

**Entwicklung einer Methode zur Auswahl
raumluftechnischer Systeme mit Hilfe
neuronaler Netze**

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

vorgelegt von

Dietmar Krieg

geboren in Nürtingen

Hauptberichter:	Prof. Dr.-Ing. habil. H. Bach
Mitberichter:	Prof. Dr. habil. A. Zell
Tag der mündlichen Prüfung:	10. Juli 2000

IKE – Lehrstuhl für Heiz- und Raumluftechnik
der Universität Stuttgart

2000

Kurzfassung

Insbesondere bei größeren Bauvorhaben wird in zunehmendem Maße gewerkeübergreifend geplant (Integrale Planung). Diese hieraus resultierende frühe Interaktion zwischen Gebäude- und HLK-Planung ermöglicht eine optimale Gesamtlösung. Die dabei notwendigen Entscheidungen in der Vorplanungsphase werden derzeit auf Basis von Planungserfahrung oder Detailsimulationen getroffen. Die vorliegende Arbeit zeigt eine Methode zur Erstellung eines EDV-basierten Entscheidungsunterstützungssystems in der Lüftungs- und Klimatechnik, das die Lücke zwischen der häufig intuitiven Vorgehensweise des Planers und den aufwendigen Detailsimulationen schließen soll.

Basis der Arbeit bildet eine Recherche zum Stand der Lüftungs- und Klimatechnik. Damit wird die Vielfalt der Anlagensysteme und deren Eigenschaften erfaßt. Standardmäßig ist eine anlagenorientierte Gliederung gemäß DIN 1946 Teil 1 üblich. Alternativ wird eine bedarfsorientierte Gliederungsmethodik aufgezeigt.

Neben einer Vielzahl weiterer prinzipiell möglicher Auswahlverfahren (z.B. Methoden der künstlichen Intelligenz), auf die in vorliegender Arbeit nur kurz eingegangen werden kann, bieten konnektionistische Modelle (neuronale Netze) einen erfolgsversprechenden Ansatz. Nach einer kurzen Einführung in die Neuroinformatik schließt sich die Erläuterung der erforderlichen Grundlagen dieses Forschungsgebiets an. Hierbei wird schwerpunktmäßig auf die Vorgehensweise bei vorwärtsverketteten Netzen (feedforward-Netzen) eingegangen, da sich die Anwendungen hier auf derartige Netztopologien beschränken. In diesem Zusammenhang wird auch auf das Verständnis der eingesetzten Lernverfahren (Backpropagation, Quickprop, Resilient Propagation, Scaled Conjugate Gradient, Cascade Correlation) Wert gelegt. Eine Beschreibung des verwendeten Software Simulators, sowie dessen Analysetools runden die allgemeine Darstellung über neuronale Netze ab.

Durch Abstraktion läßt sich das Problem aus der Raumluftechnik auf ein Klassifizierungsproblem der Neuroinformatik übertragen. Damit kann die Systemauswahl in der Raumluftechnik mit den für Klassifizierungsprobleme üblichen Verfahren behandelt werden. Vereinfacht betrachtet stellt sich das neuronale Netz als Black-Box dar. Die Eingänge sind Auswahlkriterien zur Lüftungssystemwahl. Als Ausgabe liefert das neuronale Netz die Eignung der unterschiedlichen Anlagenvarianten zurück. Der Auswahlalgorithmus entsteht bei neuronalen Netzen durch das Lernen der in den Mustern enthaltenen Assoziationen. Hierfür werden dem neuronalen Netz Trainingsmuster vorgegeben, die es im Verlauf des Trainings „erlernt“. Ein Muster enthält jeweils eine Konstellation von Auswahlkriterien und die daraus folgende Eignung der Anlagentypen. Der Wichtigkeit guter Trainingsmuster wird durch ein gesondertes Kapitel über die Generierungsmöglichkeiten von Trainingsmustern Rechnung getragen.

Im Basisfall wird das feedforward-Netz mit Standard-Backpropagation trainiert. Ausgehend von der Basisvariante wird das neuronale Netz bezüglich des gewählten Lernverfahrens und der Netztopologie optimiert. Eine Überprüfung der Klassifizierungsleistung auf unbekanntem Testmuster ergibt die Genauigkeit der Netze dieser Optimierungsvarianten. Es zeigt sich, daß bei geeigneter Wahl der Netze und Lernverfahren eine für die Vorplanungsphase ausreichende Genauigkeit erreicht werden kann. Die Integration dieses neuronalen Auswahlalgorithmus in eine hierfür erstellte, einfach handhabbare Benutzeroberfläche zur Systemauswahl in der Lüftungstechnik rundet die Arbeit ab.

Abstract

Especially for huge buildings it is useful to do the planning process integral for the whole building (integral planning). As a result of this planning method, the early interaction between building- and HVAC-planning makes it possible to reach optimal conditions. At present the necessary decisions in the first planning stage are based on planning know-how or detail simulations. This paper shows a method to build a computer-based decision support system for ventilation and airconditioning systems to close the gap between the intuitive procedure of planning engineers and detail simulations.

This dissertation is based on an investigation to the state of the art in HVAC engineering. In this context we take the variety of ventilation and airconditioning systems and their characteristics into account. Usually the subdivision concepts are system oriented, like the procedure in DIN 1946 part 2. This report shows also an alternative subdivision method, which is user oriented.

Among other possible selection methods (for example methods of artificial intelligence) connectionist models (neural networks) are a promising way. After a short introduction to the neural network technology, an explanation of the necessary foundations of this field follows. Priority is given to feedforward networks, because the applications in this study are limited to this kind of networks. In this context attention is paid to the comprehension of the learning functions (backpropagation, quickprop, resilient propagation, scaled conjugate gradients, cascade correlation). A description of the software simulator used in this study as well as its analyzing tools complete the general description about neural networks.

Abstraction leads to translation from a HVAC problem to a classification problem in the sense of neural network technology. So it is possible to perform the system selection process of the ventilation and airconditioning technology with usual methods for problems of classification. Simplified speaking, the neural network looks like a black-box. The inputs are significant criteria for system selection. The network output represents the suitability for the different system variants. In neural networks the selection algorithm is learned automatically from training patterns. During training the network "learns" these patterns. A pattern consists of one constellation of selection criteria and the suitability of the system types. Because of the importance of good patterns for training, a separate chapter about pattern generation methods is included.

In the first version standard backpropagation is used to train the feedforward networks. Based on this version a systematic search among different learning functions and network topologies was performed to find the optimal network topology. The accuracy of the different network versions follows from a test of the classification results for unknown test patterns. Provided that suitable parameters are chosen, the results show enough accuracy for the first planning stage. Finally the integration of this neural network based selection algorithm into a simple graphical user interface for system selection in ventilation and airconditioning technology closes this report.

Inhaltsverzeichnis

1	Motivation und Aufgabenstellung	15
1.1	Motivation.....	15
1.2	Aufgabenstellung.....	16
2	Stand der Lüftungs- und Klimatechnik.....	17
2.1	Grundkonzepte der Raumströmungsführung.....	17
2.2	Grundtypen von Lüftungs- und Klimatisierungssystemen.....	18
2.2.1	Bedarfsorientierte Einteilung der Klimatisierungssysteme.....	18
2.2.2	Einteilung der RLT-Anlagen nach DIN 1946 Teil 1.....	28
3	Grundlagen von Expertensystemen.....	29
3.1	Aufbau eines Expertensystems.....	29
3.2	Komponenten eines Expertensystems	30
3.2.1	Datenbank.....	30
3.2.2	Wissenverarbeitungsmechanismen	31
3.2.3	Benutzerschnittstelle	32
4	Einsatz neuronaler Netze für Entscheidungsunterstützungssysteme	33
4.1	Funktionsprinzip neuronaler Netze	33
4.2	Bestandteile neuronaler Netze	34
4.2.1	Neuronen	34
4.2.2	Verbindungsnetzwerk.....	35
4.2.3	Propagation Function	37
4.2.4	Lernregel	37
4.3	Prinzipielle Vorgehensweise beim Einsatz neuronaler Netze mit überwachten Lernverfahren.....	39
4.4	Verschiedene Lernverfahren für neuronale Netze.....	42
4.4.1	Hebbsche Lernregel.....	43
4.4.2	Backpropagation.....	43
4.4.3	Backpropagation mit Momentum Term	47
4.4.4	Backpropagation mit Weight Decay	47
4.4.5	Quickprop	48
4.4.6	Resilient Propagation (Rprop)	49
4.4.7	Scaled Conjugate Gradient (SCG).....	50
4.4.8	Cascade-Correlation (CC).....	51
4.5	Auswahl eines geeigneten Software-Simulators	53
4.6	Aufbau und Funktion des verwendeten Software-Simulators SNNS.....	55
4.6.1	Allgemeine Beschreibung.....	55
4.6.2	Wichtige Werkzeuge von SNNS.....	58

5	Anwendung der neuronalen Netze auf die Systemauswahl in der Lüftungstechnik.....	61
5.1	<i>Prinzipielle Vorgehensweise</i>	61
5.2	<i>Analyse der RLT-Anlagen</i>	62
5.2.1	<i>Für das Entscheidungsunterstützungssystem relevante Lüftungs- und Klimatisierungs-systeme.....</i>	62
5.2.2	<i>Einflußfaktoren bei der Systemauswahl</i>	67
6	Programmentwicklung	61
6.1	<i>Erstellung, Validierung und Test des neuronalen Netzes</i>	75
6.1.1	<i>Modellbildung.....</i>	75
6.1.2	<i>Generierung und Aufbereitung von Trainingsmustern</i>	77
6.1.3	<i>Training, Validierung und Test der Basisvariante</i>	87
6.1.4	<i>Vorgehensweise bei der Optimierung der Basisvariante</i>	91
6.1.5	<i>Vergleich unterschiedlicher Lernverfahren</i>	92
6.1.6	<i>Optimierung der Netztopologie</i>	104
6.2	<i>Erstellung des Entscheidungsunterstützungssystems</i>	109
7	Erweiterungsmöglichkeiten.....	115
7.1	<i>Erweiterungsmöglichkeiten des neuronalen Netzes.....</i>	115
7.2	<i>Entwicklungstrends für Benutzeroberflächen</i>	117
8	Zusammenfassung	117
9	Literatur	121
10	Anhang	125