetriebnahme unentdeckt bleiben.

Die Ursache hierfür liegt zum einen darin, dass heiz- und raumluftechnische Anlagen in der Regel als Einzelstücke, die auf den jeweiligen Anwendungsfall genau zugeschnitten sind, geplant und ausgeführt werden und somit keine Möglichkeit besteht, die Anlage im Gegensatz zu Serienprodukten in einer „Nullserie“ zu testen und zu überprüfen. Zum anderen besteht bei der Inbetriebnahme der Automatisierungsfunktionen heiz- und raumluftechnischer Anlagen aufgrund des vorgegebenen zeitlichen Ablaufs des Bauprozesses, der meist mit einem vertraglich festgelegten Übergabetermin endet, ein zeitliches Problem. Dieses resultiert aus dem Sachverhalt, dass die Automatisierungsfunktionen erst inbetriebgenommen und überprüft werden können, wenn die übrigen Anlagen installiert sind. In den der Inbetriebnahme und Abnahme der Automatisierungssysteme vorgelagerten Bauprozessen treten jedoch im Allgemeinen Verzögerungen auf. Dadurch wird der ohnehin knapp bemessene Zeitraum für die Inbetriebnahme der Automatisierungsfunktionen in den meisten Fällen so stark verkürzt, dass bei dieser – wenn überhaupt – nur noch elementare Sicherheitsfunktionen überprüft werden können.

In der vorliegenden Arbeit wird eine Methode vorgestellt, mit der Automatisierungsfunktionen heiz- und raumluftechnischer Anlagen unabhängig vom Stand des Baufortschritts und der Anlageninstallation überprüft werden können. Damit kann die Inbetriebnahme solcher Funktionen aus dem bisher fest vorgegeben zeitlichen Ablauf des Bauprozesses herausgelöst werden. Für die Überprüfung von Automatisierungsfunktionen werden dabei InbetriebnahmeprozEDUREN in einer virtuellen Testumgebung ausgeführt.

Die InbetriebnahmeprozEDUREN werden auf der Basis von grundsätzlichen Überlegungen zur Überprüfung von Automatisierungsfunktionen sowie von in der Praxis ermittelten Anforderungen an deren Inbetriebnahme erarbeitet. Die Prozeduren werden in einem eigens hierfür entwickelten Emulator für Automatisierungssysteme von heiz- und raumluftechnischen Anlagen durchgeführt. Der Emulator bildet dabei eine virtuelle Testumgebung, in der eine Betriebssimulation der zu steuernden und zu regelnden Anlagen mit dem zu überprüfenden Automatisierungssystem verbunden wird.

In der Simulation wird das Betriebsverhalten der zu steuernden und regelnden realen Anlage nachgebildet, indem das Verhalten der einzelnen heiz- und raumlufttechnischen Komponenten modelliert wird. Um eine möglichst große Abbildungsgenauigkeit zu erhalten und gleichzeitig das Betriebsverhalten der virtuellen Anlage mit dem der realen Anlage möglichst einfach abgleichen zu können, wird das Verhalten der einzelnen Anlagenkomponenten mit Hilfe von Kennlinienmodellen beschrieben. Die Modelle sind dabei so aufgebaut, dass sie mit Hilfe vom Hersteller vorgegebenen oder direkt an der betreffenden Komponente gemessenen Betriebspunkten parametrisiert werden können.

Bei der Inbetriebnahme von Automatisierungsfunktionen in der virtuellen Testumgebung können des weiteren im Gegensatz zur realen Anlage, in der die inneren und äußeren Lasten nicht oder nur mit großem Aufwand verändert werden können, mit Hilfe der Betriebssimulation beliebige realitätsnahe Randbedingungen generiert werden. Da diese Randbedingungen beliebig reproduzierbar sind, besteht für den Fall, dass bei einer Überprüfung Mängel festgestellt werden, die Möglichkeit, die gleichen Tests zu einem späteren Zeitpunkt zu wiederholen und so nachzuweisen, dass die Fehler behoben sind.

Die entwickelte Methode wird schließlich auf das Automatisierungssystem einer realen, im Betrieb befindlichen Anlage angewandt. In den Automatisierungsfunktionen dieser Anlage, die entsprechend den derzeit gültigen Vorschriften und Richtlinien beispielhaft geplant und ausgeführt ist, können mit Hilfe der erarbeiteten InbetriebnahmeprozEDUREN innerhalb kürzester Zeit bisher unentdeckte Mängel, die sich vor allem auf den Energieaufwand der Anlage auswirken, aufgezeigt werden. So wird beispielsweise eine Fehler in der Mischklappenregelung der Anlage festgestellt, der im Kühlfall einen deutlich erhöhten Kühlenergieaufwand zur Folge hat.

Mit der in dieser Arbeit vorgestellten Methode und dem zugehörigen Instrumentarium zur Überprüfung von Automatisierungsfunktionen heiz- und raumlufttechnischer Anlagen besteht erstmals die Möglichkeit, die Inbetriebnahme von Automatisierungssystemen aus dem bisher praktisierten zeitlichen Ablauf herauszulösen. Dadurch ist eine vollständige Überprüfung der in solchen Systemen implementierten Funktionen möglich. Der flächendeckende Einsatz der Methode könnte ein gewaltiges energetisches und wirtschaftliches Einsparpotential erschließen.

Literaturverzeichnis

- [1] Depenbrock, F.H.; Vogler, O. (Hrsg.): HOAI – Honorarordnung für Architekten und Ingenieure, Text mit amtlicher Begründung und Anmerkungen. Bundesanzeiger Verlagsgesellschaft, Köln, 1995
- [2] John, R.: Operating experience of building management systems, Proceedings 3rd International Congress on Building Energy Management. ICBEM, 1987.
- [3] Dipper, J.: Entwicklung einer Regelungsstrategie zur optimalen Betriebsführung der heiz- und raumlufthechnischen Anlagen eines Verwaltungsgebäudes. Universität Stuttgart, Lehrstuhl für Heiz- und Raumlufthechnik. Studienarbeit HLK 7D-265, Dezember 1994
- [4] May, W.; Park, C.: Building Emulation Computer Program for Testing of Energy Management and Control System Algorithms. NBSIR 85-3292, National Bureau of Standards, USA, 1995
- [5] Bork, P.; Linsenkirchner, E.: Anwendung des Gebäudemodells DYSIG bei der Entwicklung und Erprobung von Automatisierungskonzepten für den HLK-Bereich. 22. Int. TGA, Berlin, 1988
- [6] Lebrun, J.: IEA-Annex 17: Building Energy Management Systems, Evaluation and Emulation Techniques, Synthesis Report. Universität Liege, 1993
- [7] Haves, P.; Dexter, A.L.: IEA-Annex 17: Simulation of Local Loop Controls. Juni 1989, AN17-R6
- [8] Bach, H. et al.: VITE-BEMS Virtuelle Testumgebung für Building Energy Management Systeme. Endbericht zum AIF-Forschungsvorhaben Nr. 9568, Stuttgart, 1996
- [9] Bacher, C.: Aufbau einer virtuellen Testumgebung zur Bewertung von BEMS-Strategien. HLH 47, Nr. 9, September 1996
- [10] VDI 3184, Gebäudeleittechnik, Blatt 1: Begriffsbestimmungen, Blatt 2: Schnittstellen in Planung und Ausführung, Blatt 3: Hinweise für den Betreiber, Blatt 4: Ausrüstung der BTA zum Anschluss an die ZLT-G. VDI-Verlag, Düsseldorf, 1980.
- [11] : Allgemeine Technische Vertragsbedingungen für Bauleistungen: Raumlufthechnische Anlagen. DIN Deutsches Institut für Normung e.V.. Berlin, Mai 1998

- [12] VOB: Verdingungsordnung für Bauleistungen
- [13] VDI 2079: Abnahmeprüfung an Raumlufthechnischen Anlagen. VDI-Verlag, Düsseldorf, März 1983
- [14] DIN EN 12599: Lüftung von Gebäuden - Prüf- und Messverfahren für die Übergabe eingebauter raumlufthechnischer Anlagen. DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Berlin, August 2000
- [15] Rouvel, L: Raumkonditionierung. Springer Verlag, Berlin, 1978
- [16] Stephenson, D.; Mitalas, G.: Cooling Load Calculation by Thermal Response Factor Method. ASHRAE-Transactions 73, Teil 1, S.III.1.1/7, 1967
- [17] Knabe, G.: Frequenzverhalten ein- und mehrschichtiger Wände. Luft- und Kältetechnik 7(1971)2, Berlin, 1971
- [18] Jahn, A.: Methoden der energetischen Prozessbewertung raumlufthechnischer Anlagen und Grundlagen der Simulation. TU Berlin, Dissertation, 1978
- [19] Bach, H.; Claus, G.: Ermittlung des Nutzungsgrades von Heizungsanlagen. BMFT-FBT81-116, 1981
- [20] Ast, H.: Energetische Beurteilung von Warmwasserheizanlagen durch rechnerische Betriebssimulation. Universität Stuttgart, Dissertation, 1989
- [21] Stephan, W.: Energetische Beurteilung der Betriebsweise heiz- und raumlufthechnischer Anlagen durch rechnerische Betriebssimulation. Universität Stuttgart, Dissertation, 1991
- [22] Lebrun, J.; Strengnart, M.: Simulation of Residential Heating Systems. Proceedings of the International Conference on System Simulation in Buildings, Liege, Belgien, 1986
- [23] TRNSYS: A Transient System Simulation Program. Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin, Madison. USA, 1983
- [24] Lebrun, J.: IEA-Annex 10: System Simulation, Synthesis Report. Universität Liege, LBP, 1988
- [25] Toolkit For Primary HVAC System Energy Calculations. Joint Center for Energy Management, Department of Civil, Environmental and Architectural Engineering, University of Colorado at Boulder, USA
- [26] Brandemuehl, M.: A Toolkit For Secondary HVAC System Energy Calculations, Final Report, JCEM/TR/92-18, Joint Center for Energy Management, Department of Civil, Environmental and Architectural Engineering, University of Colorado at Boulder, USA, 1992

- [27] Hyvärinen, J. (Hrsg.): IEA-Annex 25: Real Time Simulation of HVAC-Systems for Building Optimization, Fault Detection and Diagnosis, Source Book, Technical Research Centre of Finland, Espoo, Finnland, 1995
- [28] Clark, R.; Kelly, G.; Park, C.: HVACSIM+, Building Systems and Equipment Simulation Program, Reference Manual. National Bureau of Standards, NBSIR 842996, Washington D.C., USA, 1995
- [29] Sahlin, P.; Bring, A.: IDA Solver, A Tool For Building and Energy System Simulation. Proceedings of the Second Building Simulation Conference IBPSA, Nizza, 1991
- [30] Yan, Q.; Su, J.; Lu, Z.; Jiang, Y.: A Realtime Digital Emulator of HVAC Systems. CLIMA 2000 Conference, Volume 6, Copenhagen, 1985
- [31] Novakovic, V.: HVAC-Dynamic Simulator and Emulator System. CIB 86 Advanced Building, Technological Proceedings of the 10th Triennial Kongress of the International Council for Building Research, Studies and Documentation, Vol. 1, Washington D.C., USA, 1986
- [32] Kärki, S.: IEA-Annex 17: Testing of the Tuning of a Commercial Controller with the VTT-Emulator. Oktober 1991, AN17-R39
- [33] Van der Kruk; Development of the TNO Building Emulator, Final Report. TNO-Report B-910982, Delft, Niederlande, 1991
- [34] Ohl, Münzberg, Held: Das GBG-Projekt MOHWIS – Modernisierung der Anlagenkomponenten, Optimierung der Energieversorgung, Hallenschwimmbad Waldhof-Ost, Innovation der Lüftungstechnik, Sanierung. GBG-Mannheimer Wohnungsbaugesellschaft mbH, Mannheim, 1998
- [35] VDI 3809, Prüfung heiztechnischer Anlagen. VDI-Verlag, Düsseldorf, Juni 1996
- [36] DIN 4747, Sicherheitstechnische Ausführung von Hausanschlussstationen zum Anschluss an Heizwasser-Fernwärmenetze. DIN Deutsches Institut für Normung e.V.. Berlin, Juli 1991
- [37] Caristi, A. J.: IEEE-488 - General Purpose Instrumentation Bus Manual. Academic Press, USA, 1989
- [38] Madjidi, M.: Beitrag zur modellbasierten Überwachung und Optimierung des Betriebes heiz- und raumluftechnischer Anlagen. Universität Stuttgart, Dissertation, 1996
- [39] Dexter, A.L.: Annex 34: Computer-aided Evaluation of HVAC System Performance: the Practical Application of Fault Detection and Diagnosis Techniques in Real Buildings. Proposal, Oxford University, Großbritannien, April 1997
- [40] Grob, R.F.; Harter, J.; Schmidt, M.; Bach, H.: COURAGE - Computergestützte Überprüfung von bestehenden heiz- und raumluftechnischen Anlagen. LHR 7-31, Universität Stuttgart, 2002

- [41] Bach, H.; Hinkelmann, M.; Madjidi, M.; Schmidt, F.: Optimierung von Anlagen der technischen Gebäudeausrüstung durch Integration von Planung, Computersimulation und Betrieb. IKE 4-134, Universität Stuttgart, 1992
- [42] LabVIEW5.0, Graphical Programming Environment: UserManual. National Instruments, Austin, USA, 1998
- [43] Dietrich, M.: Entwicklung einer flexibel konfigurierbaren Emulationsschnittstelle. Universität Stuttgart, Lehrstuhl für Heiz- und Raumluftechnik. Studienarbeit LHR 7D-427, Juli 2002
- [44] Fieldpoint, Data Aquisition System: Users Manual, National Instruments, Austin, USA, 1999
- [45] Kofler, M.: Visual Basic 6, Programmiertechniken, Datenbanken, Internet, Addison-Wesley-Verlag-Longman, München, 1998
- [46] Grammling, F.: Rechnergestützte Analyse von Heizungsrohrnetzen. Universität Stuttgart, Dissertation, 1988
- [47] DIN 24163 Ventilatoren; Leistungsmessung; Normkennlinien. Deutsches Institut für Normung, Berlin, 1985
- [48] TableCurve 3D, Automated Surface Fitting Software, UserManual. Jandel Scientific, San Rafael, USA, 1993
- [49] Liebecq, G.: Description of the coil model (TRNSYS TYPE 51) used in the Collins Building, Exercise 2, März 1990
- [50] VDI 2076: Leistungsnachweis für Wärmetauscher mit zwei Massenströmen, VDI-Verlag, Düsseldorf, Oktober 1995
- [51] Kühne, H.: Winke für die Bestellung und Leistungsprüfung von Wärmetauschern mit Kurventafeln für den Abnehmer, Carl Mahold Verlagsbuchhandlung, Halle an der Saale, 1945
- [52] Kühne, H.: Die Grundlagen der Berechnung von Oberflächen-Wärmeaustauschern, Vandenhoeck & Ruprecht, Göttingen, 1949
- [53] Demirkapi, S.: Entwicklung eines auf gemessenen Betriebspunkten basierenden Kennlinienmodells für Wärmeübertrager. Universität Stuttgart, Lehrstuhl für Heiz- und Raumluftechnik. Diplomarbeit LHR 7D-432, Dezember 2002
- [54] Bach, H.: Grundlagen der Heiz- und Raumluftechnik. Vorlesungsmanuskript, Universität Stuttgart, 1997.
- [55] Honeywell EXCEL 500, Bedienhandbuch, Honeywell AG, Schönaich, 1998

Anhang

A Datenpunkte des Automatisierungssystems

Tabelle A.1: Beschreibung der Datenpunkte der analogen DDC-Eingänge
(Datenflussrichtung „Simulation → DDC“)

Kanal-ID:	Datenpunkt	Beschreibung	Einheit
1	80L01_DL05MW01KLAU	Rückmeldung Außenluft-Klappe	%
2	80L01_DM16MW01F_MI	Mischlufttemperatur	C
3	80L01_DL26MW05LKRV	Rückmeldung Ventil Kühler	%
4	80L01_DM13MW02LK__	Rücklauftemperatur Kühler	C
5	80L01_DL22MW08LHRV	Rückmeldung Ventil Erhitzer	%
6	80L01_DM13MW03LHNE	Rücklauftemperatur Erhitzer	C
7	80L01_DM25MW09F_AB	Feuchte Abluft	% rel. Feuchte
8	80L01_DM23MW04F_ZU	Feuchte Zuluft	% rel. Feuchte
9	80L01_DM07MW08F_AB	Ablufttemperatur	C
10	80L01_DM05MW05F_ZU	Zulufttemperatur	C
11	80L01_DM33MW07F_AB	Druck im Abluftkanal	Pa
12	80L01_DM33MW06F_ZU	Druck im Zuluftkanal	Pa
13	80L01_DM01MW10F_AU	Außenlufttemperatur	C
14	80L01_DL01MW12FUAB	Rückmeldung FU Abluftventilator	%
15	80L01_DL00MW09FUZU	Rückmeldung FU Zuluftventilator	%
16	80L02_DL05MW01KLAU	Rückmeldung Außenluft-Klappe	%
17	80L02_DM16MW01F_MI	Mischlufttemperatur	C
18	80L02_DL26MW05LKRV	Rückmeldung Ventil Kühler	%
19	80L02_DM13MW02LK__	Rücklauftemperatur Kühler	C
20	80L02_DL22MW08LHRV	Rückmeldung Ventil Erhitzer	%
21	80L02_DM13MW03LHNE	Rücklauftemperatur Erhitzer	C
22	80L02_DM25MW09F_AB	Feuchte Abluft	% rel. Feuchte
23	80L02_DM23MW04F_ZU	Feuchte Zuluft	% rel. Feuchte
24	80L02_DM07MW08F_AB	Ablufttemperatur	C
25	80L02_DM05MW05F_ZU	Zulufttemperatur	C
26	80L02_DM33MW07F_AB	Druck im Abluftkanal	Pa
27	80L02_DM33MW06F_ZU	Druck im Zuluftkanal	Pa
28	80L02_DM01MW10F_AU	Außenlufttemperatur	C
29	80L02_DL01MW12FUAB	Rückmeldung FU Abluftventilator	%
30	80L02_DL00MW09FUZU	Rückmeldung FU Zuluftventilator	%
31	nicht belegt		
32	nicht belegt		

Tabelle A.2: Beschreibung der Datenpunkte der digitalen DDC-Eingänge
(Datenflussrichtung „Simulation → DDC“)

Kanal-ID:	Datenpunkt	Beschreibung	Einheit
33	80L01_DM61SM02B___	Frostschutz	On/Off
34	80L01_DL26SM01LKPU	Störmeldung Pumpe Kühler	On/Off
35	80L01_DL32SM07LBFU	Störmeldung FU Pumpe Befeuchter	On/Off
36	80L01_DL32SM02LBPU	Störmeldung Befeuchter	On/Off
37	80L01_DL32SMTROC	Trockenlaufschutz	On/Off
38	80L01_DM63SM04B_ZU	Feuchte max. Zuluft	On/Off
39	80L01_DL22SM03LHNE	Störmeldung Pumpe Erhitzer	On/Off
40	80L01_DL00SM01VEZU	Reparaturschalter Zuluft	On/Off
41	80L01_DL00SM09FUZU	Störmeldung FU Zuluftventilator	On/Off
42	80L01_DL00SM04VEZU	Störmeldung Zuluftventilator	On/Off
43	80L01_DL01SM02VEAB	Reparaturschalter Abluft	On/Off
44	80L01_DL01SM12FUAB	Störmeldung FU Abluftventilator	On/Off
45	80L01_DL01SM05VEAB	Störmeldung Abluftventilator	On/Off
46	80L02_DM61SM02B___	Frostschutz	On/Off
47	80L02_DL26SM01LKPU	Störmeldung Pumpe Kühler	On/Off
48	80L02_DL32SM07LBFU	Störmeldung FU Pumpe Befeuchter	On/Off
49	80L02_DL32SM02LBPU	Störmeldung Befeuchter	On/Off
50	80L02_DL32SMTROC	Trockenlaufschutz	On/Off
51	80L02_DM63SM04B_ZU	Feuchte max. Zuluft	On/Off
52	80L02_DL22SM03LHNE	Störmeldung Pumpe Erhitzer	On/Off
53	80L02_DL00SM01VEZU	Reparaturschalter Zuluft	On/Off
54	80L02_DL00SM09FUZU	Störmeldung FU Zuluftventilator	On/Off
55	80L02_DL00SM04VEZU	Störmeldung Zuluftventilator	On/Off
56	80L02_DL01SM02VEAB	Reparaturschalter Abluft	On/Off
57	80L02_DL01SM12FUAB	Störmeldung FU Abluftventilator	On/Off
58	80L02_DL01SM05VEAB	Störmeldung Abluftventilator	On/Off
59	80L01_DL05BM04KLAU	Betrieb Außenluftklappe	On/Off
60	80L01_DL12WM01FIAU	Wartung Filter Außenluft	On/Off
61	80L01_DL26BM01LKPU	Betriebsmeldung Pumpe Kühler	On/Off
62	80L01_DL32BM02LBPU	Betriebsmeldung Pumpe Befeuchter	On/Off
63	80L01_DS19BM13UVEK	Betriebsmeldung UV-Entkeimung	On/Off
64	80L01_DL22BM03LHNE	Betriebsmeldung Pumpe Erhitzer	On/Off

Tabelle A.3: Beschreibung der Datenpunkte der digitalen DDC-Eingänge
(Datenflussrichtung „Simulation → DDC“)

Kanal-ID:	Datenpunkt	Beschreibung	Einheit
65	80L01_DL00BM09FUNB	Betriebsmeldung Zuluftventilator	On/Off
66	80L01_DL00SM01VEKR	Störmeldung Keilriemen Zuluftventilator	On/Off
67	80L01_DL01BM12FUNB	Betriebsmeldung Abluftventilator	On/Off
68	80L01_DL01SM02VEKR	Störmeldung Keilriemen Abluftventilator	On/Off
69	80L01_DL11WM05FIZU	Wartung Filter Zuluft	On/Off
70	80L01_DL07BM10KLZU	Betriebsmeldung Klappe Zuluft	On/Off
71	80L01_DL08BM11KLAB	Betriebsmeldung Klappe Abluft	On/Off
72	80L02_DL05BM04KLAU	Betriebsmeldung Außenluftklappe	On/Off
73	80L02_DL12WM01FIAU	Wartung Filter Außenluft	On/Off
74	80L02_DL26BM01LKPU	Betriebsmeldung Pumpe Kühler	On/Off
75	80L02_DL32BM02LBPU	Betriebsmeldung Pumpe Befeuchter	On/Off
76	80L02_DS19BM13UVEK	Betriebsmeldung UV-Entkeimung	On/Off
77	80L02_DL22BM03LHNE	Betriebsmeldung Pumpe Erhitze	On/Off
78	80L02_DL00BM09FUNB	Betriebsmeldung Zuluftventilator	On/Off
79	80L02_DL00SM01VEKR	Störmeldung Keilriemen Zuluftventilator	On/Off
80	80L02_DL01BM12FUNB	Betriebsmeldung Abluftventilator	On/Off
81	80L02_DL01SM02VEKR	Störmeldung Keilriemen Abluftventilator	On/Off
82	80L02_DL11WM05FIZU	Wartung Filter Zuluft	On/Off
83	80L02_DL07BM10KLZU	Betriebsmeldung Zuluftklappe	On/Off
84	80L02_DL08BM11KLAB	Betriebsmeldung Abluftklappe	On/Off
85	80L01_DM64SM06ZUMD	Max. Druck Zuluft	On/Off
86	80L01_DM64SM07ABMD	Max. Druck Abluft	On/Off
87	80L02_DM64SM06ZUMD	Max. Druck Zuluft	On/Off
88	80L02_DM64SM07ABMD	Max. Druck Abluft	On/Off
89	80L01_DS19SM08UVEK	Störmeldung UV-Entkeimung	On/Off
90	80L02_DS19SM08UVEK	Störmeldung UV-Entkeimung	On/Off
91	80L01_DLRESDI01	Betriebsmeldung UV-Entkeimung	On/Off
92	80L02_DLRESDI02	Betriebsmeldung UV-Entkeimung	On/Off
93	80E23_DE1BM05_QUI	Quittierung bei Störungen	On/Off
94	nicht belegt		On/Off
95		Störmeldung Kältemaschine	On/Off
96	nicht belegt		On/Off

Tabelle A.4: Beschreibung der Datenpunkte der analogen DDC-Ausgänge
(Datenflussrichtung „DDC → Simulation“)

Kanal-ID:	Datenpunkt	Beschreibung	Einheit
1	80L01_DL06ST03KLUM	Stellsignal Außenluft-Klappe	%
2	80L01_DL26ST05LKRV	Stellsignal Kühler	%
3	80L01_DL32ST07LBFU	Stellsignal Ventil Kühler	%
4	80L01_DL22ST08NERV	Stellsignal Erhitzer	%
5	80L01_DL00ST09FUZU	Stellsignal Zuluftventilator	%
6	80L01_DL02ST12FUAB	Stellsignal Abluftventilator	%
7	80L02_DL06ST03KLUM	Stellsignal Umluftklappe	%
8	80L02_DL26ST05LKRV	Stellsignal Kühler	%
9	80L02_DL32ST07LBFU	Stellsignal Befeuchter	%
10	80L02_DL22ST08NERV	Stellsignal Erhitzer	%
11	80L02_DL00ST09FUZU	Stellsignal Zuluftventilator	%
12	80L02_DL01ST12FUAB	Stellsignal Abluftventilator	%
13	80L02_DL05ST01KLAU	Stellsignal Außenluftklappe	%
14	80L01_DL05ST01KLAU	Stellsignal Außenluftklappe	%
15	nicht belegt		
16	nicht belegt		

Tabelle A.5: Beschreibung der Datenpunkte der digitalen DDC-Ausgänge
(Datenflussrichtung „DDC → Simulation“)

Kanal-ID:	Datenpunkt	Beschreibung	Einheit
17	80L01_DL05SB04KLAU	Auf/Zu Außenluftklappe	On/Off
18	80L01_DL26SB01LKPU	Ein/Aus Kühler Pumpe	On/Off
19	80L01_DL32SB07LBFU	Freigabe FU Befeuchter	On/Off
20	80L01_DL32SB06LBMV	Auf/Zu Ablauf? Befeuchter	On/Off
21	80L01_DL22SB03LHNE	Ein/Aus Pumpe Erhitzer	On/Off
22	80L01_DS19SB22UVEK	UV-Entkeimung	On/Off
23	80L01_DL00SB09FUZU	Freigabe FU Ventilator Zuluft	On/Off
24	80L01_DL01SB12FUAB	Freigabe FU Ventilator Abluft	On/Off
25	80L01_DL07SB10KLZU	Auf/Zu Zuluftklappe	On/Off
26	80L01_DL08SB11KLAB	Auf/Zu Abluftklappe	On/Off
27	80L02_DL05SB04KLAU	Auf/Zu Außenluftklappe	On/Off
28	80L01_DL32SB21ZUMV	Auf/Zu 2.Befeuchterreihe	On/Off
29	nicht belegt		
30	nicht belegt		
31	nicht belegt		
32	nicht belegt		
33	80L02_DL26SB01LKPU	Ein/Aus Pumpe Kühler	On/Off
34	80L02_DL32SB07LBFU	Freigabe FU Befeuchter	On/Off
35	80L02_DL32SB06LBMV	Auf/Zu Ablauf? Befeuchter	On/Off
36	80L02_DL22SB03LHNE	Ein/Aus Pumpe Erhitzer	On/Off
37	80L02_DL00SB09FUZU	Freigabe FU Ventilator Zuluft	On/Off
38	80L02_DL32SB21ZUMV	Auf/Zu 2.Befeuchterreihe	On/Off
39	80L02_DL01SB12FUAB	Freigabe FU Ventilator Abluft	On/Off
40	80L02_DL07SB10KLZU	Auf/Zu Zuluftklappe	On/Off
41	80L02_DL08SB11KLAB	Auf/Zu Abluftklappe	On/Off
42	80L01_DL32SB20ABMV		On/Off
43	80L02_DL32SB20ABMV		On/Off
44	80L02_DS19SBUVEK	UV-Entkeimung	On/Off
45	nicht belegt		
46	nicht belegt		
47	nicht belegt		
48	nicht belegt		

B Programmablauf im Emulationsmodul

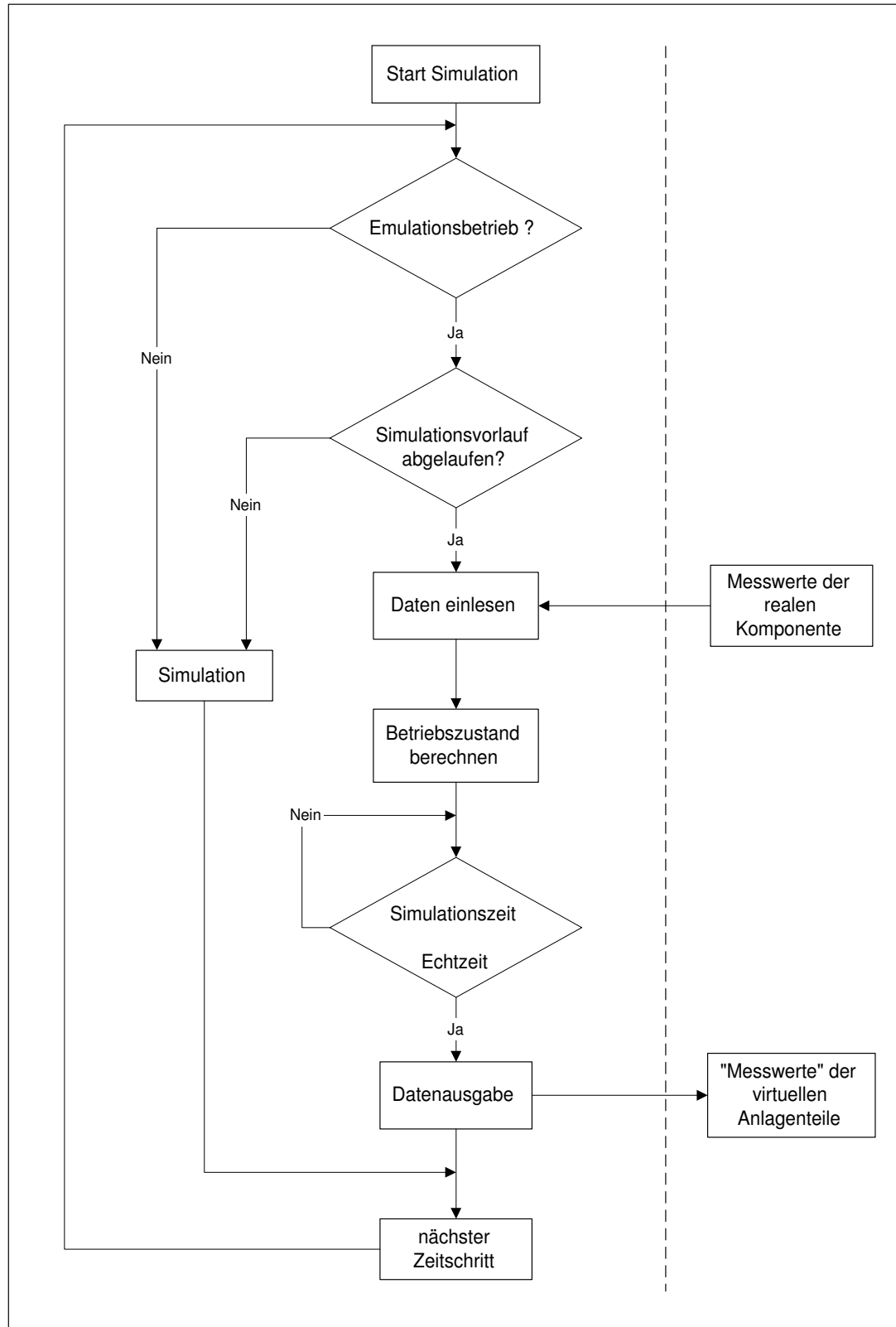


Bild B.1: Programmablauf innerhalb des Emulationstypes

Lebenslauf

Persönliche Angaben:

Name: Robert Franz Grob
Geburtstag und Geburtsort: 22.12.1969 in Gerolzhofen
Familienstand: ledig
Eltern: Notburga Grob, geb. Vogt, Hausfrau
Hubert Grob, Landwirt

Schulbildung:

1976 - 1980	Grundschule Sulzheim-Alitzheim
1980 - 1986	Gymnasium Frankenlandschulheim Schloß Gaibach/Außenstelle Gerolzhofen
1986 - 1989	Walther-Rathenau-Gymnasium in Schweinfurt
Juni 1989	Abschluss „Abitur“

Hochschulausbildung:

1990 - 1996	Universität Stuttgart, Studium der Fachrichtung Maschinenwesen
Juni 1996	Hauptdiplom (Dipl.-Ing.)
1993 - 1994	University of Colorado at Boulder Building Systems Program
Mai 1994	Master of Science (M.Sc.)

Berufstätigkeit:

Juli 1996 bis April 2003	Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Heiz- und Raumluft- technik der Universität Stuttgart
-----------------------------	---

In dieser Reihe sind erschienen:

- | | | |
|-------------------|--|--------------------------|
| Madjidi, M.: | Beitrag zur modellbasierten Überwachung und Optimierung des Betriebes heiz- und raumluftechnischer Anlagen
Mitteilung Nr. 1, 1996 | ISBN 3 - 9805218 - 0 - X |
| Eisenmann, G.: | Entwicklung einer allgemeinen Bewertungsmethode für Heiz- und Trinkwassererwärmungssysteme am Beispiel einer Wohnung in einem Mehrfamilienhaus
Mitteilung Nr. 2, 1997 | ISBN 3 - 9805218 - 1 - 8 |
| Bauer, M.: | Methode zur Berechnung und Bewertung des Energieaufwandes für die Nutzenübergabe bei Warmwasserheizanlagen
Mitteilung Nr. 3, 1999 | ISBN 3 - 9805218 - 2 - 6 |
| Tritschler, M.: | Bewertung der Genauigkeit von Heizkostenverteilern
Mitteilung Nr. 4, 1999 | ISBN 3 - 9805218 - 3 - 4 |
| Reichert, E.: | Ein Verfahren zur Bestimmung des Energie- und Stoffaufwands zur Luftbehandlung bei raumluftechnischen Anlagen
Mitteilung Nr. 5, 2000 | ISBN 3 - 9805218 - 4 - 2 |
| Krieg, D.: | Entwicklung einer Methode zur Auswahl raumluftechnischer Systeme mit Hilfe neuronaler Netze
Mitteilung Nr. 6, 2000 | ISBN 3 - 9805218 - 5 - 0 |
| Herrmann, St.: | Technik der quasi homogenen Verbrennung von Heizöl EL
Mitteilung Nr. 7, 2002 | ISBN 3 - 9805218 - 6 - 9 |
| Messerschmid, H.: | Entwicklung und Validation eines numerischen Verfahrens zur Beurteilung von Trinkwasserspeichern
Mitteilung Nr. 8, 2002 | ISBN 3 - 9805218 - 7 - 7 |
| Beck, Chr.: | Thermisches Verhalten von Kühldecken
Mitteilung Nr. 9, 2002 | ISBN 3 - 9805218 - 8 - 5 |
| Dipper, J.: | Der Energieaufwand der Nutzenübergabe bei Einzelheizgeräten
Mitteilung Nr. 10, 2002 | ISBN 3 - 9805218 - 9 - 3 |
| Grob, R.F.: | Überprüfung von Automatisierungsfunktionen heiz- und raumluftechnischer Anlagen
Mitteilung Nr. 11, 2003 | ISBN 3 - 9808572 - 0 - 4 |

Weitere Dissertationen aus der Heiz- und Raumlufthtechnik sind erhältlich über den

*Verein der Förderer der Forschung im Bereich Heizung • Lüftung • Klimatechnik
Stuttgart e.V., Pfaffenwaldring 6a, 70569 Stuttgart*

- | | |
|-----------------|--|
| Grammling, F.: | Rechnergestützte Analyse von Heizungsrohrnetzen (1988) |
| Ast, H.: | Energetische Beurteilung von Warmwasserheizanlagen durch rechnerische Betriebssimulation (1989) |
| Stephan, W.: | Energetische Beurteilung der Betriebsweise heiz- und raumlufthtechnischer Anlagen durch rechnerische Betriebssimulation (1991) |
| Sauter, H.: | Maßgebende Stoffwerttemperaturen und Einfluß des Luftdruckes bei freier Konvektion (1993) |
| Ni, J.: | Rechenverfahren zur Bestimmung des Betriebsverhaltens adiabater Wäscher (1994) |
| Diemer, R.: | Beurteilungskriterien für heizenergetische Verbesserungsmaßnahmen bei warmwasserbeheizten Wohngebäuden (1994) |
| Hirschberg, R.: | Rechnergestützte Planung heiz- und raumlufthtechnischer Anlagen (1995) |