

# **Beitrag zur modellbasierten Überwachung und Optimierung des Betriebes heiz- und raumluf- technischer Anlagen**

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

vorgelegt von

**Madjid Madjidi**

geboren in Mainz

Hauptberichter:

Prof. Dr.-Ing. H. Bach

Mitberichter:

Prof. Dr.-Ing. E. Welfonder

Tag der Einreichung:

18. Januar 1995

Tag der mündlichen Prüfung:

30. April 1996



## Kurzfassung

Es wird nachgewiesen, daß sowohl das Erkennen von Betriebsfehlern als auch die Betriebsführung von heiz- und raumluftechnischen Anlagen durch eine betriebsbegleitende Simulation verbessert werden kann.

Das Erkennen von Fehlern ist durch einen ständigen Soll-/Istvergleich zu erreichen. Für die Fehlerdiagnose können Regelbäume der eigentlichen Fehlererkennung nachgeschaltet werden.

Während herkömmliche Energiemanagementfunktionen nach Erfahrungswerten fest eingegeben werden und sich daher nicht einem realen transienten Prozeßablauf automatisch anpassen, liefern um Simulationsmodelle erweiterte Energiemanagementfunktionen deutlich bessere Ergebnisse. Berücksichtigt wird hier insbesondere das Gebäudeverhalten.

Die für eine modellbasierte Betriebsüberwachung und Optimierung erforderlichen Simulationsmodelle können mit informationstechnisch unterschiedlichen Methoden gebildet werden. Nur mit Hilfe von Kennlinienmodellen können aber sowohl Meßinformationen aus dem realen Betrieb als auch Planungs- und Ausführungsunterlagen verarbeitet und so die Informationslücken auf Grund der üblichen knappen Instrumentierung von heiz- und raumluftechnischen Anlagen ausgeglichen werden.

Die modellbasierte Fehlererkennung und Betriebsführung werden am Simulationsmodell eines Bürogebäudes mit Variabel-Volumenstrom-Anlage erprobt. Grundlage des Simulationsbeispiels bilden Planungs- und Ausführungsdaten eines realen Projekts. Zur Kalibrierung des Simulationsmodells werden die Meßdaten der im Gebäude installierten DDC-Anlage ausgewertet. Als Beispiele der modellbasierten Betriebsführung werden für den Winterbetrieb die Optimierung von Einschaltzeiten und für den Sommerbetrieb die Optimierung von Nachkühlzeiten bei unterbrochenem Anlagenbetrieb vorgestellt.

## Abstract

It is validated that both the detection of operational faults and the performance management of heating and air-conditioning systems can be improved by online simulation.

The detection of faults can be realized by permanently comparing predicted and measured data. The fault detection procedure can be followed by fault diagnosis based on structures of rules.

Standard energy management functions are implemented based on empirical knowledge. Energy management functions lead to obviously better results if extended by simulation models. Especially, the building behaviour is taken into account by these models.

For model based fault detection and optimization simulation models can be established by using different computational techniques. But characteristic curve models only, help to process both measured data of the real building and design and construction documents. Such the lack of information given by scarce instrumentation of heating and air-conditioning systems can be compensated.

Model based fault detection and performance management are tested by simulating an office building with a variable airvolume system. The simulation example is constituted using design and construction data of a real project. Measured data of the installed DDC-system are used to calibrate the simulation model. Examples for model based performance optimization are presented for an intermittent operation: optimization of start/stop times for the winter mode and the optimization of night cooling for the summer mode.

# Inhalt

Formelzeichen	7
Indizes	8
Abkürzungen	9
<b>1 Einleitung</b>	<b>10</b>
<b>2 Literaturübersicht</b>	<b>13</b>
2.1 Gebäude- und Anlagensimulation . . . . .	13
2.1.1 Thermische Gebäudesimulation . . . . .	13
2.1.2 Betriebssimulation von Heiz- und RLT-Anlagen . . . . .	14
2.1.3 Aufbau von Programmen zur Simulation von Heiz- und RLT-Anlagen	17
2.2 Betriebsüberwachung in Gebäuden . . . . .	18
2.2.1 Entwicklung und Aufbau der Gebäudeleittechnik . . . . .	18
2.2.2 Bisherige Vorgehensweisen zur Betriebsführung . . . . .	19
2.3 Systemidentifikation . . . . .	22
2.4 Konsequenzen für die vorliegende Arbeit . . . . .	23
<b>3 Simulationsmodelle</b>	<b>24</b>
3.1 Gebäude . . . . .	24
3.2 Heiz- und RLT-Komponenten . . . . .	32
3.2.1 Heizkörper . . . . .	32
3.2.2 Wärmetauscher . . . . .	34
3.2.3 Luftfilter . . . . .	36
3.2.4 Luftkanal . . . . .	37
3.2.5 Stellglieder . . . . .	38
3.2.6 Radialventilator . . . . .	39
3.2.7 Luftklappen . . . . .	40
3.2.8 PI-Regler . . . . .	42
3.2.9 BEMS . . . . .	43

<b>4</b>	<b>Konzept zur modellbasierten Betriebsbegleitung</b>	<b>45</b>
4.1	Modellbildung . . . . .	46
4.1.1	Modellkategorien . . . . .	46
4.1.2	Planungs- und Ausführungsunterlagen . . . . .	47
4.1.3	Beschreibung von Kennlinien durch Polynomgleichungen . . . . .	48
4.2	Dynamische Betriebsoptimierung . . . . .	52
4.2.1	Optimierung von Heizzeiten . . . . .	52
4.2.2	Optimierung von Nachtkühlzeiten . . . . .	54
4.3	Fehlererkennung und Fehlerdiagnose . . . . .	56
4.3.1	Typische Betriebsfehler . . . . .	56
4.3.2	Regelbäume zur Fehlerdiagnose . . . . .	59
<b>5</b>	<b>Simulationsbeispiel</b>	<b>62</b>
5.1	Objektbeschreibung . . . . .	62
5.1.1	Gebäude . . . . .	62
5.1.2	Heiz- und RLT-Anlage . . . . .	65
5.1.3	Betriebsweise . . . . .	68
5.1.4	Aufbau des Simulationmodells . . . . .	71
5.1.5	Vergleich zwischen Simulation und Messung . . . . .	76
5.1.6	Simulation des Referenzzustandes . . . . .	80
5.2	Dynamische Betriebsoptimierung . . . . .	85
5.2.1	Optimierung von Heizzeiten . . . . .	85
5.2.2	Optimierung von Nachtkühlzeiten . . . . .	89
5.2.3	Jahresenergiebedarf der betrachteten Betriebsweisen . . . . .	89
5.3	Simulation von Betriebsfehlern . . . . .	94
5.3.1	Verschmutzter Luftfilter . . . . .	94
5.3.2	Defekter Temperatursensor . . . . .	97
5.3.3	Verschmutzter Luftkühler . . . . .	100
5.3.4	Defekte Pumpe . . . . .	103
<b>6</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>106</b>
<b>7</b>	<b>Literatur</b>	<b>108</b>