

Energetische Beurteilung der Betriebsweise heiz- und raumlufttechnischer Anlagen durch rechnerische Betriebssimulation

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

vorgelegt von
Wolfram Stephan
aus Kirchheim/Teck

Hauptberichter:	Prof. Dr.-Ing. H. Bach
Mitberichter:	Prof. Dr.-Ing. E. Welfonder
	Prof. Dr. J. Lebrun
Tag der mündlichen Prüfung:	29. November 1991

Institut für Kernenergetik und Energiesysteme der
Universität Stuttgart

1991

Kurzfassung

Moderne Regelungen und Steuerungen ermöglichen energetisch günstigere Betriebsweisen von heiz- und raumluftechnischen Anlagen, dadurch daß insbesondere einzelne Prozesse bedarfsabhängig und in sich optimal geführt und unterschiedliche Prozeßbereiche streng koordiniert werden. Für die Entwicklung und Beurteilung solcher Betriebsweisen wird eine neue Methode vorgestellt.

Die Gesamtanlage wird in vier Prozeßbereiche unterteilt: Energiewandlung zur Wärme- und Kälteerzeugung, Energieverteilung, Luftbehandlung und -verteilung und das Gebäude. Zur energetischen Beurteilung werden die Energieströme an den Grenzen dieser Prozeßbereiche bestimmt und jeweils aus dem Verhältnis von Energieaufwand zu Energieerträgen Nutzungsgrade und Arbeitszahlen abgeleitet. Die einzuhaltenden Behaglichkeitsbedingungen im Gebäude werden über die operative Temperatur, die Raumluftfeuchte, den Außenluftwechsel und den Unzufriedenheitsgrad der Nutzer (PPD-Wert) erfaßt.

Das hierzu entwickelte Rechenverfahren erlaubt, alle Gebäude- und Anlagenkomponenten einzeln und in ihrem Zusammenwirken abzubilden. Es ist modular aufgebaut. Der Gebäudesimulationsteil bildet das dynamische Verhalten und die Wärmeübergabe von der Anlage an das Gebäude detailliert ab. Modelle für RLT-Anlagenkomponenten wie Rippenrohrwärmetauscher, Induktionsgeräte, Wärmerückgewinner, Luftbefeuchter, Ventilatoren und Luftkanäle werden vorgestellt. Neu ist ein Rechenverfahren zur Bestimmung der Druck- und Massenstromverteilung in beliebig konfigurierten und betriebenen Rohr- und Kanalnetzen.

Beispielhaft werden energiesparende Betriebsweisen diskutiert und die damit erzielbaren Einsparpotentiale bestimmt. Als Beispielobjekt wird ein Bürogebäude mit einer konventionellen Variabel-Luftstrom-Anlage herangezogen. Die Anlage wird im Referenzzustand streng konventionell betrieben. Untersucht werden: Minimierung der Gebäudelasten (Beleuchtungs- und Jalousiensteuerung), Ausnutzung des Bereiches behaglicher Bedingungen der Raumtemperatur und Feuchte (Null-Energieband), Verbesserung des Prozeßverlaufs der Zuluft in der Klimazentrale durch Ausnutzung des Energie- und Feuchteinhalts der Außen- und der Abluft (Enthalpie-Regelung, Nachtlüften), sowie Sollwertoptimierung für die Wärme- und Kälteerzeugung bzw. -verteilung.

Für die bereits im Ausgangszustand hochwertige Anlage wird durch den Einsatz dieser Funktionen ein großes Energieeinsparpotential erschlossen. Das größte Potential ist im Prozeßbereich 'Gebäude' vorhanden, wo die Anforderungen an die Anlagen formuliert werden. Insbesondere die Anforderungen der Nutzer an die Behaglichkeitszustände beeinflussen den Energiebedarf.

Abstract

Modern controllers allow an energetically efficient operation of heating and air conditioning systems, especially by demand dependant and optimal operation of single processes and a strong coordination of different process areas. A new method is presented for development and evaluation of such operation modes.

The total system is divided in four process areas: energy generation for hot and cold water production, energy distribution, air treatment and distribution and the building. The energetic evaluation is done by calculating the energy flows on the boundaries of these process areas. Efficiencies and coefficients of performance (COP) values are calculated by the relationship between energy demand and use. The comfort conditions in the building are included in the evaluation by observing operative temperature, room humidity, outdoor air exchange rate and the number of dissatisfied people (PPD-value).

The calculation method developed for this purpose has a modular structure. This allows to simulate all building and system components themselves as well as their interaction.

The building simulation part applies to a detailed modelling of dynamic behaviour and of heat transfer from the system to the building. Models for components of air conditioning systems like coils, induction units, heat recovery systems, humidifier, fans and ducts are presented.

There is a new calculation method for the pressure and mass flow rate distribution in arbitrary configured and operated pipe and duct networks.

Some energy efficient operation modes are discussed by example and their energy saving potential is predicted for an office building with a Variabel-Air-Volume-System. The reference is a strongly conventional operated system.

The minimization of the building loads (daylight control), the exploitation of the comfort range of room temperature and humidity (zero energy band), the improvement of the air handling process in the air conditioning system by usage of sensible and latent heat of outdoor and return air (enthalpy control, ventilation at night) as well as demand dependant operation and set point reset of heat generation and distribution are the most important evaluated functions.

If these functions are applied to operate a modern HVAC system a big energy saving potential can be shown. The largest energy saving potential is found within the process area 'building', where the demands on the system are determined. Especially the user demand on comfort conditions determines the energy consumption.

Inhaltsverzeichnis

Häufig verwendete Formelzeichen	11
1 Einleitung	15
2 Literaturüberblick	17
3 Beurteilungsmethode	24
3.1 Beurteilung des Energiebedarfs	24
3.1.1 Energetische Prozesse in heiz- und raumlufttechnischen Anlagen . .	25
3.1.2 Darstellung der Energieströme im Gebäude und den Anlagen	29
3.1.3 Gesamtenergiebedarf	31
3.1.4 Energieaufwand und Nutzen bei der Energiewandlung	31
3.1.5 Energieaufwand und Nutzen bei der Energieverteilung	31
3.1.6 Energieaufwand und Nutzen bei der Luftbehandlung und Luftverteilung	32
3.1.7 Energieaufwand und Energienutzen im Gebäude	34
3.1.8 Energetische Kenngrößen für Heiz- und RLT-Anlagen	36
3.2 Beurteilung der Behaglichkeitszustände	38
3.2.1 Thermische Behaglichkeit	38
3.2.2 Lufterneuerung und Raumluftqualität	41
3.2.3 Kenngrößen zur Beurteilung der thermischen Behaglichkeit	42
4 Simulationsprogramm	43
4.1 Aufbau des Rechenprogramms	44
4.1.1 Organisations- und Lösungsprogramm	44
4.1.2 Modelle für Einzelkomponenten	46
4.1.3 Programme zur Datenein- und Datenausgabe	46
4.1.4 Ablauf der Betriebssimulation	47
4.2 Thermisches Modell des Gebäudes	48
4.2.1 Wärmespeichernde Umschliessungsflächen	48
4.2.2 Nicht-wärmespeichernde Umschließungsflächen	50

4.2.3	Raumluft und innere Speichermassen	51
4.3	Thermische Modelle von Komponenten der Luftbehandlung und Luftverteilung	55
4.3.1	Rippenrohrwärmetauscher	55
4.3.2	Wärmerückgewinner	65
4.3.3	Luftbefeuchter	69
4.3.4	Ventilatoren	71
4.3.5	Luftkanäle	73
4.3.6	Induktionsgeräte	74
4.4	Thermische Modelle für die Komponenten der Energiewandlung und Verteilung	78
4.4.1	Verteilnetze	78
4.4.2	Pumpen	79
4.4.3	Heizkessel	79
4.4.4	Kältemaschinen und Kühltürme	79
4.5	Modelle der regel- und steuerungstechnischen Anlagen	80
4.5.1	Regelkreise in heiz- und raumlufttechnischen Anlagen	82
4.5.2	Komponenten einer Gesamtleitebene	83
4.5.3	Komponenten der Einzelleitebene	83
4.5.4	Sensoren und Aktoren	87
4.6	Modelle zur Druck- und Massenstromberechnung in Rohr- und Kanalnetzen	88
4.6.1	Modelle für Ventilatoren und Pumpen	93
4.6.2	Modelle für Einzelwiderstände der Heiz- und RLT-Anlagenkomponenten	94
5	Energetisch günstige Betriebsweisen von heiz- und raumlufttechnischen Anlagen	97
5.1	Reduzierung der Gebäudelasten	98
5.2	Reduzierung des Gebäudenutzenergiebedarfs	99
5.3	Reduzierung des Energiebedarfs zur Luftbehandlung und Luftverteilung . .	103
5.3.1	Lastabhängige Zuluftzustände	103
5.3.2	Direkte Feuchteregelung	105

5.3.3	Enthalpiegeführter Betrieb der RLT-Anlage	106
5.3.4	Kostenminimierende Enthalpie-Regelung	110
5.3.5	Nachlüften	111
5.3.6	Zeitschalten	112
5.4	Betriebsweise der Warm- und Kaltwasserverteilung	113
5.4.1	Betriebsweise der Wärme- und Kälteerzeugungsanlagen	113
5.4.2	Ausgewählte Energie-Management-Funktionen	114
6	Beschreibung des Beispielobjekts mit Randbedingungen	116
6.1	Beispielobjekt	116
6.1.1	Gebäude	116
6.2	Heiz- und raumluftechtechnische Anlagen	120
6.2.1	Raumluftechtechnische Anlage	120
6.2.2	Heizanlage	120
6.2.3	Kälteanlage	120
6.3	Regelung der Anlagenkomponenten im Referenzfall	122
6.4	Randbedingungen	125
6.4.1	Gebäudenutzung und Anlagenbetrieb	125
6.4.2	Klimadaten	125
6.4.3	Komfortbedingungen	125
7	Ergebnisse der Simulation	127
7.1	Beurteilung der Anlage im Referenzzustand	128
7.1.1	Betriebsverhalten unter extremen Witterungsbedingungen	128
7.1.2	Jahresenergiebedarf und Nutzungsgrade der Anlage	134
7.2	Ergebnisse der Fallstudien; Einsparpotentiale von Energie-Management-Funktionen	138
7.2.1	Beleuchtung und Jalousiensteuerung	142
7.2.2	Raumtemperatur-, Feuchte- und Luftqualitätsregelung	143
7.2.3	Regelung der Luftbehandlung und Luftverteilung	147
7.2.4	Betreiben der Wärme- und Kälteverteilnetze	151
7.2.5	Energiewandlung zur Wärme- und Kälteerzeugung	152

7.2.6	Kombination aller energiesparenden Betriebsweisen	154
7.2.7	Energiebedarf und Komfortbedingungen	158
8	Zusammenfassung	160
Anhang		176
A	Vergleich von Rechen- Meßergebnissen an Rippenrohrwärmetauschern	176
B	Detaillierte Beschreibung des Beispielobjektes und Bestimmung der Parameter zur Simulation	181
B.1	Gebäude	181
B.2	Raumlufotechnische Anlage	183
B.2.1	Lufterhitzer und Kühler	183
B.2.2	Wärme- und Feuchte-Rückgewinner	183
B.2.3	Ventilatoren	185
B.2.4	Dampfbefeuchter	187
B.2.5	VVS-Regler	187
B.2.6	Induktionsgeräte	187
B.2.7	Kanalnetz	187
B.3	Heizanlage	189
B.3.1	Heizkessel	189
B.3.2	Wärmetauscher und Heizflächen	189
B.3.3	Ventile	191
B.3.4	Pumpe	192
B.3.5	Verteilnetz	192
B.4	Kälteanlage	192
B.4.1	Kältemaschine	192
B.4.2	Kühlturm	194
B.4.3	Luftkühler	196
B.4.4	Ventile	196
B.4.5	Pumpe	197
B.4.6	Verteilnetz	197