

# **Ein Beitrag zur gewichteten multikriteriellen Optimierung von Heizungs- und Lüftungsregelkreisen auf Grundlage des Fuzzy Decision Making**

Zur Erlangung des akademischen Grades eines

**Doktors der Ingenieurwissenschaften**

von der Fakultät für Maschinenbau der

Universität Karlsruhe (TH)

genehmigte

**Dissertation**

von

**Dipl.-Phys. Thomas Bernard**

aus Karlsruhe

Mündliche Prüfung: 15. 02. 2000

Hauptreferent: Prof. Dr.-Ing. habil. Georg Bretthauer

Korreferent: Prof. Dr. rer. nat. Hartwig U. Steusloff

## **Vorwort**

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit am Fraunhofer-Institut für Informations- und Datenverarbeitung IITB in Karlsruhe. Wesentliche Teile der Arbeit wurden im Rahmen des Verbundprojektes "Integrierte Haussysteme für ressourcenschonendes Wohnen" IHS-ReWo der Fraunhofer-Gesellschaft entwickelt.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Georg Bretthauer für die Übernahme des Hauptreferats, seine fachliche Unterstützung sowie für wertvolle Ratschläge und konstruktive Kritik. Herrn Prof. Dr. rer. nat. Hartwig Steusloff danke ich sehr herzlich für die Übernahme des Korreferates und sein Interesse an der Arbeit.

Ganz besonders möchte ich mich an dieser Stelle bei Herrn Dr.-Ing. Helge-Björn Kuntze, dem Leiter der Forschungsgruppe "Industrielle Meß-, Steuerungs- und Regelungssysteme" bedanken. Er gab die Anregung zu dieser Arbeit und unterstützte mich jederzeit mit großem Engagement in wissenschaftlichen und projektbezogenen Fragen. Seine ständige Bereitschaft zur kritischen Diskussion hat mich enorm unterstützt und die Entwicklung der Arbeit stets vorangetrieben.

Weiter möchte ich mich bei allen Kollegen am IITB sowie den am IHS-ReWo-Projekt beteiligten Partnern für die konstruktive und angenehme Zusammenarbeit bedanken. Ebenso gilt mein Dank den Diplomanden, wissenschaftlichen Hilfskräften und Praktikanten, die mir insbesondere im experimentellen Teil der Arbeit eine große Hilfe waren.

Meiner Frau Birgit danke ich für die moralische Unterstützung im Verlaufe der Arbeit.

Karlsruhe, im Januar 2000

Thomas Bernard

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung .....</b>	<b>1</b>
1.1	Problemstellung .....	1
1.2	Entwicklungsstand .....	3
1.2.1	Gebäude- und Hausautomatisierung .....	3
1.2.2	Feldbustechnologie .....	5
1.2.3	Heizungs-, Lüftungs und Klimatechnik.....	6
1.2.3.1	Einzelraumtemperaturregelung .....	7
1.2.3.2	Lüftungsregelung .....	7
1.2.3.3	Klimaanlagen .....	8
1.2.3.4	Ganzheitliche Optimierung .....	9
1.2.4	Fuzzy-Technologie.....	11
1.2.4.1	Anwendungsspektrum von Fuzzy-Logik .....	11
1.2.4.2	Fuzzy-basierte Entscheidungsunterstützung und Optimierung ....	12
1.3	Zielstellung und Aufbau der Arbeit .....	13
<b>2</b>	<b>Theoretische Grundlagen .....</b>	<b>17</b>
2.1	Fuzzy Logik.....	17
2.1.1	Verschiedene Arten der Unschärfe.....	17
2.1.2	Grundlagen der Fuzzy-Theorie.....	18
2.1.3	Mengenoperatoren für Fuzzy-Mengen.....	21
2.2	Fuzzy Decision Making .....	25
2.2.1	Einführung.....	25
2.2.2	Einfaches Beispiel.....	28
2.2.3	Wichtung der Gütekriterien.....	30
2.2.3.1	Gewichtete Summe .....	30
2.2.3.2	Wichtung über Modifikatoren.....	32
2.2.3.3	Wichtung durch Multiplikatoren.....	33
2.2.3.4	Verbotene Bereiche.....	34
2.2.3.5	Korrekturterm zur Erzeugung einer eindeutigen Entscheidung ....	35
2.2.3.6	Wichtung bei zwei Gütekriterien .....	37
2.2.4	Mehrstufige Entscheidungen .....	38
2.3	Physikalisches Klimamodell eines Raumes.....	39
2.3.1	Zustands-, Stör- und Stellgrößen.....	40
2.3.1.1	Zustandsgrößen .....	40
2.3.1.2	Störgrößen .....	40

2.3.1.3	Stellgrößen.....	41
2.3.2	Physikalische Grundlagen.....	42
2.3.2.1	Absoluter Wassergehalt und relative Feuchte .....	42
2.3.2.2	Energiebilanz und Temperaturänderung .....	43
2.3.3	Lüftungsmodell.....	44
2.3.3.1	Lüftungseffektivität .....	44
2.3.3.2	Energiebilanz 1: Lüftungswärmeverluste .....	45
2.3.3.3	Energiebilanz 2: Innentemperatur durch Lüftung (Sommerfall) ....	46
2.3.3.4	Stoffbilanz 1: CO <sub>2</sub> -Gehalt .....	47
2.3.3.5	Stoffbilanz 2: Absoluter Wassergehalt und relative Feuchte .....	48
2.3.4	Modell der Wand .....	49
2.3.4.1	Stationäres Wandmodell .....	49
2.3.4.2	Temperatur der Außenwand.....	51
2.3.4.3	Dynamisches Wandmodell.....	51
2.4	Thermische Behaglichkeit und Luftqualität .....	53
2.4.1	Definition der Thermischen Behaglichkeit.....	53
2.4.2	Statistik und Messung der Thermischen Behaglichkeit.....	55
2.4.3	Luftqualität .....	56
2.4.3.1	Messung der Luftqualität nach Fanger .....	57
2.4.3.2	CO <sub>2</sub> -Maßstab nach Pettenkofer.....	58
2.4.3.3	Messung der Luftqualität über Mischgassensoren.....	59
<b>3</b>	<b>Neues Lösungskonzept .....</b>	<b>61</b>
3.1	Schnittstellen zu den Heizungs- und Lüftungsregelkreisen.....	62
3.1.1	Eingangsgrößen der Leitkomponente.....	63
3.1.2	Stellung im geschlossenen Regelkreis .....	64
3.2	Sollwertoptimierung bei unscharfen Gütekriterien .....	65
3.2.1	Optimierung mit unterlagertem Regelkreis .....	66
3.2.2	Optimierung ohne unterlagertem Regelkreis .....	68
3.2.3	Überlegungen zur Stabilität .....	73
3.2.4	Bestimmung eines Referenzparameters.....	75
3.3	Definition der Gütekriterien.....	77
3.3.1	Komfortkriterien.....	77
3.3.1.1	Taupunktparameter .....	80
3.3.1.2	Weitere mögliche Komfortkriterien.....	81
3.3.2	Ökonomiekriterium .....	81
3.3.3	Grenzen des Ansatzes .....	82

---

3.4	Optimierung des Temperatursollwertes.....	83
3.4.1	Modell der empfundenen Temperatur.....	85
3.4.2	Modell der Heizleistung.....	88
3.4.3	Bestimmung der Referenzleistung.....	89
3.5	Optimierung des Lüftungssollwertes.....	91
3.5.1	Aggregation der Komfortkriterien.....	93
3.5.2	Dynamische Modelle für CO <sub>2</sub> , Feuchte, Temperatur.....	95
3.5.3	Störgrößenschätzung.....	98
3.5.4	Robustheit des Algorithmus.....	99
3.5.4.1	Fallbeispiel 1: Fehler im Raumvolumen.....	99
3.5.4.2	Fallbeispiel 2: Störvolumenstrom.....	101
3.5.5	Modell für Luftzug.....	102
3.5.6	Modell der Lüftungsverluste.....	104
3.6	Heuristische Strategieelemente.....	107
3.6.1	Abwesenheit.....	107
3.6.2	Umschaltung Winter/-Sommerfall.....	108
<b>4</b>	<b>Erprobung der Fuzzy-Leitkomponente.....</b>	<b>109</b>
4.1	Simulationsuntersuchungen.....	109
4.1.1	Simulationsumgebung.....	109
4.1.2	Untersuchung des Verhaltens der Leitkomponente ohne Regelstrecke.....	112
4.1.2.1	Optimierter Temperatursollwert.....	112
4.1.2.2	Optimierter Sollwert der Luftwechselrate.....	115
4.1.3	Untersuchung des Verhaltens der Leitkomponente mit Regelstrecke.....	122
4.1.3.1	Verhalten bei unterschiedlicher Raumbelagung.....	123
4.1.3.2	Verhalten ohne Fuzzy-Leitkomponente mit manueller Bedienung.....	133
4.1.3.3	Energiebilanzen.....	135
4.1.3.4	Robustheit gegenüber Störungen der Luftwechselrate.....	138
4.1.3.5	Lüftungssteuerung mit Schwenkfenster.....	141
4.1.4	Zusammenfassung der Simulationsuntersuchungen.....	144
4.2	Experimentelle Erprobung.....	145
4.2.1	Vorbemerkungen.....	145
4.2.2	Versuchsräume.....	145
4.2.3	Systemarchitektur und Implementierung.....	148
4.2.4	Experimentelle Ergebnisse.....	150
4.2.4.1	Versuchsbedingungen.....	150
4.2.4.2	Vergleich experimentelle und Simulationsergebnisse.....	152

4.2.4.3	Systemverhalten bei konstanter Wasserdampf­störquelle .....	155
4.2.4.4	Systemverhalten bei inhomogener Durchlüftung .....	157
4.2.4.5	Systemverhalten in der heizungsfreien Periode (Sommerfall) ...	158
4.2.4.6	Systemverhalten bei Lüftungssteuerung mit Schwenkfenster ....	161
4.3	Zusammenfassung der experimentellen und Simulationsergebnisse .....	163
<b>5</b>	<b>Zusammenfassung .....</b>	<b>165</b>
<b>6</b>	<b>Literatur .....</b>	<b>169</b>
<b>Anhang A</b>	<b>Systemverhalten .....</b>	<b>177</b>
A.1	Lüftung .....	177
A.1.1	Systemverhalten CO <sub>2</sub> -Gehalt .....	177
A.1.2	Identifikation der Luftwechselrate .....	178
A.1.3	Systemverhalten Mischgas .....	179
A.1.4	Einfluß der Luftwechselrate auf relative Feuchte und Heizleistung .....	180
A.2	Temperaturabhängigkeit der relativen Feuchte .....	183
A.3	Heizvorgang .....	183
A.3.1	Dynamik .....	183
A.3.2	Stationärer Fall: Transmissionsverluste .....	184
A.4	Wandtemperatur .....	185
<b>Anhang B</b>	<b>Simulationsmodell .....</b>	<b>187</b>
B.1	Fuzzy-Leitkomponente .....	187
B.2	Raummodell und Regelung .....	188
<b>Anhang C</b>	<b>Programmstruktur und Parameter .....</b>	<b>194</b>
C.1	Programmstruktur .....	194
C.2	Parameter .....	195
C.3	Bereichsgrenzen und Initialisierung der dynamischen Datenbasis .....	197
<b>Anhang D</b>	<b>Sensorik und Aktorik der Versuchsräume .....</b>	<b>199</b>
D.1	Versuchsraum 1 .....	199
D.2	Versuchsraum 2 .....	200

## Verzeichnis der wichtigsten Abkürzungen

Physikalische Größen		
$T_i$	[°C]	Innentemperatur (mittlere Lufttemperatur)
$T_{i,soll}$	[°C]	Sollwert der Innentemperatur
$T_{i,soll}^*$	[°C]	optimierter Sollwert der Innentemperatur
$T_{op}$	[°C]	Empfundene (operative) Temperatur
$T_r$	[°C]	Strahlungstemperatur (Radiation Temperature)
$T_a$	[°C]	Außentemperatur
$T_{w,i}$ bzw. $T_w$	[°C]	Temperatur der Innenwand
$T_{w,a}$	[°C]	Temperatur der Außenwand
$\dot{T}_{stör}$	[°C/h]	Temperaturstörrquellen
$\varphi_i$ bzw. $f_i$	[%]	relative Feuchte innen
$\varphi_a$ bzw. $f_a$	[%]	relative Feuchte außen
$\bar{\varphi}_a$	[%]	effektive Feuchte außen
$\dot{\varphi}_{stör}$	[%/h]	Feuchtestörrquellen
$x_i$	[g/kg]	Wassergehalt der Luft innen
$x_a$	[g/kg]	Wassergehalt der Luft außen
$x_{max}$	[g/kg]	maximaler Wassergehalt der Luft
$\dot{x}_{stör}$	[g/kg/h]	Wasserdampfstörrquellen
$\dot{H}_2O_{prod}$	[g/h]	Wasserdampfabgabe eines Menschen
$CO_{2i}$	[ppm]	CO <sub>2</sub> -Gehalt innen
$CO_{2a}$	[ppm]	CO <sub>2</sub> -Gehalt außen
$\dot{CO}_{2stör}$	[ppm/h]	CO <sub>2</sub> -Störrquellen
$\dot{CO}_{2prod}$	[m <sup>3</sup> /h]	CO <sub>2</sub> -Produktionsrate eines Menschen
$MG_i$	[a.u.]	Mischgas innen (a. u. = arbitrary units)
$MG_a$	[a.u.]	Mischgas außen
$\dot{MG}_{stör}$	[a.u./h]	Mischgasstörrquellen
LQ	[decipol]	empfundene Luftqualität
$LQ_{stör}$	[olf]	Luftverunreinigungsquelle
LWR	[1/h]	Luftwechselrate
$LWR_{soll}$	[1/h]	Sollwert der Luftwechselrate
$LWR_{soll}^*$	[1/h]	optimierter Sollwert der Luftwechselrate
$\dot{Q}$	[W]	in den Raum einfließender Wärmestrom
$\dot{Q}_{Heiz}$	[W]	Heizleistung
$\dot{Q}_{Trans}$	[W]	Transmissionsverluste
$\dot{Q}_{Lüft}$	[W]	Lüftungsverluste
$\dot{Q}_{Vent}$	[W]	Ventilatorleistung

$\dot{Q}_{LWR}$	[W]	Lüftungsverluste + Ventilatorleistung
$\dot{Q}_{int}$	[W]	interne Wärmegegewinne
$\dot{Q}_{sol}$	[W]	solare Wärmegegewinne
$\dot{Q}_{stör}$	[W]	Hilfsgröße aus $\dot{Q}_{sol}$ , $\dot{Q}_{int}$ , $\dot{Q}_{Trans}$
$Q_{Heiz}$	[kWh]	Integral der Heizleistung
$Q_{Trans}$	[kWh]	Integral der Transmissionsverluste
$Q_{LWR}$	[kWh]	Integral der Lüftungverluste + Ventilatorleistung
$\dot{q}$	[W/m <sup>2</sup> ]	Wärmestrom durch die Wand
$\dot{q}_{konv}$	[W/m <sup>2</sup> ]	konvektiver Wärmestrom an der Wand
$\dot{q}_{zug}$	[W/m <sup>2</sup> ]	Wärmestrom der Zugluft
$\dot{V}$	[m <sup>3</sup> /h]	Lüftungsvolumenstrom
$\dot{V}_{stör}$	[m <sup>3</sup> /h]	Störlüftungsvolumenstrom

Parameter		
$T_{min}, T_{max}$	[°C]	ZGF-Parameter für $\mu_{komf\_T}$
$\phi_{min}, \phi_{max}, \phi_{tau}$	[%]	ZGF-Parameter für $\mu_{komf\_p}$
$CO2_{opt}, CO2_{max}$	[ppm]	ZGF-Parameter für $\mu_{komf\_C}$
$\dot{q}_1, \dot{q}_2$	[W/m <sup>2</sup> ]	ZGF-Parameter für $\mu_{komf\_Z}$
$\dot{Q}_{ref}$	[W]	ZGF-Parameter für $\mu_{öko}$ (Referenzleistung)
$V_{Raum}$	[m <sup>3</sup> ]	Raumvolumen
$P_{max}/LWR_{max}$	[Wh]	Verhältnis max. Leistungsaufnahme zu max. Luftwechselrate des Ventilators
$k$	[W/m <sup>2</sup> /K]	Wärmedurchgangskoeffizient
$\alpha$	[W/m <sup>2</sup> /K]	Wärmeübergangskoeffizient
$\lambda$	[W/m/K]	Wärmeleitfähigkeit
$A$	[m <sup>2</sup> ]	Fläche der Außenwand
$A_{ges}$	[m <sup>2</sup> ]	Summe aller Wandflächen
$\Delta x$	[m]	Dicke der Wandschichten
$\rho_L$	[m <sup>3</sup> /kg]	Dichte der trockenen Luft
$C_i$	[J/K]	Wärmekapazität der i-ten Wandschicht
$C_L$	[J/kg/K]	spezifische Wärmekapazität der Raumluft
$C_{ab}, C_{zu}, C_{Raum}$		Konzentration der Abluft, Zuluft, Raumluft
$\epsilon_L$	[1]	Lüftungseffektivität
$\epsilon$	[1]	Parameter zur Wärmeübertragung der Außenwand
$K_P$		Proportionalkonstante
$T_I$	[h]	Integralkonstante
$\tau$	[h]	Tiefpass-Zeitkonstante
$t_H$	[h]	Prädiktionshorizont
$c$		Parameter der Hystereseffunktion

Regelungstechnische Größen		
$w$		Führungsgröße
$w^*$		optimierte Führungsgröße
$u$		Stellgröße
$u^*$		optimierte Stellgröße
$\hat{u}$		Schätzwert der Stellgröße
$\mathbf{x}$		Zustandsvektor
$\mathbf{y}$		Ausgangsvektor
$\mathbf{z}$		Störgrößenvektor
$\tilde{y}$		Hilfsgröße
$\hat{z}$		Schätzwert der Störgröße

Fuzzy-Logik		
$\mu$	[1]	Fuzzy-Zugehörigkeitsfunktion
$\mu_i$	[1]	i-tes Fuzzy-Gütekriterium
$\mu_G$	[1]	Fuzzy-Goal (Ziel)
$\mu_C$	[1]	Fuzzy-Constraint (Restriktion)
$\mu_D$	[1]	Fuzzy-Entscheidung (Decision)
$\mu_{\text{komf}_T}$	[1]	Komfort-ZGF bzgl. Temperatur
$\mu_{\text{komf}_\varphi}$	[1]	Komfort-ZGF bzgl. rel. Feuchte
$\mu_{\text{komf}_C}$	[1]	Komfort-ZGF bzgl. Luftqualität (CO <sub>2</sub> -Gehalt)
$\mu_{\text{komf}_Z}$	[1]	Komfort-ZGF bzgl. Zugerscheinungen
$\mu_{\text{komf}}$	[1]	Gesamtkomfort-ZGF
$\mu_{\text{öko}}$	[1]	Ökonomie-ZGF
$\lambda_i$	[1]	Gewichtung des i-ten Gütekriteriums

Weitere Abkürzungen:

ASHRAE	American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers
a.u.	Arbitrary Units (willkürliche Einheiten)
DGL	Differentialgleichung
EIB	European Installation Bus
GK	Gütekriterium
HLK	Heizungs-, Lüftungs- und Klimatechnik
IHS	Integriertes Haussystem
LON	Local Operating Network
MAK	Maximale Arbeitsplatzkonzentration
MAX	Maximum
MIN	Minimum
ZGF	Zugehörigkeitsfunktion

# 1 Einleitung

## 1.1 Problemstellung

Das Verhalten des Raumklimas im Büro- und Wohnbereich ist komplexer, als es für den Benutzer zunächst den Anschein hat. So hängen sowohl das Behaglichkeitsempfinden als auch der Energieverbrauch von den wesentlichen Klimazustandsgrößen Temperatur, relative Feuchte und CO<sub>2</sub>-Gehalt als Referenzgas für die Luftqualität ab. Gestört wird der Raumklimazustand durch verschiedene meßbare bzw. nicht meßbare Einflüsse des Außenklimas und der Raumbelastung. Das dynamische Verhalten des Raumklimas in Wechselwirkung mit dem Außenklima ist so komplex und nichtlinear, daß der durchschnittliche Benutzer die Konsequenzen seiner Bedienung von Heizung und Lüftung hinsichtlich Kosten- und Komfortkriterien kaum vollständig überschaut. Die bedarfsgerechte, optimale Einstellung und Bedienung aller Steuerungs- und Regelungsfunktionen kann den Benutzer somit vor erhebliche Probleme stellen.

Bisher sind die einzelnen Gewerke, insbesondere Heizung und Lüftung, streng getrennt betrachtet worden, d.h. Optimierungsansätze zielten meist nur auf Heizung oder auf Lüftung. Dies ist jedoch offensichtlich unbefriedigend, da sowohl Komfort- als auch Kostenkriterien von Heizung und Lüftung abhängen. Es besteht daher der Bedarf nach einer anwenderfreundlichen Leitkomponente für die integrierte Bedienung der Heizungs- und Lüftungsregelkreise, die den Raumklimaprozeß entsprechend den individuellen Anforderungen der Anwender nach Komfort und Ökonomie optimiert.

Die Notwendigkeit einer solchen Leitkomponente ergibt sich auch aus den bauphysikalischen Entwicklungen der letzten Jahre. Durch die Einführung des Niedrigenergiestandards mit der Wärmeschutzverordnung 1995 [Ehm95] wurden neue Baumaterialien, hochgedämmte Wandaufbauten und Fenster entwickelt, die zu stark reduzierten Transmissionswärmeverlusten und extremer Fugendichtheit der Gebäudehülle führen [Ehr94]. Dadurch wird der natürliche Luftwechsel von bisher etwa 1/h auf nur noch ca. 0.2/h drastisch reduziert, was zu hygienischen Problemen wie Schimmelbefall und Zerstörung der Bausubstanz führen kann [Reck95, Gert97].

In Fachkreisen setzte sich daher in den letzten Jahren die Erkenntnis durch, daß die kontrollierte Wohnungslüftung in Niedrigenergiehäusern notwendig ist [UBA96]. Die Lüftungsanlagen sind nun jedoch so zu steuern, daß einerseits der Luftaustausch gewährleistet wird, der für gute Luftqualität und die Erhaltung der Bausubstanz notwendig ist,

und andererseits durch die Lüftung möglichst wenig Energie verbraucht wird. Daß dies bisher noch nicht befriedigend gelang, wird u. a. dadurch deutlich, daß 1995 trotz aller Erfolge im bauphysikalischen Bereich 77 % des Energieverbrauchs in den Haushalten auf Raumwärme entfielen. Das entspricht 17,5 % des gesamten Energieverbrauchs in der Bundesrepublik Deutschland [ESS95]. Es werden also intelligente Leit- bzw. Regelungskonzepte benötigt, die abhängig vom aktuellen Innen- und Außenklimazustand sowie vom Bedarf des Benutzers die Heizungs- und Lüftungsanlagen so ansteuern, daß ein optimales Komfort-Ökonomieverhältnis gewahrt bleibt. Wie in Abschnitt 1.2 näher beleuchtet wird, sind trotz noch zögernder Akzeptanz auf dem Markt die technischen Voraussetzungen zur Realisierung solcher bedarfsoptimaler Klimaleit- und Regelungskonzepte weitgehend vorhanden. Dies betrifft die Bereiche Feldbustechnologie, Sensorik, Aktorik, Temperatur- und Lüftungsregler sowie Bedienoberflächen.

Im Rahmen dieser Arbeit werden ausschließlich Häuser westeuropäischer Bauart betrachtet. Da diese in der Regel nicht mit einer Klimaanlage ausgestattet sind, wird bei der Entwicklung der Leitkomponente auch nur von einer gewöhnlichen Lüftung ausgegangen. Dies hat jedoch zur Konsequenz, daß der Raumklimazustand nicht vollständig steuerbar ist (siehe dazu Abschnitt 2.3). Gleichzeitig bedeutet dies auch eine Herausforderung beim Entwurf der Leitkomponente, da bei eingeschränkter Aktorik die momentanen, vom aktuellen Innen- und Außenklima abhängigen Möglichkeiten zu erkennen und auszuschöpfen sind.

Die Schwierigkeit des Entwurfsproblems von Regelungssystemen im Heizungs- und Lüftungsbereich sind durch ein komplexes Systemverhalten gegeben. Zum einen werden die Lüftungsvorgänge durch nichtlineare Differentialgleichungen beschrieben, und zum anderen ist der Raumklimaprozeß charakterisiert durch starke stochastische Schwankungen der internen und externen Störgrößen, die durch die unterschiedliche Belegung des Raumes und das sich ständig ändernde Außenklima bedingt sind. Außerdem ist das Systemverhalten stark von der Bauphysik abhängig.

Da bei der Raumklimaregelung verschiedene Güteforderungen (z. B. Kosten, Komfort, Ökologie) zu berücksichtigen sind, liegt ein Problem der multikriteriellen Optimierung vor. Die zu berücksichtigenden Komfort- und Ökonomiekriterien sind abhängig von den Klimazustandsgrößen sowie den externen Störgrößen. Für den Fall, daß der Energieträger bzw. die Art der Energieerzeugung in einem betrachteten Haus fest vorgegeben sind, kann das Ökologiekriterium mit dem Ökonomiekriterium in etwa gleich gesetzt werden. In dieser Arbeit werden daher nur Komfort- und Ökonomiekriterien berücksichtigt. Zwischen den beiden zumeist gegensätzlichen Forderungen nach Komfort und Ökonomie ist ein optimaler Kompromiß zu finden, wobei eine Wichtung der Gütekriterien möglich sein muß. Während das Ökonomiekriterium als Bilanz der verbrauchten Energie über einen bestimmten Zeithorizont berücksichtigt werden kann, entziehen sich die Komfortkriterien bedingt durch

das menschliche Empfinden weitgehend einer scharfen Beschreibung. Daher bieten sich zur Lösung des Optimierungsproblems Methoden der Fuzzy-Logik an, mit denen sich die Unschärfe behandeln läßt.

## 1.2 Entwicklungsstand

Im folgenden wird der technische Entwicklungsstand besonders auf den Gebieten beleuchtet, die für die Entwicklung einer fuzzy-basierten Leitkomponente für Heizungs- und Lüftungsregelkreise von besonderem Interesse sind. Dies sind die Bereiche Gebäude- und Hausautomatisierung, Feldbustechnologie, Heizungs-, Lüftungs- und Klimatechnik sowie auf Fuzzy-Logik basierende Technologien. Hinsichtlich der Diskussion und Bewertung der Konzepte wird unterschieden zwischen Forschungsergebnissen und marktfähigen Produktlösungen.

### 1.2.1 Gebäude- und Hausautomatisierung

Seit Mitte der siebziger Jahre sind Gebäudeleitsysteme für große und mittlere Gebäude (ab ca. 5000 m<sup>2</sup> Nutzfläche aufwärts) zur Automatisierung der einzelnen Gewerke wie z. B. Heizungs-, Lüftungs- und Klimatechnik, Beleuchtungs- und Versorgungstechnik Stand der Technik. Neben der Steuerung und Regelung von Heizungs- und Klimaanlage übernimmt die Gebäudeleittechnik Funktionen des Gebäudemanagements wie beispielsweise Zutrittskontrolle, Einbruchsicherung, hausinterne Kommunikation und Brandmeldung [Reck95].

Die Kommunikation der Gebäudeleittechnik stützt sich auf DDC (Direct Digital Control) und Feldbustechnik. Die Systemarchitektur besteht meist aus drei Hierarchieebenen [Kna92]:

1. In der obersten, sogenannten **Managementebene** sind auf leistungsfähigen Rechnern (Workstations, PCs) die zentralen Bedien- und Beobachtungsfunktionen realisiert.
2. In der mittleren, sogenannten **Automationsebene**, sind Steuer-, Regel- und Optimierungsmodule angesiedelt.
3. Die unterste, sogenannte **Prozeßebene** oder **Feldebene** umfaßt die sensorischen Elemente sowie Stellglieder der betriebstechnischen Anlagen. Die Sensoren und Aktoren sind entweder direkt mit den Steuerungs- und Regelungsmodulen verbunden oder kommunizieren ebenfalls über ein Feldbussystem.

Die am Markt verfügbare Gebäudeleittechnik läßt sich für den privaten Hausbereich nur sehr begrenzt verwenden, da sie dafür zu teuer und zu komplex in Bedienung und Wartung ist [Pfa97]. Um diese Bedarfslücke zu schließen, wurde in den letzten Jahren intensiv an der Entwicklung sogenannter Integrierter Haussysteme (IHS), bekannter unter dem Schlagwort

"Intelligentes Haus", für den privaten Hausbereich gearbeitet (vgl. z. B. [NRW99, LON99b, VIMP98, Ber97a]). Unter IHS wird die Vernetzung der technischen Einrichtungen im Haus verstanden, so daß sich räumlich verteilte Anwendungen wie Steuerungen, Regelungen, Diagnose- und Assistenzsysteme problemlos implementieren lassen. Der erhöhte Investitions- und Betriebsaufwand eines IHS ist allerdings nur dann zu rechtfertigen, wenn sich dadurch Synergieeffekte ergeben, d.h. die installierten Netze und Systeme für Mehrfachanwendungen genutzt werden können (vgl. Abb. 1.2-1).

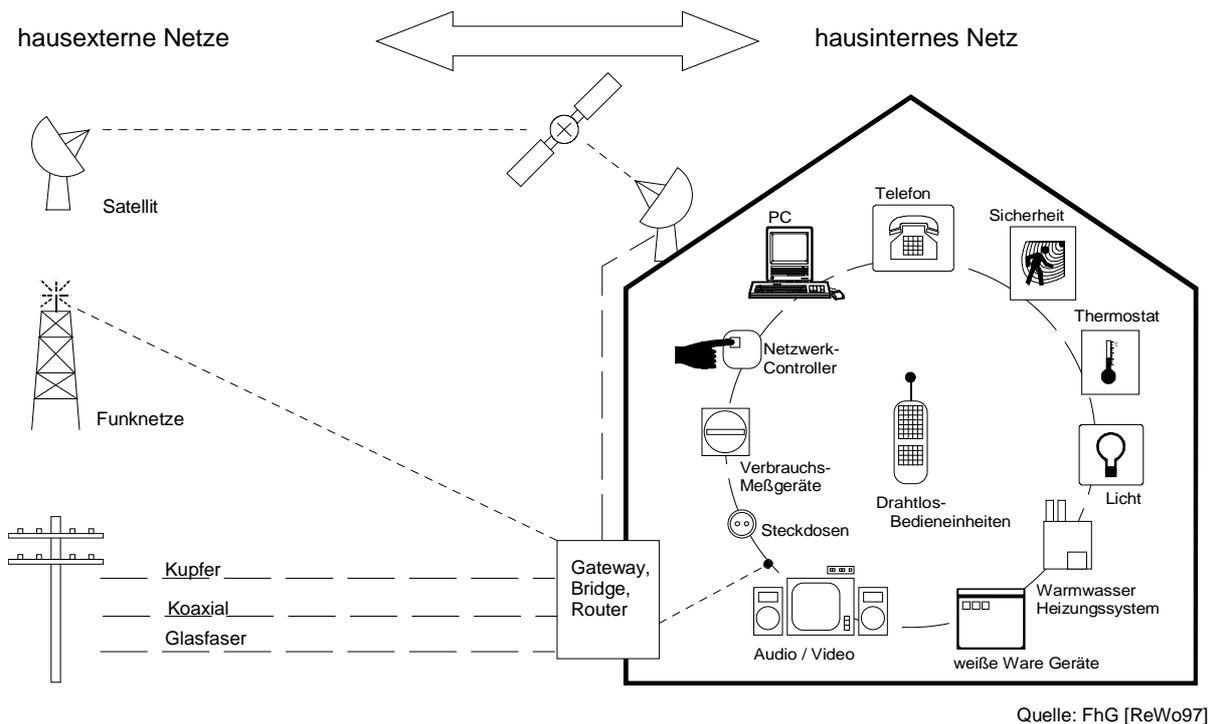


Abb. 1.2-1: Integrierte Haussysteme (IHS) ermöglichen die Anbindung der Haustechnik an interne und externe Netze für vielfältige neue Anwendungsfelder

Typische Anwendungen für IHS sind z. B. Steuerung und Regelung von Heizung, Lüftung, Beleuchtung und Jalousien, Anbindung der "Weißen Ware" (Kühlschrank, Waschmaschine, usw.) an den Kundendienst, aber ebenso sicherheitstechnische Anwendungen wie Glasbruch- und Brandmelder [Brac97]. Durch eine flächendeckende Vernetzung vieler Haushalte wird auch die Einführung eines Energiemanagements möglich, wie erste Modellversuche der Stadwerke Saarbrücken zeigen [Saar99]. Ein weiteres großes Anwendungsfeld von IHS liegt in der Fernbetreuung alter und kranker Menschen (Home-/Telecare, siehe z. B. [Bonn96]).

In den bisher bekannt gewordenen IHS-Anwendungen läßt sich ein Mangel an intelligenten, gewerkeübergreifenden Überwachungs- und Regelungskonzepten für Heizungs-, Lüftungs-

und Klimaanlage erkennen. Aktuelle Forschungsprojekte konzentrieren sich noch weitgehend auf die Realisierung der Fernanbindung und -bedienung der technischen Komponenten im Haus, der Mikrosystemtechnik (z. B. Entwicklung hochintegrierter Sensoren) sowie den Aufbau von Multi-Vendor-Anlagen mit relativ einfachen regelungstechnischen Anwendungen (vgl. [NRW99, LON99b, VIMP98]).

Die potentiell vorhandenen Möglichkeiten der synergetischen Überwachung und Regelung räumlich verteilter Heizungs- und Lüftungskomponenten werden somit bisher nur unzureichend genutzt. Demgegenüber hat sich das Projekt "Integrierte Haussystem für Ressourcenschonendes Wohnen (IHS-ReWo)" der Fraunhofer-Gesellschaft [Ber97b], in dessen Rahmen diese Arbeit entstand, explizit die Nutzung von IHS für intelligente regelungstechnische Anwendungen zum Ziel gesetzt. Weitere Ansätze der synergetischen Nutzung von IHS sind bei der verteilten Regelung von Solarheizanlagen erkennbar [Mül99].

### 1.2.2 Feldbustechnologie

Grundlage für die Gebäude- und Hausautomatisierung sind anforderungsgerechte, flexible Feldbussysteme. Während die konventionelle Verdrahtung der Sensoren, Aktoren und Mikroprozessoren einen enormen Verdrahtungsaufwand hervorrufen würde, besteht der Vorteil der Feldbustechnologie darin, daß das Übertragungsmedium (z. B. eine einfache Zweidrahtleitung oder eine Stromleitung) mehrfach genutzt werden kann. Beispiele solcher Feldbussysteme für den Hausbereich sind

- EIB (European Installation Bus) [EIB99]
- LON (Local Operating Network [LON99a]
- EHS (European Home Systems) [EHS99]
- Batibus [Bat99]
- Interbus-S [Int99].

Die technischen Details der einzelnen Feldbussysteme können hier nicht dargestellt werden. Dazu sei auf die Literatur verwiesen, z. B. [Bonf92, Bor92, Bött94, Die97]. Im folgenden wird nur kurz auf die Feldbussysteme EIB und LON eingegangen, da sie bei der experimentellen Umsetzung der entwickelten Leitkomponente eingesetzt wurden.

LON wurde in den USA entwickelt und wird aufgrund seiner Leistungsfähigkeit und Flexibilität auch in Europa zunehmend eingesetzt. Allerdings ist die Anzahl der verfügbaren Sensoren und Aktoren mit LON-Interface für Komponenten der Heizungs-, Lüftungs- und Klimatechnik (HLK) bisher noch gering.

Im deutschsprachigen Raum scheint sich EIB als Quasi-Standard durchzusetzen. Ende 1998 waren über 700 000 EIB-Feldbusknoten installiert [EIB99]. Die Anzahl der zertifizierten EIB-Produkte wie Sensoren, Aktoren, Bedienstationen, ISDN- und Internetgateways lag zu diesem Zeitpunkt bei 3400 [EIB99].

Eine wesentliche, wenngleich oft nicht unmittelbar vergleichbare Kenngröße zur Leistungsfähigkeit der Feldbussysteme ist die Übertragungsrate [Die97]. Diese beträgt bei EIB nur 9600 Bit/sec [EIB99], bei LON hingegen bis zu 1.25 MBit/sec [LON99a]. Somit ist EIB wegen der geringen Übertragungsrate eher für einfache Schaltvorgänge geeignet, während mit LON auch sehr komplexe und leistungsfähige Regelungen implementiert werden können.

Eine neue Entwicklung stellt die auf Java basierende Jini-Technologie dar (Jini = Java Intelligent Network Interface, [Jini99]). Mit Jini soll eine selbstkonfigurierende Einbindung von Komponenten ins Netzwerk möglich werden.

Auf eine einheitliche, anwenderneutrale Verkabelung im Privathausbereich zielt ein neues Verkabelungssystem, das z. Zt. von der Firma Siemens entwickelt wird [Sie99]. Dadurch soll die Bereitstellung der Dienste TV/Rundfunk, PC-Hausnetz, Telefon und Gebäudeautomatisierung vereinheitlicht werden.

### **1.2.3 Heizungs-, Lüftungs und Klimatechnik**

Bei der Beurteilung des Entwicklungsstandes der Heizungs-, Lüftungs- und Klimatechnik (HLK) ist zu unterscheiden zwischen am Markt verfügbaren Produkten und prototypisch realisierten Konzepten im FuE-Bereich. In marktüblichen Produkten werden weitgehend einfache PID-Regler eingesetzt [Reck95]. Im Forschungsbereich werden ergänzend moderne Methoden und Konzepte wie Fuzzy Control und Künstliche Neuronale Netze zur Regelung, Überwachung und Optimierung angewandt (vgl. Abschnitt 1.2.4).

Für Systeme aus dem Bereich HLK sind digitale Steuerungen im Hausbereich immer noch hauptsächlich im Bereich der Heizkesselregelung zu finden. Hier wird auch in kommerziellen Systemen Fuzzy Control mit Erfolg eingesetzt [Alt93a, Pfa95, Jan94]. Die Programmierung von Zeitschaltuhren sowie die Regelung der Raumtemperatur und Lüftung wird jedoch weitgehend dem Bediener überlassen.

Im folgenden wird der Entwicklungsstand in den Bereichen Einzelraumtemperaturregelung, Lüftungsregelung, Klimaanlage und Leitkonzepten diskutiert.

Einige Einsatzmöglichkeiten von Fuzzy-Reglern im Hausbereich außerhalb von HLK, z. B. für Waschmaschine und Kühlschrank sind in [Bret92, Kie97] beschrieben.

### 1.2.3.1 Einzelraumtemperaturregelung

Das Thermostatventil stellt bereits einen einfachen, ohne Hilfsenergie arbeitenden P-Regler dar. Auch marktübliche digitale Temperaturregler mit elektrischem oder thermischen Stellantrieb sind oft nur einfache P-Regler und daher von geringer Regelgüte, so daß Sollwertabweichungen von 2 K keine Seltenheit sind [Stri95].

Neben Reglern mit P-, PI- oder PID-Verhalten werden auch adaptive Regelungsalgorithmen eingesetzt mit dem Ziel, einerseits das Einstellen der Reglerparameter bei der Inbetriebnahme abzukürzen, andererseits für verschiedene Belastungsfälle eine stabile Regelung in allen Betriebspunkten zu erhalten [Reck95, Kna97].

Kommerzielle fuzzy-basierte Raumtemperaturregler sind derzeit nicht am Markt verfügbar. Lediglich im Bereich der Forschung wurden erste wirkungsvolle Konzepte vorgestellt (vgl. z. B. [Con94, San96]).

### 1.2.3.2 Lüftungsregelung

Die am Markt üblichen Wohnungslüftungssysteme lassen sich unterscheiden in zentrale und dezentrale Systeme. Zentrale Systeme sind dadurch charakterisiert, daß die Abluft einer ganzen Etage oder des ganzen Hauses über einen größeren Ventilator nach außen befördert wird. Die Frischluft strömt an geeigneten Stellen im Haus passiv zu. Bei dezentralen Systemen wird dieses Prinzip in einzelnen Räumen angewandt [Now96].

Die meisten der marktüblichen Systeme werden über Zeitschaltungen und manuelle Einstellung über Stufenschalter aktiviert. Fortgeschrittenere Systeme verfügen über feuchte- oder luftqualitätsabhängige Schwellwertschaltungen bzw. Regelung von Feuchte oder Luftqualität (vgl. z. B. Produkte der Firmen MAICO und Helios). Die Systeme reagieren jedoch i. a. nicht auf Einflußfaktoren wie

- wechselnde Belegung des Raumes,
- mehrere Störquellen (z. B. bezüglich Feuchte und Luftqualität),
- Außenklima (Temperatur, Feuchte, Luftqualität),

wie im VDMA-Einheitsblatt "Bedarfsgeregelte Lüftung" gefordert wird [VDMA97]. Darin ist die Ergänzung bereits bestehender Lüftungssteuerungen um einen "Luftqualitätsbeobachter" vorgesehen, der den aktuellen Lüftungsbedarf ermittelt. Beispiele solcher fortgeschrittenen Lüftungsregelungen sind Produkte der Firma Landis&Staeefa, die CO<sub>2</sub>-Gehalt und Mischgas regeln, doch finden sie hauptsächlich Einsatz in Nutzgebäuden wie Hörsälen oder Konferenzräumen, nicht jedoch im Hausbereich [Mei94].

In Forschungsvorhaben zu Niedrigenergiehäusern der letzten Jahre war der Einsatz von kontrollierter Wohnungslüftung zwar meistens auch Gegenstand der Untersuchungen (vgl. z. B. [Erh97, Ros96, Erh94, Lan94, Bren93]), doch auch in diesen Projekten wurden nur manuelle gesteuerte Lüftungsanlagen bzw. Lüftungsregelungen mit nur einer Regelgröße (Luftqualität oder relative Feuchte) eingesetzt. Die Stärke der Störgrößen sowie Komfort- und Ökonomiebetrachtungen gingen in die Lüftungssteuerungen und -regelungen der untersuchten Häuser nicht explizit ein.

Obwohl sich Fuzzy Control zur Luftqualitäts- und Feuchteregelung wegen des nichtlinearen Systemverhaltens und des unscharfen Komfort-Empfindens prinzipiell anbietet, wurden solche Regelungen mit Fuzzy Control bisher kaum realisiert. Eine verwandte Problematik, die Lüftungsregelung eines Autotunnels, ist in [Koh94] beschrieben. Hierbei wird mit Fuzzy Control die Luftqualität in Abhängigkeit vom Lufttrübungsgrad, CO-Gehalt, Temperatur und Feuchte geregelt. Eine weitere ähnliche Problemstellung, die Lüftung im Auto, wird in [Dav94] behandelt. Darin wird bei der Lüftungsregelung mittels Fuzzy-Regeln versucht, den Einfluß von Solarstrahlung, dem Wärmestrom der Gebläseluft und der Innen- und Außentemperatur auf die empfundene Temperatur zu berücksichtigen.

### **1.2.3.3 Klimaanlage**

Mittels Klimaanlage können Lufttemperatur und -feuchte gesteuert bzw. geregelt werden. Sie dienen insbesondere der Kühlung von Räumen. Während Klimaanlage beispielsweise in den USA einen hohen Verbreitungsgrad haben, werden sie in Europa weniger eingesetzt. Im Hausbereich spielen sie in Europa nur eine untergeordnete Rolle. In der vorliegenden Arbeit wird daher nicht näher auf Klimaanlage eingegangen. Die für die Integration von Raumheizungs- und Lüftungsanlagen entwickelte Fuzzy-Leitkomponente läßt sich jedoch prinzipiell auch auf die erweiterten Anforderungen einer Klimaanlage adaptieren.

Die Regelung der meisten Klimaanlage ist mit konventionellen PI-Reglern bzw. mit modellbasierten Methoden realisiert [Reck95, Glü98]. Meist werden hier nur sehr einfache und dementsprechend ungenaue Modelle zugrunde gelegt. Eine genauere, realitätstreue Modellierung ist besonders wegen der Temperaturabhängigkeit und hochgradigen Nichtlinearität der Feuchte sehr aufwendig. Eine fuzzy-basierte Regelung, wie sie z. B. von der Firma Klöckner-Möller vorgestellt wurde [Fed95], weist jedoch wesentliche Vorteile auf. So läßt sich z. B. das menschliche Komfort-Empfinden in Abhängigkeit von Temperatur und Feuchte treffender durch unscharfe Fuzzy-Beziehungen beschreiben als durch sehr parameterempfindliche nichtlineare analytische Beziehungen.

Optimierungsstrategien zum energiesparenden Betrieb von Klimaanlage mit der Methode der Dynamischen Programmierung werden in [Glü98] beschrieben. Dabei wird insofern ein ganzheitlicher Ansatz verfolgt, daß in die Zielfunktion neben Energieaufwendungen auch

Betriebskosten und umweltrelevante Größen aufgenommen und minimiert werden können. Allerdings wurden die Algorithmen für die komplexen Aggregate von Klimaanlage entwickelt und berücksichtigen nicht die Unschärfe im menschlichen Komfort-Empfinden.

#### 1.2.3.4 Ganzheitliche Optimierung

Heizungs- und Lüftungsregelungen wurden bisher in der Praxis ausschließlich getrennt entworfen und realisiert. Die Regelung in den einzelnen Bereichen der HLK werden meist durch einfache P- oder PI-Regler realisiert. Für den in dieser Arbeit betrachteten privaten Wohnbereich und Büroräume ohne Klimaanlage fehlt es bisher fast vollständig an gewerkeübergreifenden Konzepten, bei denen der Betrieb von Heizung und Lüftung ganzheitlich optimiert wird [Pfa97]. Für Klimaanlage von Großgebäuden wurden modellbasierte Konzepte zur Überwachung und Optimierung des Betriebes heiz- und raumluftechnischer Anlagen entwickelt (vgl. z. B. [Glü98, Mad96]).

Die in der Praxis realisierten Leitkonzepte sind durch die Einhaltung von bestimmten Grenzwerten charakterisiert, die in einschlägigen Normen wie DIN 1946, Teil 2 (Raumluftechnik) definiert sind [DIN1946]. Danach soll die empfundene Temperatur, die sich aus dem Mittelwert der Lufttemperatur und der Strahlungstemperatur der Umschließungsflächen berechnet, etwa zwischen 20 °C und 22 °C liegen. Die relative Feuchte soll sich zwischen 30 % und 65 % bewegen, die Konzentration bestimmter Stoffe soll vorgegebene hygienische Höchstwerte nicht überschreiten (z. B. 1000 ppm für CO<sub>2</sub>-Gehalt) und die mittlere Luftgeschwindigkeit sollte nicht größer sein als etwa 0.2 m/s (abhängig von der Temperatur und dem Turbulenzgrad der Luft). Bezüglich der Lüftung wird je nach Raumart (Arbeitsräume, Versammlungsräume, Wohnräume,...) ein Mindestlüftungsvolumenstrom pro Person von 20 m<sup>3</sup>/h bis 40 m<sup>3</sup>/h gefordert.

Diese Vorgaben stellen allerdings nur den Rahmen dar, innerhalb dessen sich die Raumklimagrößen zu bewegen haben, um Komfort- und Hygienekriterien zu erfüllen. In [DIN1946] wird immer wieder darauf verwiesen, daß die angegebenen Grenzwerte nur ungefähre Richtlinien darstellen, die im Einzelfall erheblich variieren können. Das individuelle, zum Teil sehr unterschiedliche Komfort-Empfinden kann naturgemäß in der Richtlinie nicht berücksichtigt werden.

Weiterhin wird in [DIN1946] die Kopplung der Raumklimagrößen nur ungenügend berücksichtigt. So werden beispielsweise durch die Lüftung die relative Feuchte, die Luftqualität und die Temperatur beeinflusst. Bei der Lüftungssteuerung kann es somit zu Zielkonflikten zwischen den Komfortkriterien bezüglich der einzelnen Zustandsgrößen kommen.

Ökonomiekriterien sind in den einfachen Grenzwertdefinitionen von [DIN1946] nicht explizit berücksichtigt. Da die Vorgabe von Bereichen, innerhalb derer sich die Raumklimagrößen bewegen dürfen, einen Spielraum bietet, kann die Führung der Raumklimaregelkreise je nach Wichtung der Komfort- und Ökonomiekriterien mit unterschiedlichen Strategien erfolgen.

Neben den in der Praxis realisierten, heuristischen Leitkonzepten [Reck95], deren Funktions- und Leistungsfähigkeit aufgrund ihrer einfachen Struktur nur begrenzt sein kann, wurden im Bereich der Forschung noch verschiedene fortgeschrittenere Leitkonzepte vorgeschlagen bzw. prototypisch realisiert, von denen einige wesentliche im folgenden kurz beschrieben werden. Allen Konzepten gemeinsam ist das Ziel, das Raumklima ganzheitlich unter Komfort- und Kostenkriterien zu optimieren, wobei mehrere Zustands- und Stellgrößen berücksichtigt werden.

- **Lineares, prädiktives Regelungskonzept:** LUTE und VAN PAASSEN [Lut95] schlagen ein lineares, prädiktives Regelungskonzept zur Optimierung der Innentemperatur vor. Stellgrößen sind Heizleistung, Fensteröffnungsgrad und Jalousiestellung. Bei der Prädiktion der Temperatur wird das Streckenverhalten des Raumes berücksichtigt. Die lineare Zielfunktion enthält gewichtete Terme zu Komfort, Energieverbrauch und Stabilitätsverhalten. Obwohl hier Komfort- und Kostenkriterien berücksichtigt werden, hat der Ansatz zwei gravierende Mängel. Zum einen gehen Luftqualität und Luftfeuchte nicht in die Komfortkriterien ein, zum anderen wird die Unschärfe im Komfort-Empfinden nicht berücksichtigt.
- **Wissensbasiertes Konzept zur Steuerung der Innentemperatur, Luftwechselrate und Jalousie:** KLINGNER et al. [Kli99] entwickelten ein heuristisches Konzept zur Sollwertvorgabe für Innentemperatur, Luftwechselrate und Jalousie, das als Zustandsgrößen Temperatur und Feuchte innen und als Störgröße die Außentemperatur berücksichtigt. Es basiert auf Fallunterscheidungen bezüglich Winter-/Sommerfall, Außentemperatur größer/kleiner Innentemperatur und Innentemperatur größer/kleiner einem Grenzwert. Die Erreichbarkeit der Zustandsgrößen wird heuristisch modelliert. Es wird ein Algorithmus zur Einhaltung einer mittleren Luftwechselrate vorgeschlagen, der jedoch nur von der Raumbelastung und nicht der aktuellen Luftqualität abhängt. Das Konzept berücksichtigt nicht die Unschärfe in den Komfortkriterien.
- **Fuzzy-basierte Sollwertvorgabe:** Ein erster Ansatz eines fuzzy-basierten Konzeptes zur Sollwertvorgabe der Innentemperatur, Luftwechselrate und Jalousie wurde von SANTA vorgeschlagen [San96]. Das Konzept sieht eine Komfort-Ökonomiewichtung vor, wobei die Komfort- und Ökonomiekriterien nicht explizit definiert sind, sondern implizit in Fuzzy-Regeln enthalten sind. Zur Untersuchung der Funktion und Leistungsfähigkeit des

Konzeptes liegen nur wenige, an einem stark vereinfachten Modell simulierte Ergebnisse vor.

Hinsichtlich der bisher vorgeschlagenen bzw. realisierten Leitkonzepte für HLK lässt sich zusammenfassend folgendes feststellen:

- Die Unschärfe des Komfort-Empfindens wird nicht oder nur unzureichend berücksichtigt.
- Das Komfort-Empfinden wird i. a. nur in Abhängigkeit von der Temperatur beschrieben.
- Komfort- und Ökonomiekriterien können durch den Nutzer nicht in einfacher Weise gewichtet werden.

Da die Steuerungen und Regelungen von Heizung und Lüftung bisher im wesentlichen getrennt betrachtet wurden, sind fast ausschließlich Produkte und prototypisch realisierte Konzepte in den betrachteten Teilbereichen entstanden. Dabei wird jedoch in keiner Weise das Potential zur ganzheitlichen Optimierung ausgeschöpft, das mit der Verfügbarkeit von feldbusfähigen Sensoren und Aktoren entstanden ist.

Auch die Möglichkeiten, die fuzzy-basierte Regelungen und Optimierung in der Raumklimaregelung bieten [Bret92], werden erst in Ansätzen ausgenutzt, wie die oben beschriebenen Beispiele zeigen. Dabei drängt sich der Einsatz von fuzzy-basierten Methoden wegen der Unschärfe des menschlichen Empfindens im Bereich der Raumklimaregelung geradezu auf.

#### 1.2.4 Fuzzy-Technologie

Im folgenden werden in sehr kurzgefaßter Form Anwendungsmöglichkeiten von Fuzzy-Logik bei der Lösung von Automatisierungsaufgaben beleuchtet. Dabei wird Konzepten der fuzzy-basierten Entscheidungsunterstützung und Optimierung, die für die hier vorgestellte Fuzzy-Leitkomponente von besonderer Bedeutung sind, größere Aufmerksamkeit gewidmet.

##### 1.2.4.1 Anwendungsspektrum von Fuzzy-Logik

Die Theorie der Fuzzy Logik lässt sich für unterschiedliche Aufgabenstellungen der Automatisierungstechnik wirkungsvoll anwenden:

- **Fuzzy Control** (z. B. [Kie97, Koc96, Kie93]): Fuzzy Logik eignet sich sehr gut als Methode zur Regelung von Prozessen, die nicht oder nur mit sehr hohem Aufwand modelliert werden können. Dabei wird heuristisches Prozesswissen in Form von Wenn-Dann-Regeln eingebracht.
- **Prozeßmodellierung** (z. B. [Fisch99, Kro97, Hanss98, Tak85]): Prozesse, die nicht geschlossen durch analytische Gleichungen darstellbar sind, können oft mit einer

Kombination von physikalischen Basisgleichungen und unscharfem, heuristischem Prozeßwissen modelliert werden.

- **Mustererkennung** (z. B. [For93, Bock87]): Die intelligente Verarbeitung von Sensordaten (z. B. Sensorfusion, Mustererkennung) erfordert oft die unscharfe Verknüpfung von mehreren Größen zu bestimmten Merkmalsklassen, die mit Hilfe von Fuzzy Logik erfolgt.
- **Entscheidungsunterstützung und Optimierung** (z. B. [Koc96, Rom94, Zim87]): Diesem Bereich widmet sich der folgende Absatz.

Eine Übersicht zu den verschiedenen Bereichen findet sich in [VDI98, Fuz98, Fuz97, Fuz96, Zim94, Alt93b, For93, Bret92].

#### 1.2.4.2 Fuzzy-basierte Entscheidungsunterstützung und Optimierung

Bei vielen Optimierungsproblemen ist es sinnvoll, unscharfe Daten und Zusammenhänge zu berücksichtigen. Beispielsweise sind Nebenbedingungen wie Terminvorgaben oder Arbeitskapazitäten oftmals nur unscharf definiert oder bestimmte Parameter des Optimierungsmodells können nur ungefähr angegeben werden. In diesen Fällen ist die Kombination klassischer Optimierungsmodelle mit Methoden der Fuzzy-Logik sinnvoll (vgl. z. B. [Neu98]). Dabei werden die unscharfen Daten durch Fuzzy-Zahlen ausgedrückt oder zusätzliche Nebenbedingungen eingeführt [For93]. Ein bekanntes Beispiel ist die Lineare Programmierung mit unscharfen Nebenbedingungen (Fuzzy LP), die z. B. in [Zim87] beschrieben ist.

Besonders im Bereich der Prozeßführung und -optimierung können klassische Optimierungsverfahren aufgrund des hohen Rechenaufwandes oder eines nicht vorhandenen analytischen Prozeßmodells häufig nicht angewandt werden (vgl. z. B. [Mik98, Saj97, Bet96, Geh93]). Oftmals ist jedoch heuristisches Expertenwissen z. B. von Anlagenfahrern vorhanden, das in Form von Wenn-Dann-Regeln genutzt werden kann. Hier kann die in den Regeln enthaltene Unschärfe durch fuzzy-basierte Methoden berücksichtigt werden. Die Regeln liefern zwar nur suboptimale Ergebnisse, die jedoch in der Praxis oft als sehr gut betrachtet werden können.

Bei den bisher veröffentlichten Fuzzy-Optimierungskonzepten ist es notwendig zu unterscheiden zwischen offline- und online-fähigen Lösungen. Während sich in der Literatur vielfältige fuzzy-basierte Offline-Systeme zur Entscheidungsunterstützung und Optimierung vor allem im Bereich des Operations Research finden, wurde nur wenig über online-fähige Systeme veröffentlicht.

Anwendung finden fuzzy-basierte **Offline-Entscheidungsunterstützungssysteme** z. B. in folgenden Bereichen:

- **Beurteilung der Kreditwürdigkeit von Unternehmen** [Rom93]: In einem hierarchischen Bewertungsverfahren wird aus dem Zugehörigkeitsgrad zu Untereigenschaften eine Aussage über die Kreditwürdigkeit des Unternehmens aggregiert.
- **Reihenfolgeplanung in der Automobilplanung** [Pam98]: Zur optimalen Ausnutzung der Montagekapazitäten wird die Reihenfolge, mit der die Karossen in den Montagebereich kommen, optimiert. Die möglichen Reihenfolgen werden mit Fuzzy-Kriterien bewertet und danach die beste Reihenfolge ausgewählt.
- **Produktionsreihenfolgeplanung in Ringwalzwerken** [Mik98]: Bei der Optimierung der Auftragsreihenfolge des Walzprogrammes sind neben der Kostenminimierung zahlreiche mehr oder weniger scharfe Restriktionen einzuhalten. Exakte Verfahren können wegen des hohen Rechenaufwandes nicht angewandt werden. Die Optimierung der Reihenfolge erfolgt stattdessen unter Verwendung von Fuzzy-Expertenregeln und Evolutionären Algorithmen.

Anwendungen für fuzzy-basierte **Online-Optimierungs- und Leitsysteme** sind z. B.:

- **Führung verfahrenstechnischer Prozesse** [Bet97]: Aus heuristischem Prozeßwissen werden über Fuzzy-Regeln Prozeßführungsstrategien generiert. Eine Modifikation besteht darin, Fuzzy-Regler in Abhängigkeit von der Prozeßqualität lernfähig zu gestalten (Kombination von Künstlichen Neuronalen Netzen mit Fuzzy Logik, "Neuro-Fuzzy")
- **Führung von Kraftwerksblöcken (1)** [Hand94]: Zur Koordination der lang- und mittelfristigen Kraftwerkseinsatzplanung werden in einer klassischen, zu minimierenden Kostenfunktion bestimmte Bewertungskriterien und Wichtungsfaktoren wie beispielsweise die Ausnutzung eines bestimmten Kraftwerksblocks zu einem bestimmten Zeitpunkt durch Fuzzy-Zahlen ersetzt. Zur Beschreibung der Wichtigkeit eines Bewertungskriteriums werden unscharfe linguistische Variablen verwendet, z. B. "absolut unwichtig", "unwichtig", "wichtig", "sehr wichtig".
- **Führung von Kraftwerksblöcken (2)** [Alb97]: Die Koordination der Optimierung und Regelung des Kraftwerksführungsprozesses erfolgt über qualitatives Expertenwissen, die als Fuzzy-Regeln formuliert sind. Ebenso erfolgt die Betriebsbewertung des gesamten Kraftwerksführungsprozesses über ein wissensbasiertes Fuzzy-System.

Die in der Literatur gefundenen Konzepte, die fast ausschließlich aus dem industriellen Bereich kommen, sind nicht direkt auf das in dieser Arbeit gegebene Problem der Raumklimaoptimierung anwendbar. Besonderheiten des Raumklimaprozesses liegen in der komplexen, nichtlinearen Wechselwirkung der Innen- und Außenklimagrößen, der Berücksichtigung von bauphysikalischen Gegebenheiten sowie in der Unschärfe der Komfort- und Kostenkriterien.

### 1.3 Zielstellung und Aufbau der Arbeit

Wie aus Abschnitt 1.2.3 deutlich wurde, besteht der Bedarf nach einer intelligenten Leitkomponente zur integrierten Optimierung der Heizungs- und Lüftungskreise. Bisher veröffentlichte Konzepte oder am Markt verfügbare Produkte können diesen Bedarf nicht befriedigen.

Die wesentliche Aufgabe liegt jedoch nicht alleine in der Behandlung regelungstechnischer Fragestellungen, sondern in der integrierten Betrachtung von regelungstechnischen Teilproblemen in Zusammenhang mit der Komfort- und Ökonomiebewertung durch den Nutzer. Dies ist ein neuer Ansatz, der bisher in der Literatur nur unzureichend behandelt wurde.

Beim verstärkten Einsatz der Automatisierungstechnik im Hausbereich ist außerdem zu beachten, daß der Nutzer mit der Bedienung und Koordination leicht überfordert wird [Glat98]. Die Ziele dieser Arbeit bestehen daher darin, eine Leitkomponente zu entwickeln und zu erproben, welche

1. den komplexen regelungstechnischen Anforderungen der Heizungs- und Lüftungsregelung gerecht wird
2. die menschliche Empfindung und Beurteilung von Komfort und Ökonomie berücksichtigt und
3. sehr einfach zu bedienen ist.

Die Leistungsfähigkeit der Leitkomponente ist in Simulationen sowie experimentell in Versuchsräumen nachzuweisen.

Um dem Nutzer eine möglichst anwenderfreundliche Bedienung zu ermöglichen, soll über ein einfaches Bedienelement eine individuelle Wichtung der Gütekriterien vorgenommen werden. Die Leitkomponente optimiert dann die Sollwerte für die unterlagerten Heizungs- und Lüftungsregelkreise in Abhängigkeit vom aktuellen, mit Hilfe von Sensoren meßbaren Innen- und Außenklima (jeweils Temperatur, Feuchte und Luftqualität) und der Raumbelastung. Die Grundstruktur der Leitkomponente ist in Abb. 1.3-1 dargestellt.

Die zu entwickelnde Leitkomponente sollte weitgehend generische Eigenschaften aufweisen, d.h. sie sollte flexibel anpaßbar sein an:

- individuelle Komfort- und Kostenkriterien,
- unterschiedliche Bauphysik der Häuser und Räume,
- unterschiedliche Sensor-Aktorkonfigurationen sowie

- unterschiedliche Heizungs- und Lüftungsregelkreise.

Darüber hinaus soll sich die Leitkomponente mit einigen Adaptionen auch auf andere multikriterielle industrielle Optimierungs- bzw. Leitprobleme anwenden lassen.

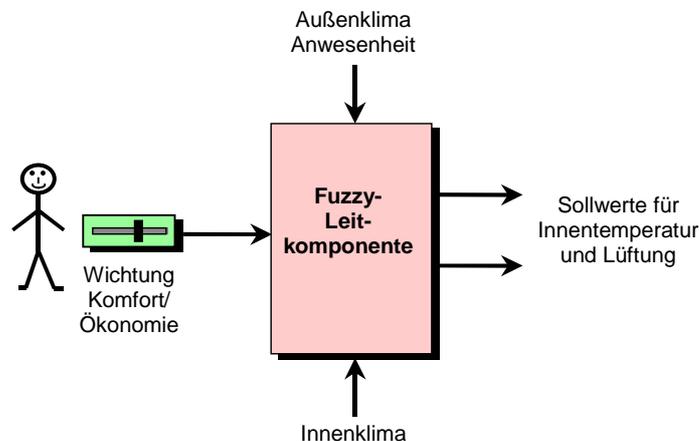


Abb. 1.3-1: Grundstruktur der fuzzy-basierten Leitkomponente

Zum Erreichen dieser Ziele sind folgende Teilaufgaben zu lösen.

### 1. Zusammenstellung theoretischer Grundlagen des Fuzzy Decision Making und von Behaglichkeitskriterien sowie Entwicklung eines Raumklimamodells

Aufgrund der Unschärfe des menschlichen Komfort-Empfindens wird Fuzzy-Logik als Methodik bei der Konzeptentwicklung verwendet (Abschnitt 2.1). Besondere Bedeutung haben hier Methoden der fuzzy-basierten Entscheidungsfindung (Fuzzy Decision Making), da sie sich besonders gut zur Nachbildung der menschlichen Beurteilung bei verschiedenen Gütekriterien eignen (Abschnitt 2.2).

Bei der Optimierung der Heizungs- und Lüftungsregelkreise ist neben dem menschlichen Komfort-Empfinden das komplexe physikalische Verhalten der Klimazustandsgrößen (Temperatur, Feuchte, Luftqualität) in Abhängigkeit des Außenklimas, der Störquellen im Raum sowie der Stellgrößen Heizung und Lüftung wesentlich. Daher wird in Abschnitt 2.3 ein vereinfachtes Raumklimamodell entwickelt, das bei begrenzter Komplexität alle wichtigen Wechselwirkungen enthält.

Eine Übersicht zu den im Rahmen dieser Arbeit wichtigen Komfortbereichen thermischer Behaglichkeit und Luftqualität wird in Abschnitt 2.4 vermittelt. Dabei werden mit Blick auf die technische Realisierbarkeit die relevanten Komfortkriterien herausgearbeitet.

### 2. Entwicklung eines Lösungskonzeptes zur Optimierung

Die Optimierung der Heizungs- und Lüftungsregelkreise wird verallgemeinert als Problem der Sollwertoptimierung bezüglich unscharfer Gütekriterien aufgefaßt. Dazu sind geeignete

Schnittstellen zu den unterlagerten Regelkreisen zu definieren (Abschnitt 3.1). In Abschnitt 3.2 wird ein Algorithmus des Fuzzy Decision Making mit Einbindung von physikalischen Modellbeziehungen und Wichtung der Gütekriterien zunächst in allgemeiner Form formuliert. Dabei ist zu unterscheiden zwischen der Optimierung einer Führungsgröße und der Optimierung einer Stellgröße, da in diesem Fall die Dynamik des Prozesses mit berücksichtigt werden muß.

Um die verallgemeinerten Algorithmen anwenden zu können, müssen die Gütekriterien in Form von Fuzzy-Zugehörigkeitsfunktionen vorliegen. Diese werden in Abschnitt 3.3 aus den in Abschnitt 2.4 herausgearbeiteten Komfortkriterien beispielhaft abgeleitet. Somit sind alle Vorbereitungen getroffen, um die Algorithmen zur Optimierung des Temperatursollwertes (Abschnitt 3.4) und des Lüftungssollwertes (Abschnitt 3.5) zu entwickeln. Dies gestaltet sich für den Lüftungssollwert aufwendiger, da hier mehrere Komfortkriterien zu berücksichtigen sind, die nicht direkt meßbaren Störquellen geschätzt werden müssen und das dynamische Verhalten der Regelstrecke zu berücksichtigen ist.

Zur Behandlung von Sonderfällen wie Abwesenheit und Umschaltung Winter/-Sommerfall werden zusätzliche heuristische Strategien entwickelt (Abschnitt 3.6).

### **3. Experimentelle und Simulationserprobung**

Die Leistungsfähigkeit der entwickelten Leitkomponente zur Optimierung der Heizungs- und Lüftungsregelkreise wird zunächst anhand von realitätsnahen Simulationen nachgewiesen (Abschnitt 4.1). Dabei werden Szenarien mit unterschiedlicher Raumbelagung, unterschiedlichem Außenklima und unterschiedlicher Lüftungsaktorik untersucht sowie Energieeinsparpotentiale mittels Energiebilanzen gezeigt.

Anhand von Meßergebnissen aus zwei Versuchsräumen mit unterschiedlicher Bauphysik und Sensor-Aktorkonfigurationen wird die Leistungsfähigkeit und Robustheit der Leitkomponente auch bei groben Störeinflüssen nachgewiesen (Abschnitt 4.2). Ein Überblick über die wichtigsten experimentellen und Simulationsergebnisse wird in Abschnitt 4.3 gegeben.

Kapitel 5 faßt die Ergebnisse der Arbeit zusammen und vermittelt Vorschläge und Anregungen für weiterführende Untersuchungen.

Ergänzend finden sich im Anhang A experimentelle Versuchsergebnisse zur Verifikation einiger der in Abschnitt 2.3 entwickelten Modellgleichungen. Anhang B ist der Darstellung des Simulationsmodells gewidmet. Die Programmstruktur und die verwendeten Parameter sind in Anhang C zusammengefaßt. Eine Auflistung der verwendeten Sensorik und Aktorik der Versuchsräume findet sich in Anhang D.

## 2 Theoretische Grundlagen

### 2.1 Fuzzy Logik

Die klassische Menge ist dadurch charakterisiert, daß sie scharf abgegrenzt ist, d.h. beliebige Objekte gehören entweder ganz oder gar nicht zu einer Menge  $M$ . Für reale Objekte ist es naheliegend, auch Zwischenstufen der Zugehörigkeit zu einer Menge zuzulassen. Dieses Prinzip wurde von ZADEH eingeführt [Zad65]. Die wesentlichen Begriffe der von ihm begründeten Fuzzy-Theorie werden in den Unterabschnitten 2.1.2 und 2.1.3 beschrieben. Zur Einordnung der Fuzzy-Logik wird im folgenden zunächst der Begriff der Unschärfe näher umrissen.

#### 2.1.1 Verschiedene Arten der Unschärfe

Es gibt prinzipiell unterschiedliche Arten von Unschärfe [Rom94]:

- 1. Stochastische Unschärfe:** Hierzu gehört beispielsweise das Signalrauschen.
- 2. Intrinsische Unschärfe:** Sie ist bedingt durch die menschliche Ausdrucksweise. Typisch sind z. B. Ausdrücke wie "niedrige Temperatur", "hohe Geschwindigkeit" usw. Es ist nicht exakt definierbar, was "niedrig" oder "hoch" jeweils bedeutet.
- 3. Informelle Unschärfe:** Sie ist dann gegeben, wenn der Begriff zwar exakt definierbar ist, dafür aber viele Einzelinformationen benötigt werden, die nur schwer zu einem Gesamturteil zusammengefügt werden können oder keine exakten Prognosen vorliegen. Ein Beispiel hierfür ist das Attribut "kreditwürdig". Die exakte Definition lautet, daß eine Person dann kreditwürdig ist, wenn sie den Kredit wie vereinbart zurückzahlen wird. Es ist aber sehr schwierig zu beurteilen, ob die Person die nötigen Eigenschaften besitzt, so daß sie diese Forderung erfüllen wird.
- 4. Unscharfe Relationen:** Beispiele dafür sind "nicht viel größer als", "erheblich jünger als", "ungefähr gleich".

Die Fuzzy-Theorie erlaubt es, unscharfe Informationen mit nicht-stochastischem Charakter zu verarbeiten, also Informationen vom Typ 2, 3 und 4. Eine weitere, hier nicht betrachtete Unschärfe ist im subatomaren Bereich durch die Heisenberg'sche Unschärferelation  $\Delta x \Delta p \geq \hbar$  gegeben ( $\Delta x$ ,  $\Delta p$ : Unschärfe im Ort bzw. Impuls;  $\hbar$ : Planck'sches Wirkungsquantum [Stö94]).

### 2.1.2 Grundlagen der Fuzzy-Theorie

Im folgenden werden kurzgefaßt die wichtigsten Begriffe der Fuzzy-Theorie eingeführt. Eine umfassendere Übersicht wird in [Mik99, Kie97, Kie93, Ban93, Rom94, Zim87, Zad65] vermittelt.

#### Definition 2.1: Unscharfe Menge (Fuzzy Set)

Ist  $X$  eine Menge von Objekten, die hinsichtlich einer unscharfen Aussage zu bewerten sind, so heißt

$$A = \{(x, \mu(x)) \mid x \in X\} \quad \text{mit } \mu : X \rightarrow [0,1]$$

eine unscharfe Menge auf  $X$  (fuzzy set in  $X$ ). Die Funktion  $\mu(x)$  wird Zugehörigkeitsfunktion (membership function, abgekürzt ZGF) genannt. Sie ordnet jedem Element  $x \in X$  den Zugehörigkeitsgrad  $\mu(x) \in [0,1]$  zu.

Die Grundmenge  $X$  kann sowohl diskret, z. B. die Menge aller natürlichen Zahlen, oder kontinuierlich sein, z. B. ein bestimmtes Temperaturintervall. Nimmt  $\mu$  nur die Werte 0 und 1 an, so geht die unscharfe Menge in eine klassische Menge über. Die klassische Menge ist also als Spezialfall in der Fuzzy-Menge enthalten.

Beispielhaft ist in Abb. 2.1-1 die ZGF  $\mu_{\text{junger\_Mann}}$  zur Modellierung des Begriffes "Junger Mann" dargestellt [Rom94].

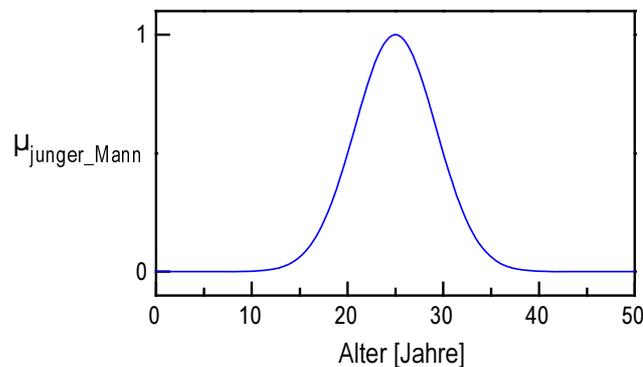


Abb. 2.1-1: Unscharfe Menge  $\mu_{\text{junger\_Mann}}$  zur Modellierung des Begriffes "Junger Mann" [Rom94]

Die Zugehörigkeitsfunktionen sind oft stückweise linear, d.h. dreiecks- oder trapezförmig, oder sie sind analytisch darstellbar durch Sigmoid- oder Gauss-Funktionen.

Bei der Modellierung realer unscharfer Mengen wird unterstellt, daß der Zugehörigkeitsgrad  $\mu(x) \in [0,1]$  für jedes  $x$  exakt bekannt ist. Dies ist natürlich nur annähernd möglich, da bei realen Problemen oft nur wenige Punkte der ZGF exakt bekannt sind, wie beispielsweise das

Maximum und Grenzwerte  $x_1$  und  $x_2$ , bei denen  $\mu$  den Wert Null annimmt. Der Verlauf zwischen diesen Punkten unterliegt einer gewissen Willkür sowie der Intuition des Problemlösers. Als Konzept zum Umgang mit der Unsicherheit des Verlaufs der ZGF schlug ZADEH vor, auch die Zugehörigkeitswerte  $\mu(x)$  selbst als unscharfe Mengen darzustellen [Zad75]. Dies ist in praktischen Problemen jedoch meist nicht nötig, denn wie weiter unten gezeigt wird, wird der wesentliche Informationsgehalt durch einige wenige Punkten der ZGF repräsentiert, so daß die Ergebnisse meistens robust sind gegen leichte Variationen der ZGF.

### Definition 2.2: Support

Für eine unscharfe Menge A heißt

$$\text{supp}(A) = \{x \in X \mid \mu(x) > 0\}$$

Support, stützende Menge oder Einflußbreite der Fuzzy-Menge.

### Definition 2.3: Toleranz

Die Toleranz einer unscharfen Menge A ist definiert durch

$$[m_1, m_2] = \{x \in X \mid \mu(x) = 1\}$$

### Definition 2.4: Normalisierung

Eine unscharfe Menge A heißt normalisiert, wenn

$$\sup_{x \in X} \mu(x) = 1,$$

(sup: Supremum = obere Grenze), d.h. wenn mindestens ein Element aus  $\mu$  den Zugehörigkeitsgrad Eins hat. Im praktischen Einsatz wird fast ausschließlich mit normalisierten Fuzzy-Mengen gearbeitet.

### Definition 2.5: $\alpha$ -Niveau-Menge

Für eine unscharfe Menge A und eine reelle Zahl  $\alpha \in [0,1]$  bezeichnet man die gewöhnliche Menge

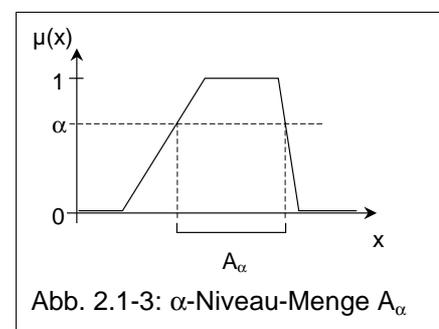
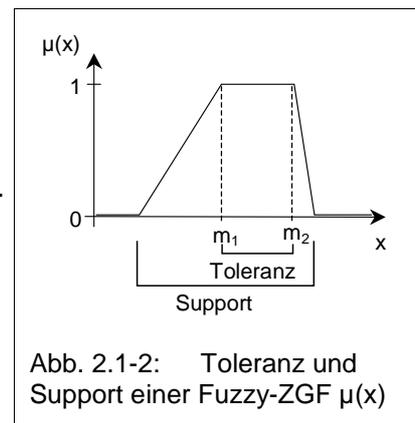
$$A_\alpha = \{x \in X \mid \mu(x) \geq \alpha\}$$

als  $\alpha$ -Niveau-Menge ( $\alpha$ -level-set) von  $\mu$ .

### Definition 2.6: Konvexität

Eine unscharfe Menge A heißt konvex, wenn

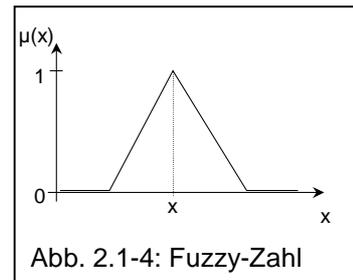
$$\mu(\lambda x_1 + (1 - \lambda)x_2) \geq \min(\mu(x_1), \mu(x_2)) \quad \forall x_1, x_2 \in X, \quad \forall \lambda \in [0,1].$$



**Definition 2.7: Fuzzy-Zahl**

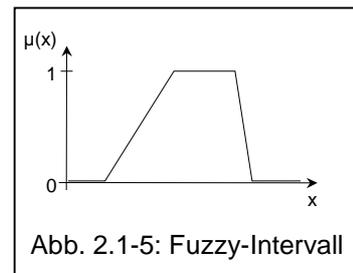
Eine konvexe, normalisierte unscharfe Menge  $A$  wird Fuzzy-Zahl (fuzzy number) genannt, wenn

- i. genau eine reelle Zahl  $x_0$  existiert mit  $\mu(x_0) = 1$  und
- ii.  $\mu(x)$  stückweise stetig ist.

**Definition 2.8: Fuzzy-Intervall**

Eine konvexe, normalisierte unscharfe Menge  $A$  wird als Fuzzy-Intervall (fuzzy interval) bezeichnet, wenn

- i. mehr als eine reelle Zahl existiert mit  $\mu(x)=1$  und
- ii.  $\mu(x)$  stückweise stetig ist.

**Definition 2.9: Fuzzy-Teilmenge**

Zwei Fuzzy-Mengen  $A_1, A_2$  seien repräsentiert durch ZGFn  $\mu_1, \mu_2$ . Die Fuzzy-Menge  $A_1$  heißt Fuzzy-Teilmenge einer Fuzzy-Menge  $A_2$  ( $A_1 \subseteq A_2$ ), wenn

$$\mu_1(x) \leq \mu_2(x) \quad \forall x \in X.$$

**Definition 2.10: Fuzzy-Ähnlichkeit**

Zwei Fuzzy-Mengen  $A_1$  und  $A_2$  sind fuzzy-ähnlich ( $A_1 \approx A_2$ ), wenn es zu jeder Höhe  $\alpha \in ]0,1]$  Zahlen  $\alpha_1$  und  $\alpha_2$  mit  $\alpha < \alpha_{1/2} \leq 1$  gibt, so daß gilt:

$$\begin{aligned} \text{supp}(\alpha_1 \mu_1)_\alpha &\subseteq \text{supp}(\mu_2)_\alpha \\ \text{supp}(\alpha_2 \mu_2)_\alpha &\subseteq \text{supp}(\mu_1)_\alpha \end{aligned}$$

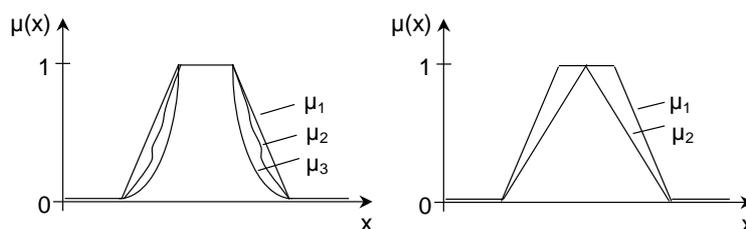


Abb. 2.1-6: Fuzzy-ähnliche (links) und nicht fuzzy-ähnliche Mengen (rechts)

**Definition 2.11: Strenge Fuzzy-Ähnlichkeit**

Zwei Fuzzy-Mengen  $A_1$  und  $A_2$  heißen streng fuzzy-ähnlich, wenn  $A_1$  und  $A_2$  sowie  $(1 - A_1)$  und  $(1 - A_2)$  fuzzy-ähnlich sind.

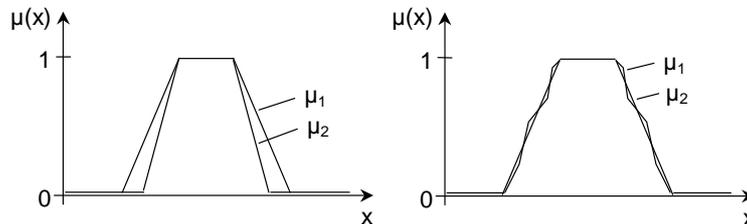


Abb. 2.1-7: Fuzzy-ähnliche (links) und streng fuzzy-ähnliche Mengen (rechts)

Aus Definition 2.2, 2.3 und 2.11 folgt der Satz:

**Satz:** Fuzzy-Mengen, deren Toleranz und Support übereinstimmen, sind streng fuzzy-ähnlich und umgekehrt.

Daraus lassen sich zwei wichtige praktische Schlüsse ziehen [Fat94]:

- Es ist ausreichend, die ansteigenden/abfallenden Flanken der Fuzzy-Mengen linear zu wählen, d.h. trapezförmige und dreiecksförmige Fuzzy-Mengen zu benutzen.
- Die wesentliche Information der Fuzzy-Menge liegt in der Toleranz und Einflußbreite.

Das oben erwähnte Problem, daß oft nur einige wenige Punkte der ZGF genau bekannt sind, ist also für praktische Aufgabenstellungen meistens irrelevant.

**2.1.3 Mengenoperatoren für Fuzzy-Mengen**

Für Fuzzy-Mengen gibt es mehrere widerspruchsfreie Erweiterungen der klassischen Mengenoperatoren UND, ODER, NICHT, Implikation und Äquivalenz [Rom94, Ban93, Zim91]. Im Grenzfall klassischer Mengen ( $\mu_1, \mu_2 \in \{0,1\}$ ) müssen sie mit den klassischen Operatoren konsistent sein. Die Vorgehensweise zur Bestimmung geeigneter Fuzzy-Operatoren kann grob in folgende drei Klassen gegliedert werden [Rom94]:

- intuitive Bestimmung von Operatoren (vgl. z. B. [Zad65])
- axiomatische Bestimmung von Operatoren (vgl. z. B. [Bel73])
- experimentelle Bestimmung von Operatoren (vgl. z. B. [Zim87])

Hier wird nur auf die intuitive und die experimentelle Vorgehensweise eingegangen.

ZADEH schlug zur Modellierung des Fuzzy-UND-Operators den Minimum-Operator, als Fuzzy-ODER-Operators den Maximum-Operator vor [Zad65]:

**Definition 2.12: Fuzzy-UND/-ODER über MIN/MAX-Operator**

$$(\mu_1 \wedge \mu_2)(x) \equiv \min_{x \in X} \{\mu_1(x), \mu_2(x)\} \quad \text{Fuzzy-UND}$$

$$(\mu_1 \vee \mu_2)(x) \equiv \max_{x \in X} \{\mu_1(x), \mu_2(x)\} \quad \text{Fuzzy-ODER}$$

**Definition 2.13: Komplement (Fuzzy-NICHT)**

Das Komplement  $\neg\mu$  einer Fuzzy-Menge A wird definiert über

$$\neg\mu(x) \equiv 1 - \mu(x) . \quad \text{Fuzzy-NICHT}$$

Mit den Definitionen 2.12, 2.13 gelten für den klassischen Grenzfall ( $\mu_1, \mu_2 \in \{0,1\}$ ) die Wahrheitswerte der klassischen UND-, ODER-, NICHT-Verknüpfung sowie Kommutativität, Assoziativität, Distributivität, Absorptionsgesetz und de Morgansche Gesetze analog zu denen der klassischen Logik. Aufgrund der hohen Übereinstimmung in den Eigenschaften können MIN- und MAX-Operator als natürliche Erweiterung der klassischen Mengenoperatoren für UND bzw. ODER angesehen werden [Rom94]. Es muß jedoch geprüft werden, inwiefern die Operatoren der umgangssprachlichen UND- bzw. ODER-Verknüpfung entsprechen.

Verzichtet man auf Distributivität und Absorptionsgesetz, so gibt es weitere binäre Operatorenpaare, die allgemein als triangular Norm (t-Norm) bzw. triangular Conorm (Co-t-Norm, s-Norm) bezeichnet werden [Rom94]. t-Norm und s-Norm sind wie folgt definiert:

**Definition 2.14: t-Norm**

Ein binärer Operator  $T: [0,1] \times [0,1]$  wird als t-Norm bezeichnet, wenn für alle  $a, b, c, d \in [0,1]$  gilt:

$$\begin{array}{ll} T(a,1) = a & 1 \text{ ist neutrales Element} \\ T(a,b) = T(b,a) & \text{Kommutativität} \\ T(a,T(b,c)) = T(T(a,b),c) & \text{Assoziativität} \\ T(a,b) \leq T(c,d), \text{ wenn } a \leq c \text{ und } b \leq d & \text{Monotonie} \end{array}$$

**Definition 2.15: s-Norm (Co-t-Norm)**

Ein binärer Operator  $S: [0,1] \times [0,1]$  wird als s-Norm oder auch Co-t-Norm bezeichnet, wenn für alle  $a, b, c, d \in [0,1]$  gilt:

$$\begin{array}{ll} S(a,0) = a & 0 \text{ ist neutrales Element} \\ S(a,b) = S(b,a) & \text{Kommutativität} \\ S(a,S(b,c)) = S(S(a,b),c) & \text{Assoziativität} \\ S(a,b) \leq S(c,d), \text{ wenn } a \leq c \text{ und } b \leq d & \text{Monotonie} \end{array}$$

Zwischen einer t-Norm und der dazugehörigen s-Norm besteht die Beziehung [Rom94]

$$T(a,b) = 1 - S((1-a), (1-b)) \quad (2.1-1)$$

MIN- und MAX-Operator gehören der t-Norm bzw. s-Norm an. Weitere Beispiele sind der Produktoperator (PROD-Operator) und die algebraische Summe (SUM-Operator), die in Definition 2.16 eingeführt werden. Sie können als weitere Variante des Fuzzy-UND- bzw. Fuzzy-ODER-Operators interpretiert werden [Rom94].

**Definition 2.16: Fuzzy-UND-/ODER über PROD-/SUM-Operator**

$$\text{PROD}(\mu_1, \mu_2)(x) \equiv \mu_1(x) \cdot \mu_2(x) \quad \text{Fuzzy-UND}$$

$$\text{SUM}(\mu_1, \mu_2)(x) \equiv \mu_1(x) + \mu_2(x) - \mu_1(x) \cdot \mu_2(x) \quad \text{Fuzzy-ODER}$$

Auch in diesen Operatoren sind für den klassischen Grenzfall ( $\mu_1, \mu_2 \in \{0,1\}$ ) der klassische UND- bzw. ODER-Operator enthalten. Im Gegensatz zu MIN-/MAX-Operator gilt für dieses Operatorpaar das Distributivgesetz und das Absorptionsgesetz jedoch nicht.

Neben den Operatorpaaren MIN/MAX, PROD/SUM gibt es eine Vielzahl weiterer Fuzzy-Operatoren, mit denen die UND/ODER-Verknüpfung von Fuzzy-Mengen erfolgen kann, die sich in der Regelungstechnik jedoch nicht durchgesetzt haben (vgl. z. B. [Kie97, Rom94, Zim87, Yag80]). Aufgrund der hohen Transparenz und des geringen Rechenaufwandes werden die Operatoren MIN-/MAX und PROD/SUM sehr häufig verwendet [Kie97, Kie93, Fat94]. Diese beiden Operatorpaare werden in Abb. 2.1-8 anhand der Verknüpfung von zwei beispielhaft gewählten Fuzzy-ZGFn  $\mu_1, \mu_2$  gegenübergestellt.

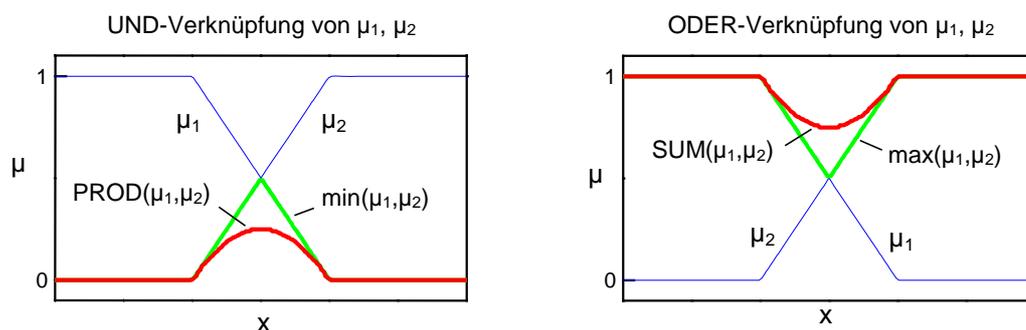


Abb. 2.1-8: UND-Verknüpfung von Fuzzy-ZGFn  $\mu_1, \mu_2$  über MIN- bzw. PROD-Operator (links), ODER-Verknüpfung von  $\mu_1, \mu_2$  über MAX- bzw. SUM-Operator (rechts)

MIN- und PROD-Operator haben die Eigenschaft, daß das Ergebnis der UND-Verknüpfung zweier Fuzzy-Mengen  $\mu_1$  und  $\mu_2$  jeweils durch den kleineren Wert der beiden Mengen

begrenzt wird. Das Ergebnis kann in einigen Fällen im Vergleich zur menschlichen Beurteilung einer UND-Verknüpfung zu pessimistisch ausfallen. Ist beispielsweise  $\mu_1 = 0.1$  und  $\mu_2 = 0.9$ , so ergibt sich  $\mu_1 \wedge \mu_2 = 0.1$  im Falle des MIN-Operators bzw.  $\mu_1 \wedge \mu_2 = 0.09$  für den PROD-Operator. Die menschliche Bewertung führt hier oft zu einem höheren Ergebniswert, d.h. zu einer optimistischeren Einschätzung. Daher liegt der Ansatz nahe, einen sogenannten kompensatorischen Operator zu definieren, bei dem ein sehr niedriger Zugehörigkeitsgrad von  $\mu_1$  durch einen sehr hohen Zugehörigkeitsgrad von  $\mu_2$  kompensiert werden kann, und umgekehrt. Dies wird beispielsweise durch den Gamma-Operator erreicht [Rom94], der wie folgt definiert ist:

**Definition 2.17: Gamma-Operator**

$$\mu_\gamma(\mu_1, \mu_2) \equiv (\mu_1 \mu_2)^{1-\gamma} (1 - (1 - \mu_1)(1 - \mu_2))^\gamma$$

Für die Spezialfälle  $\gamma = 0$  und  $\gamma = 1$  reduziert sich der Gamma-Operator zu

$$\mu_{\gamma=0} = \mu_1 \mu_2 \quad (2.1-2)$$

$$\mu_{\gamma=1} = 1 - (1 - \mu_1)(1 - \mu_2) \quad (2.1-3)$$

Somit geht der Gamma-Operator für  $\gamma \rightarrow 0$  in den PROD-Operator (UND-Verknüpfung) und für  $\gamma \rightarrow 1$  in den SUM-Operator (ODER-Verknüpfung) über. Über den Parameter  $\gamma$  kann also ein gleitender Übergang zwischen einer UND- bzw. ODER-Verknüpfung hergestellt werden. Die Verknüpfung zweier Fuzzy-ZGF  $\mu_1$  und  $\mu_2$  über den Gamma-Operator ist in Abb. 2.1-9 beispielhaft für verschiedene Werte von  $\gamma$  dargestellt. Es ist zu erkennen, daß für  $\gamma > 0$  niedrige Zugehörigkeitswerte von  $\mu_1$  durch hohe Zugehörigkeitswerte von  $\mu_2$  kompensiert werden, und umgekehrt.

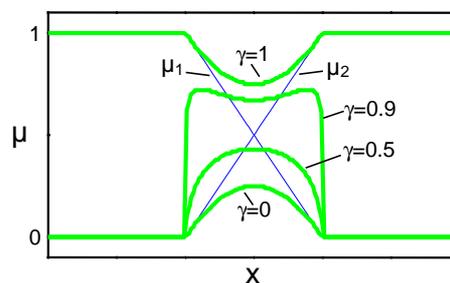


Abb. 2.1-9: Verknüpfung der Fuzzy Mengen  $\mu_1$ ,  $\mu_2$  über den  $\gamma$ -Operator ( $\gamma \rightarrow 0$ : SUM-Operator;  $\gamma \rightarrow 1$ : PROD-Operator)

Die Übereinstimmung des Gamma-Operators mit der menschlichen Beurteilung wurde in empirischen Studien zur Beurteilung der Kreditwürdigkeit validiert [Zim87]. Allerdings gibt es

auch Untersuchungen, in denen der Gamma-Operator nicht die in ihn gesetzten Erwartungen erfüllte [Rom94].

Abschließend ist festzustellen, daß das Problem der Operatorauswahl nicht trivial ist und die Eignung der Operatoren problemspezifisch zu überprüfen ist.

## 2.2 Fuzzy Decision Making

### 2.2.1 Einführung

Grundaufgabe jeder Optimierung ist es, ein bestimmtes Gütemaß unter Einhaltung von Nebenbedingungen zu maximieren bzw. zu minimieren. Im folgenden wird zur Abgrenzung der fuzzy-basierten Entscheidungsfindung (Fuzzy Decision Making) die allgemeine Problemstellung der statischen Optimierung betrachtet. Die an dieser Stelle gewählte Beschränkung auf die statische Optimierung wurde der Einfachheit halber gewählt und ist nicht grundsätzlicher Natur.

Die allgemeine Problemstellung der statischen Optimierung besteht darin, eine skalare statische Zielfunktion  $f(x)$  unter Einhaltung der Nebenbedingungen  $\mathbf{c}(x) = \mathbf{0}$  und  $\mathbf{h}(x) \leq \mathbf{0}$  zu minimieren [Pap96]:

$$\min_{\mathbf{x} \in \mathbf{X}} f(\mathbf{x}), \quad \mathbf{X} = \{\mathbf{x} \mid \mathbf{c}(\mathbf{x}) = \mathbf{0}; \mathbf{h}(\mathbf{x}) \leq \mathbf{0}\} \quad (2.2-1)$$

mit  $\mathbf{X} \subset \mathbb{R}^n$ ,  $\mathbf{c} \in \mathbb{R}^m$ ,  $\mathbf{h} \in \mathbb{R}^q$ ,  $m < n$

Der Vektor  $\mathbf{x}$  beinhaltet die gesuchten Optimierungsvariablen. Die Menge  $\mathbf{X}$  enthält alle Punkte, die die Nebenbedingungen erfüllen und heißt zulässiger Bereich [Pap96].

Bei vielen Fragestellungen sind jedoch Zielstellungen und Nebenbedingungen unscharf formuliert, wie beispielsweise

"Die Kosten sollten nicht wesentlich größer sein als  $K_0$ "

"x sollte ungefähr bei  $x_0$  liegen".

Dabei kennzeichnen die unterstrichenen Wörter, wodurch die Unschärfe in den Aussagen entsteht. BELLMAN und ZADEH entwickelten 1970 erste konzeptionelle Vorstellungen, wie Optimierungsprobleme bei Unschärfe behandelt werden können [Bel70]. Wesentliche Begriffe sind darin **Fuzzy-Ziel (fuzzy goal)**, **Fuzzy-Restriktion (fuzzy constraint)** und **Fuzzy-Entscheidung (fuzzy decision)**. Fuzzy-Ziel, Fuzzy-Restriktion und Fuzzy-Entscheidung werden mit Zugehörigkeitsfunktionen  $\mu_G$ ,  $\mu_C$  und  $\mu_D$  identifiziert, die auf einer Menge der Entscheidungsalternativen  $X$  definiert sind:

$$\mu_G: X \rightarrow [0,1] \quad \text{Fuzzy-Ziel (Goal)}$$

$\mu_C: X \rightarrow [0,1]$	Fuzzy-Restriktion ( <u>C</u> onstraint)
$\mu_D: X \rightarrow [0,1]$	Fuzzy-Entscheidung ( <u>D</u> ecision)

Ein Unterschied eines Fuzzy-Zieles zu einer gewöhnlichen Gütefunktion besteht in der Beschränkung auf das Intervall  $[0,1]$ . Es kann jedoch aus jeder klassischen Gütefunktion durch Normierung oder geeignete Transformation ein Fuzzy-Ziel konstruiert werden.

Bei den Zielen und Restriktionen wird dabei jeweils maximaler Zugehörigkeitsgrad angestrebt. Vorausgesetzt wird, daß es möglich ist, bei unscharfer Formulierung von Zielen und Restriktionen Zugehörigkeitsfunktionen  $\mu_G$  bzw.  $\mu_C$  zu erzeugen, d.h. jeder Alternative  $x \in X$  einen Wert  $\mu(x)$  zuzuordnen, so daß eine Präferenzordnung auf  $X$  festgelegt wird. Es gilt danach für Elemente  $x_1, x_2$ :

$$x_1 \text{ wird gegen } x_2 \text{ bevorzugt} \Leftrightarrow \mu(x_1) > \mu(x_2)$$

oder kurz

$$x_1 \succ x_2 \Leftrightarrow \mu(x_1) > \mu(x_2) \quad (2.2-2)$$

Weiter wird angenommen, daß die Menge der Alternativen  $X$  diskret und klein genug ist, um explizit aufgezählt zu werden [Dub84].

Da bei der Ermittlung der optimalen Entscheidung sowohl Ziele als auch Restriktionen berücksichtigt werden müssen, liegt es nahe, eine Fuzzy-Entscheidung  $\mu_D$  als eine UND-Verknüpfung des Fuzzy-Ziels  $\mu_G$  und der Fuzzy-Restriktion  $\mu_C$  zu definieren [Bel70]:

$$\mu_D(x) = \mu_G(x) \wedge \mu_C(x), \quad x \in X \quad (2.2-3)$$

Gleichung (2.2-3) kann ohne weiteres auch für den Fall mehrerer Fuzzy-Ziele  $\mu_{G,1}, \dots, \mu_{G,n}$  bzw. mehrerer Fuzzy-Restriktionen  $\mu_{C,1}, \dots, \mu_{C,m}$  erweitert werden [Bel70]:

$$\mu_D(x) = \mu_{G,1}(x) \wedge \dots \wedge \mu_{G,n}(x) \wedge \mu_{C,1}(x) \wedge \dots \wedge \mu_{C,m}(x), \quad x \in X \quad (2.2-4)$$

Multikriterielle Entscheidungsprobleme sind also formal nicht schwieriger zu behandeln als monokriterielle. Bemerkenswert an Gleichung (2.2-4) ist, daß die Fuzzy-Ziele  $\mu_{G,1}, \dots, \mu_{G,n}$  und die Fuzzy-Restriktionen  $\mu_{C,1}, \dots, \mu_{C,m}$  sowohl formal als auch von der Bedeutung her gleichwertig behandelt werden. Es entsteht also eine gewisse Symmetrie bezüglich Zielen und Restriktionen. Daher wird im folgenden nur noch bei besonderer Notwendigkeit explizit zwischen Fuzzy-Ziel und Fuzzy-Restriktion unterschieden. Sie werden, wie in der Literatur üblich, allgemein als Gütekriterien  $\mu_i$  ( $i = 1, \dots, N$ ) bezeichnet. Gleichung (2.2-4) modifiziert sich somit zu

$$\mu_D(x) = \mu_1(x) \wedge \dots \wedge \mu_N(x) \quad (2.2-5)$$

Als Operator zur UND-Verknüpfung in Gleichung (2.2-5) schlagen BELLMAN und ZADEH den MIN-Operator vor [Bel70], wobei eingeräumt wird, daß je nach Problemstellung auch andere Operatoren sinnvoller sein können. Der MIN-Operator entspricht einer "harten" UND-Verknüpfung und bringt eine pessimistische Einschätzung der Kompromißbildung zum Ausdruck. In einigen Fällen können beispielsweise kompensatorische Operatoren geeigneter sein. Es muß also die Operatorwahl der Problemstellung angepaßt sein. In Tabelle 2.2-1 sind einige Operatoren nach Einschätzung der Aggregation aufgelistet [Rom94].

	Operator	
pessimistisch    optimistisch	Algebraisches Produkt	$\mu_1 \cdot \mu_2$
	MIN	$\min(\mu_1, \mu_2)$
	Geometrisches Mittel	$\sqrt{\mu_1 \cdot \mu_2}$
	Arithmetisches Mittel	$0.5(\mu_1 + \mu_2)$
	MAX	$\max(\mu_1, \mu_2)$
	Algebraische Summe	$\mu_1 + \mu_2 - \mu_1 \cdot \mu_2$

Tabelle 2.2-1: Rangfolge einiger Operatoren nach Einschätzung der Aggregation [Rom94]

Allgemeiner kann die Fuzzy-Entscheidung  $\mu_D$  definiert werden als eine Aggregation von Zielen und Restriktionen, wobei die Art der Verknüpfung noch offen ist. Sinnvoll kann z. B. bei mehreren Zielen eine hierarchische Bildung von Zielen aus mehreren Unterzielen sein. Diese Unterziele können dann ggf. auch mit ODER verknüpft sein und es können unterschiedliche Operatoren zur UND-Verknüpfung verwendet werden. Daher bevorzugen DUBOIS und PRADE die allgemeine Notation

$$\mu_D(x) = h(\mu_1(x), \dots, \mu_N(x)) \quad (2.2-6)$$

zur Berechnung von  $\mu_D$ , die die Aggregation der Ziele und Restriktionen  $\mu_1, \dots, \mu_N$  zunächst noch offen läßt [Dub84].

Als **optimale Entscheidung (optimal decision)** wird die klassische Menge

$$\mu_D(x^*) = \max_{x \in X} \mu_D(x) \quad (2.2-7)$$

bezeichnet.  $x^*$  heißt optimale Entscheidung (optimal decision) [Bel70]. Mit Gleichung (2.2-7) wird also die Fuzzy-Entscheidung  $\mu_D$  defuzzifiziert. Im Bereich von Fuzzy-Control wird neben der Maximum-Defuzzifizierung über Gleichung (2.2-7) vor allem die Schwerpunktmethod

verwendet [Kie97, Koc96]. Da Verfahren des Fuzzy Decision Making jedoch in engem Verhältnis zur Optimierung stehen, ist hier oft die Anwendung der Maximum-Defuzzifizierung gemäß Gleichung (2.2-7) sinnvoller [Kac97, Rom94, Zim87]. Auch in der vorliegenden Arbeit wird ausschließlich diese Methode verwendet.

Bezüglich der Existenz und Eindeutigkeit der optimalen Entscheidung  $x^*$  sind drei Fälle zu unterscheiden:

1.  $\mu_D(x)$  ist konstant  $\Rightarrow$  Es gibt keine Lösung  $x^*$ .
2.  $\mu_D(x)$  hat ein eindeutiges Maximum  $\Rightarrow$  Es gibt eine eindeutige Lösung  $x^*$ .
3.  $\mu_D(x)$  hat kein eindeutiges Maximum  $\Rightarrow$  Es gibt eine mehrdeutige Lösung  $x^*$ .

Die drei Fälle werden in Abb. 2.2-1 anhand von beispielhaft gewählten Fuzzy-Entscheidungen  $\mu_{D1}$  (Fall 1),  $\mu_{D2}$  (Fall 2) und  $\mu_{D3}$  (Fall 3) verdeutlicht.

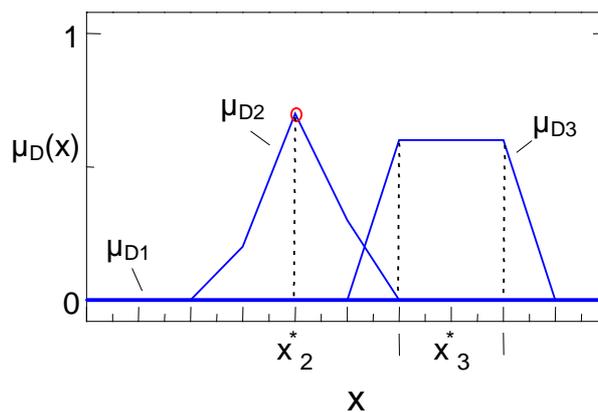


Abb. 2.2-1: Zur Existenz und Eindeutigkeit der maximierenden Entscheidung  $x^*$

## 2.2.2 Einfaches Beispiel

Die eingeführten Begriffe werden an einem einfachen Beispiel illustriert.

Gesucht sei der Wert  $x^*$ , der das Fuzzy-Ziel

"x sollte wesentlich größer sein als 1"

und die Fuzzy-Restriktion

"x sollte ungefähr zwischen 3 und 6 liegen"

maximal erfüllt.

Das Fuzzy-Ziel kann modelliert werden durch die in Abb. 2.2-2 dargestellte ZGF  $\mu_G$ . Die Fuzzy-Restriktion werde repräsentiert durch die in Abb. 2.2-3 gezeigte ZGF  $\mu_C$ . Gepunktet

dargestellt sind in den Abbildungen binäre ZGFn, die die Unschärfe in den Aussagen nicht berücksichtigen und somit nur eine schlechte Modellierung darstellen.

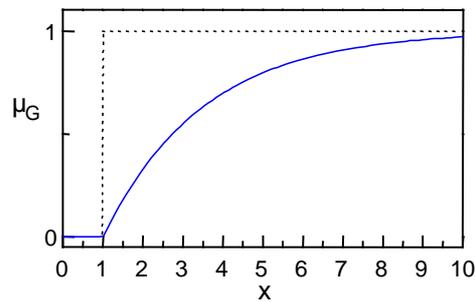


Abb. 2.2-2: Modellierung des Fuzzy-Ziels "x sollte wesentlich größer sein als 1" durch die ZGF  $\mu_G$  (gepunktet: binäre ZGF)

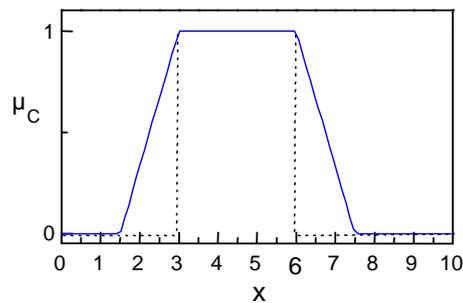


Abb. 2.2-3: Modellierung der Fuzzy-Restriktion "x sollte ungefähr zwischen 3 und 6 liegen" durch die ZGF  $\mu_C$  (gepunktet: binäre ZGF)

Die Fuzzy-Entscheidung  $\mu_D$  berechnet sich nach Gleichung (2.2-5) unter Verwendung des MIN-Operators über

$$\mu_D(x) = \min_x(\mu_G(x), \mu_C(x))$$

und liefert mit Gleichung (2.2-7)

$$\mu_D(x^*) = \max_x \mu_D(x)$$

die optimale Entscheidung  $x^* \approx 6,16$  und  $\mu_D(x^*) \approx 0,87$ . Die Berechnung ist in Abb. 2.2-4 dargestellt.

Bereits anhand dieses einfachen Beispiels wird das Problem deutlich, daß die unscharfen menschlichen Aussagen in geeignete Zugehörigkeitsfunktionen zu "übersetzen" sind. Dabei geht immer die subjektive Bewertung des Problemlösers mit ein. Da aber der wesentliche Informationsgehalt durch Support und Toleranz der ZGF repräsentiert wird, sind die Ergebnisse i. a. nicht sehr sensitiv gegenüber der Form der ZGF.

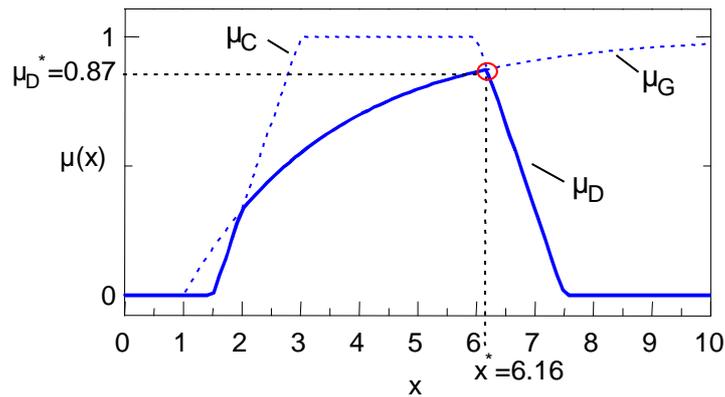


Abb. 2.2-4: Beispiel mit Fuzzy-Ziel  $\mu_G$ , Fuzzy-Restriktion  $\mu_C$ , Fuzzy-Entscheidung  $\mu_D$ , optimaler Entscheidung  $\mu_D^*$  und maximierender Entscheidung  $x^*$

### 2.2.3 Wichtung der Gütekriterien

Das bisher skizzierte Grundkonzept des Fuzzy Decision Making impliziert gleiche Wichtung aller Gütekriterien, da bei der Berechnung der Fuzzy-Entscheidung gemäß

$$\mu_D(x) = \mu_1(x) \wedge \dots \wedge \mu_N(x) \quad (2.2-5)$$

alle Gütekriterien gleich behandelt werden. In praktischen Anwendungen sind die verschiedenen Ziele und Restriktionen jedoch fast immer von unterschiedlicher Bedeutung. Daher werden im folgenden einige Möglichkeiten zur Berücksichtigung unterschiedlicher Wichtungen vorgestellt. In der Literatur werden die verschiedenen Wichtungsmechanismen oft aus rein mathematischer Sicht eingeführt (vgl. z. B. [Kac97, Rom94, Zim87]). Da die verschiedenen Methoden jedoch sehr unterschiedliche Auswirkungen haben, erfolgt hier eine detailliertere Betrachtung. Aus den verschiedenen Ansätzen wird ein für die vorliegende Problemstellung geeigneter ausgewählt.

#### 2.2.3.1 Gewichtete Summe

BELLMAN und ZADEH schlugen die Aggregation der Gütekriterien über gewichtete Summen vor,

$$\mu_D(x) = \sum_{i=1}^N \alpha_i \mu_i(x) \quad (2.2-8)$$

wobei  $\alpha_i$  Wichtungsparameter sind mit  $\sum_{i=1}^N \alpha_i \equiv 1$  [Bel70]. Diese Vorgehensweise hat jedoch

zwei Nachteile. Zum einen ist die Bestimmung der Parameter  $\alpha_i$  nicht transparent, d.h. es ist nicht a priori ersichtlich, welchen Einfluß die Parameterwahl auf das Ergebnis hat. Stärker

noch ist das Argument, daß die Addition der gewichteten Gütekriterien ( $\alpha\mu_i$ ) kompensatorischen Charakter hat und somit keine "harte" UND-Verknüpfung erfolgt (vgl. Tabelle 2.2-1). Die Bildung eines gewichteten Mittelwertes entspricht mehr einer ODER-Verknüpfung. Ist beispielsweise eine ZGF  $\mu_i$  identisch Null, so hat dies bei einer UND-Verknüpfung  $\mu_D = 0$  zur Folge. Dies ist jedoch nach Gleichung (2.2-8) i. a. nicht der Fall.

Die Problematik der Methode wird in Abb. 2.2-5 anhand von zwei beispielhaft gewählten Gütekriterien  $\mu_1$  und  $\mu_2$  verdeutlicht. Bei zwei Gütekriterien vereinfacht sich Gleichung (2.2-8) zu

$$\mu_D(x) = \alpha\mu_1(x) + (1-\alpha)\mu_2(x), \quad 0 \leq \alpha \leq 1 \quad (2.2-9)$$

Für  $\alpha = 1$  bzw.  $\alpha = 0$  ergeben sich die monokriteriellen Fälle  $\mu_D = \mu_1$  bzw.  $\mu_D = \mu_2$ . Für  $0.5 < \alpha \leq 1$  ist die optimale Entscheidung identisch mit der Lage des Maximums von  $\mu_1$ , d.h.  $x^* = x_1^*$  (vgl. Abb. 2.2-5, rechts). Für  $0 \leq \alpha < 0.5$  gilt  $x^* = x_2^*$ . Im Fall  $\alpha = 0.5$  entsteht sogar ein gleichwertiger Bereich, so daß keine eindeutige Entscheidung  $x^*$  getroffen werden kann. Die optimale Entscheidung  $x^*$  verändert sich also nicht stetig mit dem Wichtungparameter  $\alpha$ , sondern springt von  $x^* = x_1^*$  für  $0.5 < \alpha \leq 1$  auf  $x^* = x_2^*$  für  $0 \leq \alpha < 0.5$ . Das plausibelste Ergebnis bei gleicher Wichtung der Gütekriterien, nämlich die Projektion des Schnittpunktes der Gütekriterien, wird gar nicht erreicht.

Es wird also bereits an diesem einfachen Beispiel deutlich, daß über die gewichtete Summe nicht immer eine interpretierbare Wichtung der Gütekriterien möglich ist.

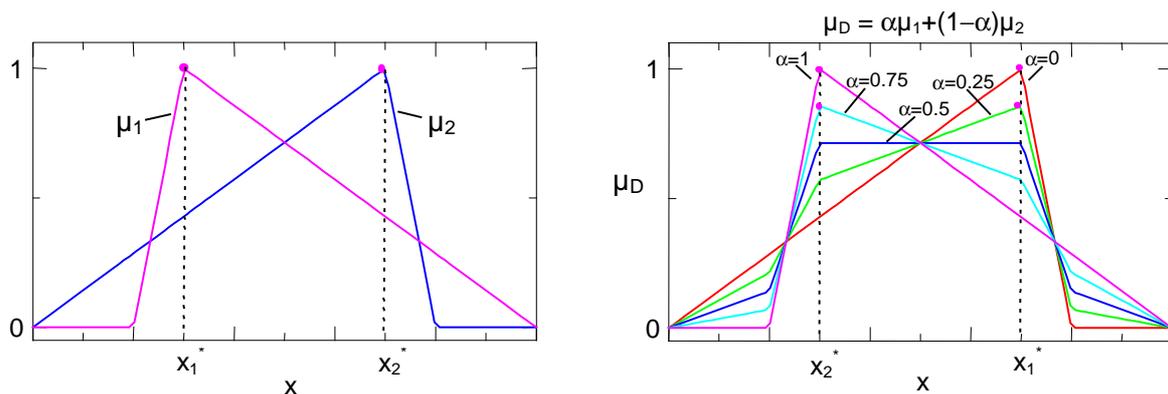


Abb. 2.2-5: Definition der Gütekriterien  $\mu_1$  und  $\mu_2$  (links) und Darstellung von  $\mu_D$  bei Wichtung über eine gewichtete Summe (rechts)

### 2.2.3.2 Wichtung über Modifikatoren

Eine transparentere Methode zur Wichtung der Ziele und Restriktionen besteht in der Einführung von Modifikatoren [Zad78]. Hierbei werden linguistische Attribute wie "sehr", "etwas" über die Potenzierung der ZGF mit einem Parameter  $\gamma > 0$  modelliert:

$$\mu_{\text{mod}}(x) \equiv \mu^\gamma(x), \quad \gamma > 0 \quad (2.2-10)$$

Für  $\gamma < 1$  wird die Bedeutung von  $\mu(x)$  herabgesetzt, für  $\gamma > 1$  wird sie verstärkt. Wird beispielsweise die Eigenschaft "billig" repräsentiert durch die ZGF  $\mu_{\text{billig}}$ , so kann das Attribut "sehr billig" modelliert werden durch die ZGF  $(\mu_{\text{billig}})^2$ , während eine Abschwächung durch  $(\mu_{\text{billig}})^{1/2}$  erzeugt werden kann. Mit Modifikatoren  $\gamma_1, \dots, \gamma_N$  lassen sich die Gütekriterien aus Gleichung (2.2-5) gewichten, so daß sich die Fuzzy-Entscheidung  $\mu_D$  berechnet über

$$\mu_D(x) = \mu_1^{\gamma_1}(x) \wedge \dots \wedge \mu_N^{\gamma_N}(x), \quad \wedge = \min \quad (2.2-11)$$

Dieser Ansatz zur Wichtung der Gütekriterien wurde von YAGER entwickelt [Yag78]. Der Mechanismus wird in Abb. 2.2-6 anhand von zwei beispielhaft gewählten Gütekriterien  $\mu_1, \mu_2$  verdeutlicht. In diesem Beispiel wird  $\mu_2$  gegenüber  $\mu_1$  mit einem Exponenten  $\gamma > 1$  zunehmend gewichtet, so daß sich Gleichung (2.2-11) reduziert zu

$$\mu_D(x) = \mu_1(x) \wedge \mu_2^\gamma(x). \quad (2.2-12)$$

Je größer  $\gamma$ , desto mehr fokussiert sich die Kurve um das Maximum  $x_2^*$  des Gütekriteriums  $\mu_2$ . Der Zugehörigkeitsgrad des Maximums bleibt wegen  $\mu_2(x_2^*) = 1$  unverändert. Daher kann  $x_2^*$  selbst als optimale Entscheidung nie genau erreicht werden. Die Methode kann also das Ergebnis zwar in der gewünschten Richtung beeinflussen, jedoch nicht die monokriteriellen Grenzfälle  $x^* = x_1^*$  bzw.  $x^* = x_2^*$  erreichen.

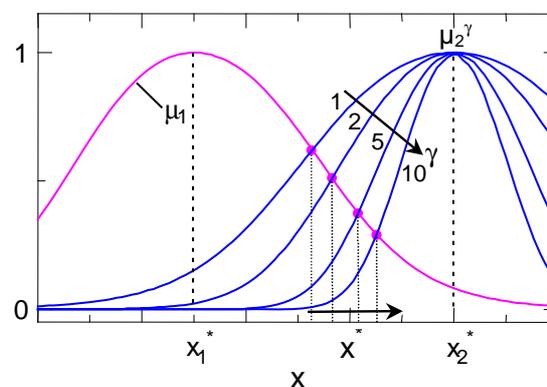


Abb. 2.2-6: Stärkere Wichtung des Gütekriteriums  $\mu_2$  gegenüber  $\mu_1$  über den Modifikator  $\gamma > 1$

### 2.2.3.3 Wichtung durch Multiplikatoren

Es ist daher ein Verfahren wünschenswert, nach dem unterschiedliche Ziele bei entsprechender Wichtung genau erreicht werden können. Sinnvoll erscheint daher die Vorgehensweise, die Gütekriterien mit Wichtungsfaktoren  $\lambda_i$  ( $i=1,\dots,N$ ) zu multiplizieren:

$$\mu_D(x) = \lambda_1 \mu_1(x) \wedge \dots \wedge \lambda_N \mu_N(x), \quad 0 \leq \lambda_i \leq 1, \quad i = 1, \dots, N, \quad \wedge = \min \quad (2.2-13)$$

Dabei wird ein Gütekriterium  $\mu_i$  um so stärker gewichtet, je kleiner  $\lambda_i$  ist, da so die übrigen ZGF wegen der Verknüpfung durch den MIN-Operator immer geringeren Einfluß auf die gewichtete ZGF  $\lambda_i \mu_i$  haben. Die Wichtungsfaktoren  $\lambda_i$  können aus mathematischer Sicht auch den Wert Null annehmen. Gilt  $\lambda_i = 0$  für einen Faktor  $\lambda_i$ , so folgt aus Gleichung (2.2-13)

$$\lambda_i = 0 \Rightarrow \mu_D(x) \equiv 0. \quad (2.2-14)$$

Es ist daher in der praktischen Anwendung meist nicht sinnvoll,  $\lambda_i = 0$  zuzulassen, da sonst wegen  $\mu_D \equiv 0$  keine Entscheidungsfindung mehr möglich ist. Daher wird im folgenden der Fall  $\lambda_i = 0$  ausgeschlossen.

Die relative Wichtung zweier Ziele  $\mu_k, \mu_v$  zueinander wird durch das Verhältnis der Wichtungsfaktoren  $\lambda_k, \lambda_v$  angegeben. Dies wird in Unterabschnitt 2.2.3.6 im Detail diskutiert.

Die Wichtung nach Gleichung (2.2-13) wird in Abb. 2.2-7 anhand von zwei beispielhaft gewählten Gütekriterien  $\mu_1, \mu_2$  illustriert. Bei Wichtung von  $\mu_2$  gegenüber  $\mu_1$  reduziert sich Gleichung (2.2-13) zu

$$\mu_D(x) = \mu_1(x) \wedge \lambda \mu_2(x), \quad 0 < \lambda \leq 1 \quad (2.2-15)$$

Aus Abb. 2.2-7 wird deutlich, daß für  $\lambda \rightarrow 0$  die optimale Entscheidung mit dem monokriteriellen Ergebnis von  $\mu_2$  zusammenfällt, d.h.  $x^* = x_2^*$ . Der Fall  $\lambda = 1$  entspricht gleicher Wichtung der Gütekriterien  $\mu_1$  und  $\mu_2$ . Somit ist ein transparente Wichtung möglich, d.h. eine stetige Abhängigkeit vom Wichtungsparameter sowie das Erreichen der monokriteriellen Grenzfälle.

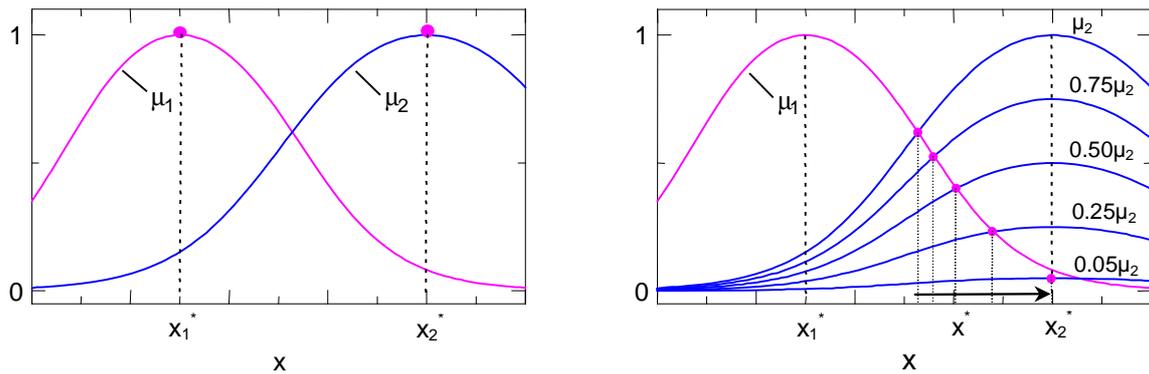


Abb. 2.2-7: Definition der Gütekriterien  $\mu_1$  und  $\mu_2$  (links) und Fuzzy Decision Making mit zunehmender Wichtigung des Gütekriteriums  $\mu_2$  für  $\lambda \rightarrow 0$  (rechts)

#### 2.2.3.4 Verbotene Bereiche

Eine wichtige Eigenschaft der in Unterabschnitt 2.2.3.3 beschriebenen Methode besteht darin, daß für alle Elemente  $\{x'\}$  aus  $X$ , für die eines der Gütekriterien  $\mu_i$  ( $i=1, \dots, N$ ) den Wert Null annimmt,  $\mu_D$  ebenfalls gleich Null ist und somit  $\{x'\}$  nicht mehr der Entscheidungsmenge zur Verfügung steht, unabhängig von der Wichtigung der einzelnen  $\mu_i$ . Formal ist das wie folgt zu begründen. Aus der Definition des Supports einer Fuzzy-Menge  $\mu(x)$

$$\text{supp}(\mu) = \{x \in X \mid \mu(x) > 0\} \quad \text{Definition 2.2}$$

folgt

$$\begin{aligned} \text{supp}(\mu_1 \wedge \mu_2) &= \{x \in X \mid (\mu_1(x) \wedge \mu_2(x)) > 0\}, & \wedge &= \min & (2.2-16) \\ &= \{x \in X \mid (\mu_1(x) > 0) \wedge (\mu_2(x) > 0)\} \\ &= \text{supp}(\mu_1) \cap \text{supp}(\mu_2) \end{aligned}$$

Dieser Sachverhalt wird in Abb. 2.2-8 verdeutlicht. Damit folgt für  $\mu_D$  aus Gleichung (2.2-13),

$$\mu_D(x) = \lambda_1 \mu_1(x) \wedge \dots \wedge \lambda_N \mu_N(x), \quad 0 < \lambda_i \leq 1, \quad (2.2-13)$$

der Zusammenhang

$$\begin{aligned} \text{supp}(\mu_D) &= \text{supp}(\lambda_1 \mu_1) \cap \dots \cap \text{supp}(\lambda_N \mu_N) \\ &= \text{supp}(\mu_1) \cap \dots \cap \text{supp}(\mu_N) \end{aligned} \quad (2.2-17)$$

Der Support von  $\mu_D$  ist also die Schnittmenge der Supports der ZGF  $\mu_1, \dots, \mu_N$ . Bereiche außerhalb des Supports von  $\mu_1, \dots, \mu_N$  sind daher "verbotene Bereiche". Somit kann die optimale Entscheidung  $x^*$ , die sich über  $\mu_D(x^*) = \max_{x \in X} \mu_D(x)$  berechnet, nur in der Schnittmenge der Supports liegen. Die potentielle Lösungsmenge kann also durch die

Supports der Gütekriterien  $\mu_1, \dots, \mu_N$  einfach, transparent und unabhängig von den Wichtungsfaktoren eingegrenzt werden.

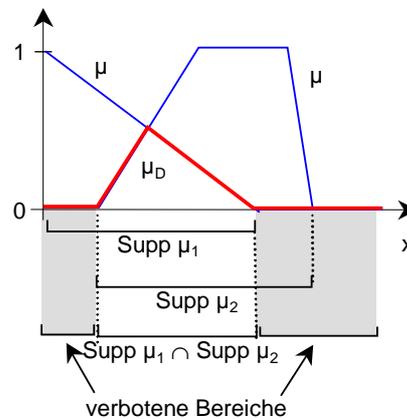


Abb. 2.2-8: Bereiche außerhalb des Supports von  $\mu_1, \mu_2$  sind "verbotene Bereiche"

### 2.2.3.5 Korrekturterm zur Erzeugung einer eindeutigen Entscheidung

Haben ein oder mehrere der  $N$  Gütekriterien  $\mu_1, \dots, \mu_N$  kein eindeutiges Maximum, was beispielsweise bei trapezförmigen ZGF der Fall ist, so kann sich das auf  $\mu_D$  übertragen, so daß über  $\mu_D(x^*) = \max_{x \in X} \mu_D(x)$  keine eindeutige Entscheidung  $x^*$  getroffen werden kann (vgl. Gleichung (2.2-13)). Dabei sind zwei Fälle zu unterscheiden:

Fall 1: Sind bei  $x^*$  alle Gütekriterien konstant, wie in Abb. 2.2-9 gezeigt, so kann tatsächlich keine eindeutige Entscheidung getroffen werden.

Fall 2: Hat jedoch, wie in Abb. 2.2-10 dargestellt, mindestens ein Gütekriterium bei  $x^*$  einen nicht konstanten Verlauf, so kann eine eindeutige Präferenzordnung festgelegt und somit eine eindeutige Entscheidung getroffen werden. In diesem Fall wurde die Uneindeutigkeit durch den Minimumoperator erzeugt, der höhere Zugehörigkeitswerte ignoriert und somit Information vernichtet. In Abb. 2.2-10 können die kleineren Werte des  $x^*$ -Intervalls als besser angesehen werden, weil  $\mu_1$  mit  $x$  abnimmt.

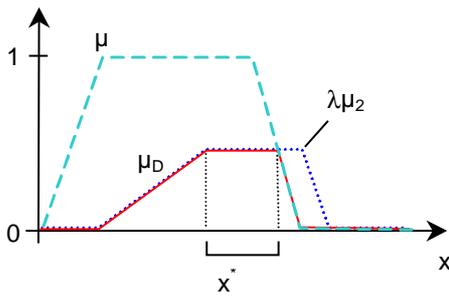


Abb. 2.2-9: Fall 1: Es kann keine eindeutige Entscheidung getroffen werden

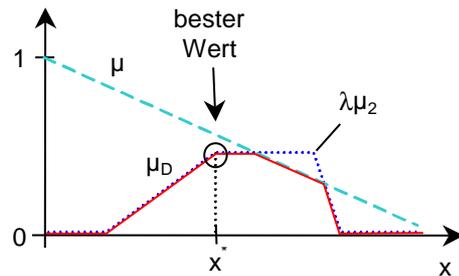


Abb. 2.2-10: Fall 2: Wenn mindestens ein Gütekriterium  $\mu_i$  im maximalen Bereich von  $\mu_D$  einen Gradienten aufweist, kann eine eindeutige Entscheidung getroffen werden

Um dieses Prinzip zu formalisieren, ist die Einführung eines additiven Korrekturterms proportional zu  $(\mu_1 \cdot \dots \cdot \mu_N)$  bei der Berechnung von  $\mu_D$  sinnvoll, der durch einen Faktor  $\varepsilon \ll 1$  "klein" gehalten wird:

$$\mu_D = \underbrace{\min(\lambda_1 \mu_1, \dots, \lambda_N \mu_N)}_{\text{Hauptterm}} + \underbrace{\varepsilon(\mu_1 \cdot \dots \cdot \mu_N)}_{\text{Korrekturterm}}, \quad 0 < \lambda_i \leq 1 \quad (2.2-18)$$

Damit wird eine eindeutige Rangfolge erzeugt, sofern nicht alle  $\mu_i$  in einem bestimmten Bereich von  $x$  konstant sind (Fall 1). Der in Gleichung (2.2-18) vorgeschlagene Ansatz ist plausibel und zweckmäßig, jedoch aus mathematischer Sicht nicht ganz korrekt, da für den Fall, daß alle Wichtungsfaktoren  $\lambda_i$  gleich eins sind,  $\mu_D$  größer als eins werden kann. Dies ist in der Anwendung durch die Zusatzbedingung  $\mu_D \leq 1$  auszuschließen.

Um sicherzustellen, daß der Korrekturterm in Gleichung (2.2-18) tatsächlich klein gegen den Hauptterm bleibt, muß  $\varepsilon$  sehr viel kleiner als der kleinste  $\lambda$ -Wert gewählt werden. Beispielsweise kann  $\lambda_i$  nach unten auf  $10^{-4}$  beschränkt und  $\varepsilon = 10^{-5}$  gewählt werden.

Im folgenden wird weiterhin die kompakte Schreibweise

$$\mu_D(x) = \bigwedge_{i=1}^N \lambda_i \mu_i(x), \quad 0 < \lambda_i \leq 1 \quad (2.2-13)$$

bevorzugt, die jedoch bei der rechentechnischen Realisierung durch den erweiterten Ausdruck (2.2-18) zu ersetzen ist.

### 2.2.3.6 Wichtung bei zwei Gütekriterien

Es wird der Fall, daß zwei Gütekriterien existieren, näher beleuchtet, da dies bei der Entwicklung des Lösungskonzeptes in Kapitel 3 von besonderem Interesse sein wird.

Bei der Wichtung der  $\mu_i$  in der Berechnung von  $\mu_D$  gemäß

$$\mu_D(x) = \bigwedge_{i=1}^N \lambda_i \mu_i(x), \quad 0 < \lambda_i \leq 1 \quad (2.2-13)$$

ist jeweils das Verhältnis von zwei Wichtungen  $\lambda_k, \lambda_v$  maßgebend für die relative Wichtung der entsprechenden Gütekriterien  $\mu_k, \mu_v$ . Es gilt:

$$\begin{aligned} \frac{\lambda_k}{\lambda_v} \rightarrow 0 : & \quad \mu_k \text{ gegenüber } \mu_v \text{ stark gewichtet} \\ \frac{\lambda_v}{\lambda_k} = 1 : & \quad \mu_k, \mu_v \text{ gleich gewichtet} \\ \frac{\lambda_v}{\lambda_k} \rightarrow 0 : & \quad \mu_v \text{ gegenüber } \mu_k \text{ stark gewichtet} \end{aligned} \quad (2.2-19)$$

(vgl. Abb. 2.2-7). Da also nur jeweils die Verhältnisse der Wichtungsparameter maßgeblich sind, können im Spezialfall von zwei Gütekriterien die Wichtungsparameter  $\lambda_1, \lambda_2$  durch einen einzigen Parameter  $\lambda$  ausgedrückt werden. Eine sinnvolle, d.h. mit den Ausdrücken in (2.2-19) konsistente Definition von  $\lambda_1$  und  $\lambda_2$  ist gegeben durch

$$\lambda_1 \equiv \lambda, \quad \lambda_2 \equiv 1 - \lambda, \quad 0 < \lambda < 1 \quad (2.2-20)$$

Daraus ergeben sich folgende Wichtungen der Gütekriterien  $\mu_1$  und  $\mu_2$ :

$$\begin{aligned} \lambda \rightarrow 0 : \quad \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \rightarrow 0 & \quad \mu_1 \text{ stark gegen } \mu_2 \text{ gewichtet} \\ \lambda = 0.5 : \quad \frac{\lambda_1}{\lambda_2} = 1 & \quad \mu_1, \mu_2 \text{ gleich gewichtet} \\ \lambda \rightarrow 1 : \quad \frac{\lambda_2}{\lambda_1} \rightarrow 0 & \quad \mu_2 \text{ stark gegen } \mu_1 \text{ gewichtet} \end{aligned} \quad (2.2-21)$$

Der Parameter  $\lambda$  und somit die Wichtung der Gütekriterien  $\mu_1, \mu_2$  kann in der praktischen Anwendung durch ein einziges Bedienelement wie beispielsweise einen Schieber realisiert werden (Abb. 2.2-11). Dies hat für den Nutzer den Vorteil, daß eine intuitive Bedienung möglich ist. In dem Ansatz (2.2-20) sind für  $\lambda$  die Werte Null und Eins auszuschließen, da daraus  $\lambda_1=0$  bzw.  $\lambda_2=0$  folgt. Die Werte  $\lambda_i = 0$  sind wegen  $\mu_D = 0$  in der praktischen Realisierung jedoch nicht sinnvoll (vgl. 2.2.3.3).

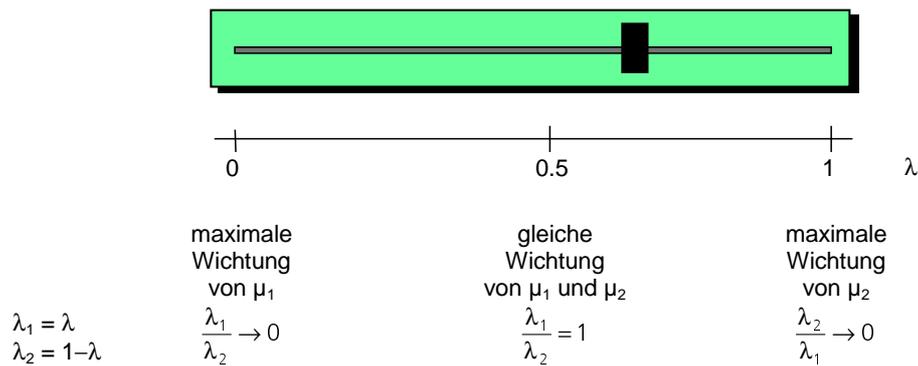


Abb. 2.2-11: Zur Wichtung der Gütekriterien  $\mu_1, \mu_2$  über einen Parameter  $\lambda$

## 2.2.4 Mehrstufige Entscheidungen

Zeitdiskrete Regelungsvorgänge können als mehrstufige Entscheidungsprozesse interpretiert werden. So besteht das Problem der optimalen Regelung darin, einen Zustand  $\mathbf{x}_0$  unter Minimierung eines Gütekriteriums  $J$  und der Einhaltung von Restriktionen in den Zustand  $\mathbf{x}_N$  zu überführen [Ath66, Föl88]. Ziel ist es, eine optimale Stellstrategie  $(\mathbf{u}_0^*, \mathbf{u}_1^*, \dots, \mathbf{u}_{N-1}^*)$  bezüglich  $J$  zu bestimmen:

$$\min_{\mathbf{u}_0, \mathbf{u}_1, \dots, \mathbf{u}_{N-1}} J(\mathbf{x}_0, \mathbf{x}_1, \dots, \mathbf{x}_N; \mathbf{u}_0, \mathbf{u}_1, \dots, \mathbf{u}_{N-1}). \quad (2.2-22)$$

Dieses Problem kann z. B. durch die Methode der dynamischen Programmierung gelöst werden [Bel57, Föl88].

Eine ähnliche Problemstellung kann im Falle von unscharfen Zielen und Restriktionen betrachtet werden [Bel70]. Es sei beispielsweise die Fuzzy-Restriktion  $\mu_C$  in Abhängigkeit der Stellgröße  $u$  gegeben, während das Fuzzy-Ziel  $\mu_G$  in Abhängigkeit der Zustandsgröße  $x$  im Endzustand  $N$  definiert sei.

$$\mu_C = \mu_C(u_k), \quad \mu_G = \mu_G(x_N) \quad (2.2-23)$$

Das Verhalten der Strecke werde beschrieben durch die Gleichung

$$\mathbf{x}_{k+1} = f(\mathbf{x}_k, \mathbf{u}_k), \quad k = 0, 1, \dots, N-1. \quad (2.2-24)$$

Die Fuzzy-Entscheidung  $\mu_D$  werde definiert als UND-Verknüpfung von  $\mu_C(u_k)$  ( $k=0, 1, \dots, N-1$ ) sowie dem Fuzzy-Ziel  $\mu_G(x_N)$  im Endzustand  $N$ :

$$\mu_D(\mathbf{u}_0, \mathbf{u}_1, \dots, \mathbf{u}_{N-1}) = \mu_C(\mathbf{u}_0) \wedge \mu_C(\mathbf{u}_1) \wedge \dots \wedge \mu_C(\mathbf{u}_N) \wedge \mu_G(x_N) \quad (2.2-25)$$

Der Endzustand  $x_N$  ergibt sich aus dem Startzustand  $x_0$  und der Anwendung der Stellstrategie  $(u_0, u_1, \dots, u_{N-1})$ . Ziel ist es, die Fuzzy-Entscheidung  $\mu_D$  zu maximieren. Zur Berechnung der optimalen Entscheidung  $\mu_D^*$  und der optimalen Stellstrategie  $(u_0^*, u_1^*, \dots, u_{N-1}^*)$  ist also  $\mu_D$  bezüglich  $u_0, u_1, \dots, u_{N-1}$  zu maximieren:

$$\mu_D^*(u_0^*, u_1^*, \dots, u_{N-1}^*) = \max_{u_0, u_1, \dots, u_{N-1}} \mu_D(u_0, u_1, \dots, u_{N-1}) \quad (2.2-26)$$

Die Lösung von Gleichung (2.2-26) kann wie das Problem (2.2-22) beispielsweise durch die Methode der dynamischen Programmierung iterativ gelöst werden [Bel70, Kac97]. Ein grundsätzliches Problem der dynamischen Programmierung besteht im großen Bedarf an Rechenkapazität und Speicherplatz [Bel57, Föl88]. Da das in dieser Arbeit zu entwickelnde Konzept jedoch auch auf weniger leistungsstarken Plattformen wie Microcontrollern oder Feldbusknoten realisierbar sein soll, wird in Abschnitt 3.2 ein einfacher prädiktiver Ansatz entwickelt, über den ebenfalls ein bestimmter Zeithorizont in der Optimierung berücksichtigt wird.

## 2.3 Physikalisches Klimamodell eines Raumes

Im folgenden werden die wichtigsten Elemente zur Beschreibung der physikalischen Raumklimagrößen vorgestellt. Dabei werden relativ einfache Modellbeziehungen verwendet, die jedoch für die Zwecke dieser Arbeit ausreichen, da sie die grundlegenden physikalischen Phänomene berücksichtigen. Eine ausführlichere Darstellung von Ansätzen zur Raumklima-modellierung findet sich beispielsweise in [Glü97, Wer95, Fei94, Hanel94, Pro65].

Betrachtet wird ein einzelner Raum, dessen Umfassungskonstruktion aus Wänden und Fenstern besteht (Abb. 2.3-1). Die Raumluft wird als ideal durchmischt angenommen, so daß Wärme- und Stoffbilanzgleichungen global für den ganzen Raum angesetzt werden können. Die Nomenklatur wird entsprechend regelungstechnischer Konventionen gewählt, so daß im folgenden Unterabschnitt 2.3.1 zunächst Zustands-, Stör- und Stellgrößen eingeführt werden. In den darauf folgenden Unterabschnitten werden physikalische Grundlagen (s. 2.3.2) sowie Modellgleichungen zur Lüftung und der Wand diskutiert (s. 2.3.3, 2.3.4).

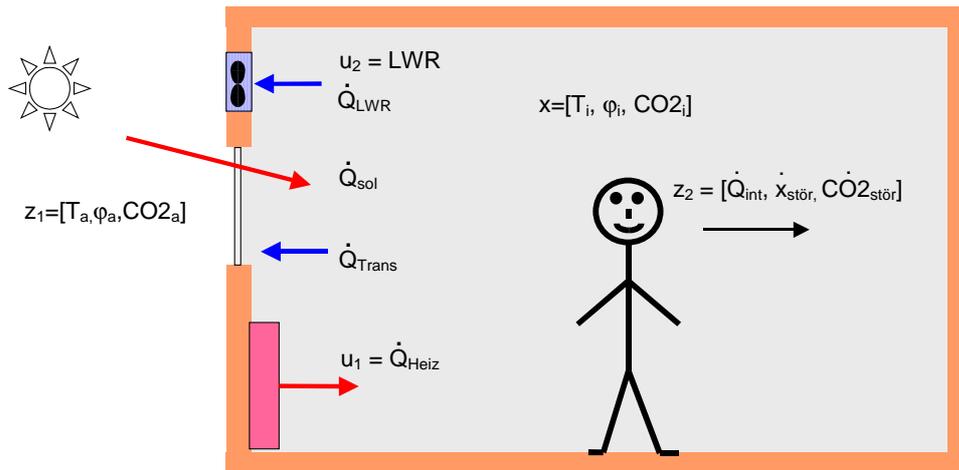


Abb. 2.3-1: Wesentliche physikalische Größen des Raummodells

## 2.3.1 Zustands-, Stör- und Stellgrößen

### 2.3.1.1 Zustandsgrößen

Der Zustand des Raumklimas wird beschrieben durch die Größen Lufttemperatur  $T_i$ , relative Feuchte  $\varphi_i$ , Helligkeit  $H_i$ , Luftdruck  $p_i$  und  $\text{CO}_2$ -Gehalt  $\text{CO}_{2i}$ .  $\text{CO}_{2i}$  wird als Referenzgas für die Luftqualität betrachtet, wie in Abschnitt 2.4 näher ausgeführt wird. Der  $\text{CO}_2$ -Gehalt der Außenluft ( $\text{CO}_{2a}$ ) liegt bei 300 ppm, typische Werte in Innenräumen liegen bei 300 ... 2000 ppm. Die für die Komfort- und Ökonomiekriterien des Heizungs- und Lüftungsvorgangs wesentlichen, im weiteren verwendeten Größen sind  $T_i$ ,  $\varphi_i$  und  $\text{CO}_{2i}$ , so daß folgender Zustandsvektor  $\mathbf{x}$  definiert wird:

$$\mathbf{x} = [T_i, \varphi_i, \text{CO}_{2i}]. \quad (2.3-1)$$

Relevant für den Luftzustand ist ebenfalls der absolute Wassergehalt  $x_i$  der Luft, der jedoch durch  $T_i$  und  $\varphi_i$  festgelegt ist und daher keine unabhängige Zustandsgröße darstellt (vgl. Unterabschnitt 2.3.2).

### 2.3.1.2 Störgrößen

Störgrößen, die den Raumklimazustand  $\mathbf{x}$  beeinflussen, sind das Außenklima und interne Störquellen. Das Außenklima wird repräsentiert durch die Lufttemperatur  $T_a$ , relative Feuchte  $\varphi_a$ ,  $\text{CO}_2$ -Gehalt  $\text{CO}_{2a}$ , Helligkeit  $H_a$  und Luftdruck  $p_a$ , wobei  $H_a$  und  $p_a$  bei den Heizungs- und Lüftungsvorgängen keine große Rolle spielen und daher im Störgrößenvektor (2.3-2) nicht explizit berücksichtigt werden.

Störgrößen im Raum sind gegeben durch interne Wärmequellen  $\dot{Q}_{\text{int}}$ , Wasserdampfquellen  $\dot{x}_{\text{stör}}$  und Luftverunreinigungen, repräsentiert durch  $\text{CO}_2$ -Störquellen  $\text{C}\dot{\text{O}}_{2\text{stör}}$ . Während die Außenklimagrößen meßbar sind, sind die internen Störquellen nicht direkt meßbar. Die zwei Klassen von Störgrößen (meßbar und nicht meßbar) werden in den Störgrößenvektoren  $\mathbf{z}_1$  und  $\mathbf{z}_2$  zusammengefaßt:

$$\mathbf{z}_1 = [T_a, \varphi_a, \text{CO}_{2a}] \quad (2.3-2)$$

$$\mathbf{z}_2 = [\dot{Q}_{\text{int}}, \dot{x}_{\text{stör}}, \text{C}\dot{\text{O}}_{2\text{stör}}] \quad (2.3-3)$$

$\dot{Q}_{\text{int}}$  setzt sich aus der Wärmeabgabe von elektrischen Geräten im Haushalt sowie der Wärmeabgabe des Menschen zusammen. Diese liegt typischerweise zwischen 70 und 100 Watt [Reck95]. Die vom Mensch verursachte Wasserdampfabgabe  $\text{H}_2\text{O}_{\text{prod}}$  liegt je nach Aktivität zwischen 35 und 65 Gramm  $\text{H}_2\text{O}$  pro Stunde [Reck95]. Um  $\text{H}_2\text{O}_{\text{prod}}$  auf die hier betrachtete Störgröße  $\dot{x}_{\text{stör}}$  umzurechnen, muß durch die Masse der trockenen Luft im Raum dividiert werden. Die  $\text{CO}_2$ -Produktion des Menschen ( $\text{C}\dot{\text{O}}_{2\text{prod}}$ ) beträgt 10 bis 30 Liter pro Stunde [Reck95]. Da der  $\text{CO}_2$ -Gehalt als Volumenanteil definiert ist, erfolgt die Umrechnung auf  $\text{C}\dot{\text{O}}_{2\text{stör}}$  durch Division des Raumvolumens  $V_{\text{Raum}}$ .

Zahlenbeispiele:  $\text{H}_2\text{O}_{\text{prod}} = 60 \text{ g/h}$ ,  $V_{\text{Raum}} = 50 \text{ m}^3$ ,  $\rho_{\text{Luft}} = 1.2 \text{ kg/m}^3 \Rightarrow \dot{x}_{\text{stör}} = \text{H}_2\text{O}_{\text{prod}} / \rho_{\text{Luft}} / V_{\text{Raum}} = 1 \text{ g/kg/h}$

$$\text{C}\dot{\text{O}}_{2\text{prod}} = 25 \text{ Liter/h}, V_{\text{Raum}} = 50 \text{ m}^3 \Rightarrow \text{C}\dot{\text{O}}_{2\text{stör}} = \text{C}\dot{\text{O}}_{2\text{prod}} / V_{\text{Raum}} = 500 \text{ ppm/h}$$

### 2.3.1.3 Stellgrößen

Die zwei wesentlichen, das Raumklima beeinflussenden Stellgrößen sind die Heizleistung  $\dot{Q}_{\text{Heiz}}$ , die vom Heizkörper im Raum aufgebracht wird, und die Luftwechselrate LWR, die den Luftaustausch pro Zeiteinheit repräsentiert und definiert ist über

$$\text{LWR} = \frac{\dot{V}}{V_{\text{Raum}}} \quad \left[ \frac{1}{\text{h}} \right] \quad (2.3-4)$$

[Hanel94]. Dabei gibt  $\dot{V}$  den Lüftungsvolumenstrom in  $[\text{m}^3/\text{h}]$  und  $V_{\text{Raum}}$  das Raumvolumen in  $[\text{m}^3]$  an. Es wird angenommen, daß LWR über einen Ventilator oder über Schwenkfenster einstellbar ist. Es wird somit folgender Stellgrößenvektor  $\mathbf{u}$  definiert:

$$\mathbf{u} = [\dot{Q}_{\text{Heiz}}, \text{LWR}] \quad (2.3-5)$$

Im Sommerfall steht die Heizung nicht als Aktorik zur Verfügung, so daß dann LWR die alleinige Stellgröße darstellt.

## 2.3.2 Physikalische Grundlagen

### 2.3.2.1 Absoluter Wassergehalt und relative Feuchte

Eng verknüpft mit der relativen Feuchte ist der absolute Wassergehalt  $x$  der Luft, welcher definiert ist als das Verhältnis vom in der Luft enthaltenen Wasserdampf zur Masse der trockenen Luft [Stö94]:

$$x = \frac{\text{Masse Wasserdampf}}{\text{Masse trockene Luft}} \left[ \frac{\text{g}}{\text{kg}} \right]. \quad (2.3-6)$$

Typische Werte von  $x$  liegen bei 10 g/kg.  $x$  ist in Abhängigkeit der Temperatur  $T$  der Luft begrenzt auf einen maximalen Wert  $x_{\max}(T)$ , der etwa exponentiell mit der Temperatur steigt (vgl. Abb. 2.3-2). Wird mehr Wasserdampf in die Luft eingebracht ( $x > x_{\max}$ ), so bildet sich Niederschlag.

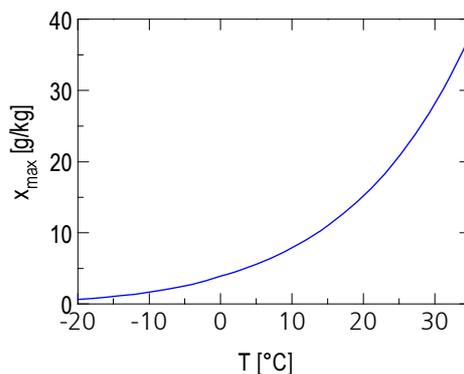


Abb. 2.3-2: Temperaturabhängigkeit des maximalen Wassergehaltes der Luft [Stö94]

Die relative Feuchte  $\varphi$  ist definiert als das Verhältnis des Wassergehaltes  $x$  der Luft zum Sättigungswert  $x_{\max}$  [Stö94]:

$$\varphi(x, T) = \frac{x}{x_{\max}(T)} \quad (2.3-7)$$

Da  $x_{\max}$  temperaturabhängig ist, ist  $\varphi$  insgesamt eine Funktion von  $x$  und  $T$ . Die nichtlineare Abhängigkeit  $\varphi(x, T)$  wird in der Klimatechnik üblicherweise im sogenannten Tx-Diagramm (Mollier-Diagramm) aufgetragen (Abb. 2.3-3). Darin ist abzulesen, daß  $\varphi$  bei konstanter Temperatur mit  $x$  steigt und bei konstantem  $x$  mit steigender Temperatur absinkt. Im Gebiet jenseits der Kurve mit  $\varphi = 100\%$  (Taupunktlinie) fällt Niederschlag aus.

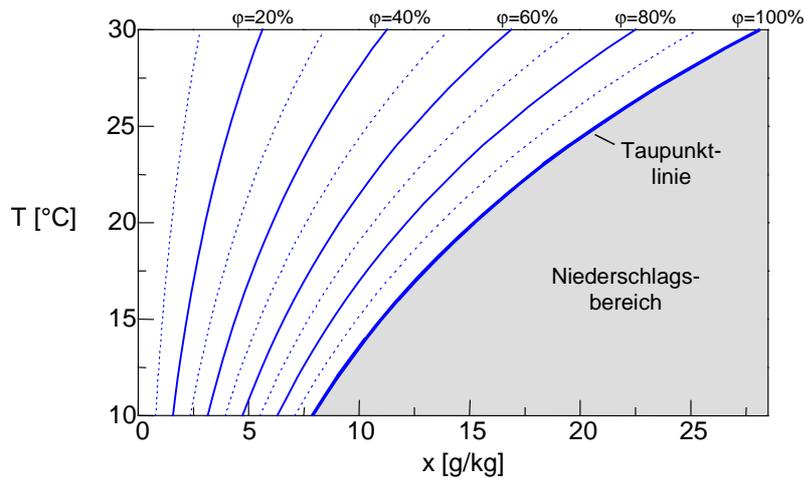


Abb. 2.3-3: Tx-Diagramm der Luft [Reck95]

### 2.3.2.2 Energiebilanz und Temperaturänderung

Der in den Raum einfließende Wärmestrom ergibt sich aus der Bilanz der ein- und ausströmenden Energie:

$$\dot{Q} = (\dot{Q}_{\text{Heiz}} + \dot{Q}_{\text{sol}} + \dot{Q}_{\text{int}}) - (\dot{Q}_{\text{Lüft}} + \dot{Q}_{\text{Trans}}) \quad (2.3-8)$$

Lüftungs- und Transmissionswärmeströme ( $\dot{Q}_{\text{Lüft}}, \dot{Q}_{\text{Trans}}$ ) werden aus dem Raum ausströmend betrachtet (vgl. Abb. 2.3-1). Sie können in bestimmten Fällen, z. B. im Sommer, auch in den Raum gerichtet sein und haben dann ein negatives Vorzeichen.

Der durch Sonneneinstrahlung bedingte Wärmeeintrag  $\dot{Q}_{\text{sol}}$  ist stark von der Tages- und Jahreszeit, der Ausrichtung, Größe und Beschaffenheit der Fensterfläche sowie dem Trübungsgrad der Luft abhängig [Reck95]. Typische Strahlungsintensitäten liegen bei 100 ... 500 W/m<sup>2</sup>. In Gleichung (2.3-8) wurde vernachlässigt, daß  $\dot{Q}_{\text{sol}}$  größtenteils nicht direkt zur Erwärmung der Luft beiträgt, sondern indirekt über die Erwärmung von bestrahlten Gegenständen und Wänden. Dabei wird der UV-Anteils des Lichts in Infrarotstrahlung umgewandelt.

Der in den Raum eingehende Wärmestrom  $\dot{Q}$  führt zu einer Temperaturänderung  $\dot{T}_i$ :

$$\dot{Q} = \rho_L V_{\text{Raum}} c_L \dot{T}_i \quad (2.3-9)$$

Dabei stellt  $\rho_L = 1.2 \text{ kg/m}^3$  die Dichte,  $c_L = 1000 \text{ J/kg/K}$  die spezifische Wärmekapazität der trockenen Luft sowie  $V_{\text{Raum}}$  das Raumvolumen der trockenen Luft dar [Stö94].

### 2.3.3 Lüftungsmodell

Bei der Lüftung von Räumen spielen sich sehr komplexe thermodynamische Vorgänge ab, auf die hier nur soweit eingegangen wird, wie es für die Entwicklung der Fuzzy-Leitkomponente erforderlich ist. Eine umfassendere und tiefere Darstellung wird beispielsweise in [Hanel94, Now96] vermittelt.

#### 2.3.3.1 Lüftungseffektivität

Es wird grundsätzlich unterschieden zwischen folgenden Lüftungsformen [Hanel94]:

- **Lüftung nach dem Mischkammerprinzip:** Die Zuluft und Raumluft vermischen sich ideal.
- **Verdrängungslüftung:** Die Raumluft wird kolbenartig von der Zuluft verdrängt.
- **Freie Lüftung:** Der Raum wird aufgrund von Druckunterschieden, die sich zwischen dem Raum und der Atmosphäre einstellen, durchströmt. Das Strömungsbild ist daher stark vom Winddruck und der Temperaturverteilung im Raum abhängig.

Dies sind idealisierte Grenzfälle, die in der Praxis ineinander übergehen. Die hier betrachtete Lüftung von Wohn- und Büroräumen erfolgt überwiegend nach dem Mischkammerprinzip [Hanel94].

Durch Einführung der Lüftungseffektivität  $\varepsilon_L$  über

$$\varepsilon_L = \frac{c_{ab} - c_{zu}}{c_{Raum} - c_{zu}} \quad (2.3-10)$$

kann die Effektivität des Abtransportes von Verunreinigungen klassifiziert werden [DIN1946]. Dabei wird die Konzentration eines bestimmten Referenzgases, wie z. B.  $\text{CO}_2$ , betrachtet. In der Definitionsgleichung (2.3-10) bezeichnen  $c_{ab}$  die Abluftkonzentration,  $c_{zu}$  die Zuluftkonzentration und  $c_{Raum}$  die mittlere Raumluftkonzentration des Referenzgases. In Gleichung (2.3-10) wird der Tatsache Rechnung getragen, daß die Abluftkonzentration  $c_{ab}$  i. a. nicht identisch ist mit der mittleren Raumkonzentration  $c_{Raum}$ , wie dies im Mischkammermodell angenommen wird. Für reine Mischströmung gilt  $c_{ab} = c_{Raum}$  und damit  $\varepsilon_L = 1$ , für reine Verdrängungsströmung ist  $c_{Raum} = c_{zu}$ , daraus folgt  $\varepsilon_L = \infty$ .

Durch den Lüftungsvorgang werden sowohl Energie als auch Stoffe ausgetauscht. Im folgenden werden Stoff- und Energiebilanzen, die sich bei der Lüftung vollziehen, näher betrachtet und die Differentialgleichungen (DGL) hergeleitet, die diese Austauschvorgänge im Mischkammermodell beschreiben.

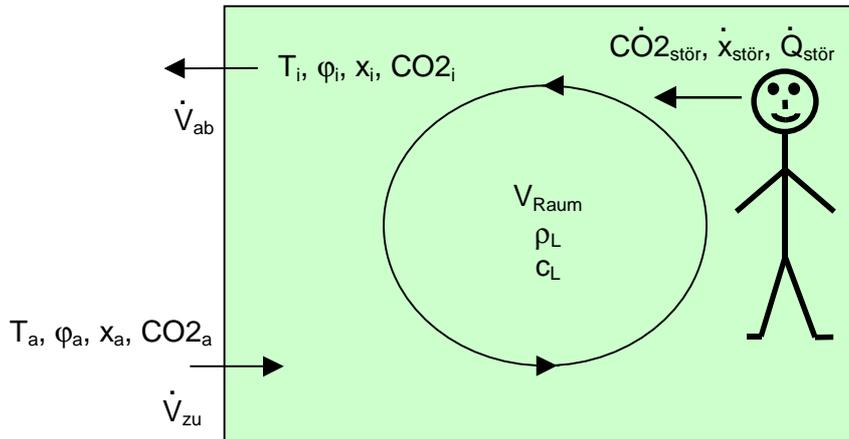


Abb. 2.3-4: Schematische Darstellung des Lüftungsvorgangs im Mischkammermodell

### 2.3.3.2 Energiebilanz 1: Lüftungswärmeverluste

In einem kleinen Zeitintervall  $dt$  wird das Luftvolumen  $dV_{ab}$  der Raumlufte gegen das gleiche Volumen der Außenluft  $dV_{zu}$  ersetzt, vgl. Abb. 2.3-4. Es gilt also

$$dV_{zu} = dV_{ab} \equiv dV. \quad (2.3-11)$$

Durch den Luftaustausch des Luftvolumens  $dV$  wird im Zeitintervall  $dt$  die Energie  $dQ_{zu}$  der Raumlufte zugeführt und  $dQ_{ab}$  abgeführt:

$$\begin{aligned} dQ_{ab} &= \rho_L c_L dVT_i \\ dQ_{zu} &= \rho_L c_L dVT_a \end{aligned} \quad (2.3-12)$$

Die Nettoverluste  $dQ_{Lüft}$  ergeben sich aus der Differenz  $dQ_{ab} - dQ_{zu}$ :

$$dQ_{Lüft} = dQ_{ab} - dQ_{zu} = \rho_L c_L dV(T_i - T_a) \quad (2.3-13)$$

Durch Bildung des Differentialquotienten und Einsetzen von  $\dot{V} = LWR \cdot V_{Raum}$  in Gleichung (2.3-13) folgt die DGL, die die Lüftungswärmeverluste  $\dot{Q}_{Lüft}$  im Modell der Mischkammer beschreibt:

$$\dot{Q}_{Lüft} = \rho_L c_L V_{Raum} LWR (T_i - T_a). \quad (2.3-14)$$

Die Lüftungsverluste sind also proportional zu LWR und der Temperaturdifferenz der Innen- und Außenluft  $(T_i - T_a)$ .

### 2.3.3.3 Energiebilanz 2: Innentemperatur durch Lüftung (Sommerfall)

Im Sommerfall wird keine Heizleistung aufgewendet ( $\dot{Q}_{\text{Heiz}} = 0$ ), so daß sich die in den Raum einfließende Energie  $\dot{Q}$  berechnet zu

$$\dot{Q} = (\dot{Q}_{\text{sol}} + \dot{Q}_{\text{int}}) - (\dot{Q}_{\text{Lüft}} + \dot{Q}_{\text{Trans}}) \quad (2.3-15)$$

(vgl. Gleichung (2.3-8)). Die Zusammenfassung der nicht direkt meßbaren Größen  $\dot{Q}_{\text{sol}}, \dot{Q}_{\text{int}}, \dot{Q}_{\text{Trans}}$  zu  $\dot{Q}_{\text{stör}}$  über

$$\dot{Q}_{\text{stör}} \equiv \dot{Q}_{\text{sol}} + \dot{Q}_{\text{int}} - \dot{Q}_{\text{Trans}} \quad (2.3-16)$$

ergibt den Ausdruck

$$\dot{Q} = -\dot{Q}_{\text{Lüft}} + \dot{Q}_{\text{stör}} \quad (2.3-17)$$

Gleichsetzen von Gleichung (2.3-17) mit

$$\dot{Q} = \rho_L V_{\text{Raum}} c_L \dot{T}_i, \quad (2.3-9)$$

und Ersetzen von  $\dot{Q}_{\text{Lüft}}$  durch Ausdruck (2.3-14) ergibt folgenden Ausdruck:

$$\rho_L V_{\text{Raum}} c_L \dot{T}_i = -\rho_L c_L V_{\text{Raum}} LWR (T_i - T_a) + \dot{Q}_{\text{stör}} \quad (2.3-18)$$

Durch Einführung der Hilfsgröße  $\dot{T}_{\text{stör}}$  über

$$\dot{T}_{\text{stör}} \equiv \frac{\dot{Q}_{\text{stör}}}{\rho_L c_L V_{\text{Raum}}} \quad (2.3-19)$$

wird Gleichung (2.3-18) in die schlichte Form (2.3-20) überführt.

$$\dot{T}_i = -LWR (T_i - T_a) + \dot{T}_{\text{stör}} \quad (2.3-20)$$

Die Temperaturänderung  $\dot{T}_i$  wird also zum einen von der Lüftung LWR beeinflußt, wobei der Beitrag je nach Vorzeichen von  $(T_i - T_a)$  positiv oder negativ ist, und zum anderen von zusätzlichen solaren und internen Wärmequellen sowie Transmissionsverlusten, die durch  $\dot{T}_{\text{stör}}$  repräsentiert werden.

### 2.3.3.4 Stoffbilanz 1: CO<sub>2</sub>-Gehalt

Durch den Austausch des Luftvolumens  $dV$  im Zeitintervall  $dt$  und der Anwesenheit einer CO<sub>2</sub>-Störquelle  $\dot{C}O_{2\text{stör}}$  im Raum werden die CO<sub>2</sub>-Volumina  $dCO_{2\text{ab}}$  und  $dCO_{2\text{zu}}$  ab- bzw. zugeführt (vgl. Abb. 2.3-4):

$$\begin{aligned} dCO_{2\text{ab}} &= CO_{2i} dV \\ dCO_{2\text{zu}} &= CO_{2a} dV + \dot{C}O_{2\text{stör}} V_{\text{Raum}} dt \end{aligned} \quad (2.3-21)$$

Die Änderung des CO<sub>2</sub>-Gehaltes im Raum ( $\dot{C}O_{2i}$ ) berechnet sich aus dem Differentialquotienten der zu- und abströmenden CO<sub>2</sub>-Volumina bezogen auf  $V_{\text{Raum}}$  (Gleichung (2.3-22)).

$$\dot{C}O_{2i} = \frac{dCO_{2\text{zu}} - dCO_{2\text{ab}}}{V_{\text{Raum}} dt} = (CO_{2a} - CO_{2i}) \frac{\dot{V}}{V_{\text{Raum}}} + \dot{C}O_{2\text{stör}} \quad (2.3-22)$$

Unter Verwendung der Definition der Luftwechselrate (2.3-4)  $LWR = \dot{V} / V_{\text{Raum}}$  folgt die einfach zu interpretierende, aber in CO<sub>2i</sub> und LWR bilineare DGL

$$\dot{C}O_{2i} = -LWR(CO_{2i} - CO_{2a}) + \dot{C}O_{2\text{stör}} \quad (2.3-23)$$

Aufgrund der Bilinearität der DGL (2.3-23) kann eine einfache analytische Lösung i. a. nur für  $LWR = \text{const.}$  und  $\dot{C}O_{2\text{stör}} = \text{const.}$  angegeben werden (Gleichung (2.3-24)).

$$\left. \begin{array}{l} LWR = \text{const.} \\ \dot{C}O_{2\text{stör}} = \text{const.} \end{array} \right\} CO_{2i}(t) = CO_{2a} + (CO_{2i}(0) - CO_{2a}) e^{-t/LWR} + \frac{\dot{C}O_{2\text{stör}}}{LWR} (1 - e^{-t/LWR}) \quad (2.3-24)$$

Die DGL zu CO<sub>2i</sub>, Gleichung (2.3-23), ist formal identisch mit der DGL zu T<sub>i</sub>, Gleichung (2.3-20). Sie wird in der Lüftungstechnik zur Berechnung der erforderlichen LWR zur Einhaltung der Maximalen Arbeitsplatzkonzentration (MAK) herangezogen, wobei dazu der stationäre Fall  $\dot{C}O_{2i} = 0$  betrachtet wird [DIN1946, Reck95]. Es ergibt sich für das hier betrachtete Beispiel des CO<sub>2</sub>-Gehaltes folgende Berechnungsformel:

$$LWR_{\infty} = \frac{\dot{C}O_{2\text{stör}}}{CO_{2i,\infty} - CO_{2a}} \quad (2.3-25)$$

Zahlenbeispiel:  $\dot{C}O_{2\text{stör}} = 200 \text{ ppm/h}$ ,  $CO_{2i,\infty} = 1000 \text{ ppm}$ ,  $CO_{2a} = 300 \text{ ppm} \Rightarrow LWR_{\infty} \approx 0.3/\text{h}$

### 2.3.3.5 Stoffbilanz 2: Absoluter Wassergehalt und relative Feuchte

Vollkommen analog zur CO<sub>2</sub>-Bilanz, Gleichung (2.3-23), gilt eine Bilanzgleichung bezüglich des absoluten Wassergehaltes  $x_i$ :

$$\dot{x}_i = -LWR(x_i - x_a) + \dot{x}_{\text{stör}} \quad (2.3-26)$$

In der Regel werden jedoch nicht  $x_i$  und  $x_a$  sondern die relative Feuchte innen und außen ( $\varphi_i$ ,  $\varphi_a$ ) gemessen. Daher wird  $x_i$ ,  $x_a$  unter Verwendung von  $\varphi = x/x_{\text{max}}$  (Gleichung (2.3-7)) ersetzt durch

$$\begin{aligned} x_i &= \varphi_i x_{\text{max}}(T_i) \\ x_a &= \varphi_a x_{\text{max}}(T_a) \end{aligned} \quad (2.3-27)$$

Aus den Gleichungen (2.3-26) und (2.3-27) folgt die DGL (2.3-28) für  $\varphi_i$ .

$$\dot{\varphi}_i = -LWR \left( \varphi_i - \underbrace{\varphi_a \frac{x_{\text{max}}(T_a)}{x_{\text{max}}(T_i)}}_{\tilde{\varphi}_a} \right) + \underbrace{\frac{\dot{x}_{\text{stör}} - \varphi_i \frac{dx_{\text{max}}}{dT_i} \dot{T}_i}{x_{\text{max}}(T_i)}}_{\dot{\varphi}_{\text{stör}}} \quad (2.3-28)$$

Es werden die Abkürzungen  $\tilde{\varphi}_a$  und  $\dot{\varphi}_{\text{stör}}$  eingeführt:

$$\tilde{\varphi}_a \equiv \varphi_a \frac{x_{\text{max}}(T_a)}{x_{\text{max}}(T_i)} \quad (2.3-29)$$

$$\dot{\varphi}_{\text{stör}} \equiv \frac{\dot{x}_{\text{stör}} - \varphi_i \frac{dx_{\text{max}}}{dT_i} \dot{T}_i}{x_{\text{max}}(T_i)} \quad (2.3-30)$$

In  $\tilde{\varphi}_a$  kommt der physikalische Effekt zum Ausdruck, daß die in den Raum eingebrachte Außenluft durch Erwärmen bzw. Abkühlen von  $T_a$  auf  $T_i$  eine niedrigere bzw. höhere relative Feuchte erhält. Für  $T_a < T_i$  ergibt sich  $x_{\text{max}}(T_a) < x_{\text{max}}(T_i)$  (vgl. Abb. 2.3-2) und somit  $\tilde{\varphi}_a < \varphi_a$ , für  $T_a > T_i$  folgt  $\tilde{\varphi}_a > \varphi_a$ . So erklärt sich der Effekt, daß im Winter das Einbringen kalter Luft in den Raum zu trockener Luft führt, während im Sommer sehr warme Außenluft eine Erhöhung von  $\varphi_i$  nach sich zieht. Der Term  $\dot{\varphi}_{\text{stör}}$  (Gleichung (2.3-30)) hängt neben den Wasserdampfstörungen  $\dot{x}_{\text{stör}}$  von  $T_i$  und dessen Änderung  $\dot{T}_i$  ab.

Mit den Abkürzungen  $\tilde{\varphi}_a$  und  $\dot{\varphi}_{\text{stör}}$  wird Gleichung (2.3-28) auf die schlichte Form

$$\dot{\varphi}_i = -LWR(\varphi_i - \tilde{\varphi}_a) + \dot{\varphi}_{\text{stör}} \quad (2.3-31)$$

gebracht. Diese Gleichung ist formal identisch mit der DGL zu  $T_i$ , CO<sub>2</sub><sub>i</sub> und  $x_i$  (vgl. Gleichungen (2.3-20), (2.3-23) und (2.3-26)).

### 2.3.4 Modell der Wand

Da die Eigenschaften der Wände eines Raumes, insbesondere der Außenwände, einen großen Einfluß auf das Verhalten des Raumklimas, das Behaglichkeitsempfinden und den Heizenergieverbrauch haben, sind sie sowohl im Simulationsmodell, das in Anhang B beschrieben wird, als auch in der zu entwickelnden Leitkomponente adäquat zu berücksichtigen. In den folgenden Unterabschnitten 2.3.4.1, 2.3.4.2 wird zunächst das statische Verhalten der Wärmeströme und Temperaturen, in Unterabschnitt 2.3.4.3 auch deren dynamisches Verhalten diskutiert.

#### 2.3.4.1 Stationäres Wandmodell

Ein einfaches Modell der Wand besteht darin, diese als Schichtenaufbau zu interpretieren und den Wärmestrom nur eindimensional zu betrachten ([Fei94], vgl. Abb. 2.3-5). Physikalisches Grundgesetz zur Wärmeleitung ist die Fouriersche Gleichung [Stö94],

$$\dot{\mathbf{q}} = -\lambda \vec{\nabla} T(\vec{x}) \quad [\text{W/m}^2], \quad (2.3-32)$$

wobei  $\lambda$  die Wärmeleitfähigkeit des Materials in [W/K/m] bezeichnet. Gleichung (2.3-32) geht im eindimensionalen Fall über in

$$\dot{q} = -\lambda \frac{dT(x)}{dx} \quad (2.3-33)$$

und kann bei stationärer Betrachtungsweise entsprechend örtlich diskretisiert werden:

$$\dot{q} = -\frac{\lambda}{\Delta x} \Delta T \quad (2.3-34)$$

In Gleichung (2.3-34) bezeichnen  $\Delta x$  die Dicke der betrachteten Schicht und  $\Delta T$  die Temperaturänderung innerhalb  $\Delta x$ . An den Wandoberflächen tritt ein konvektiver Wärmeübergang durch Luftbewegung auf. Der konvektive Wärmestrom pro Fläche berechnet sich über

$$\dot{q}_{\text{konv}} = \alpha(T_{\text{Wand}} - T_{\text{Luft}}) \quad (2.3-35)$$

[Stö94]. Der Wärmeübergangskoeffizient  $\alpha$  liegt für leichte Luftbewegung bei  $5 \text{ W/m}^2/\text{K}$  [Stö94]. Im stationären Fall sind die Wärmeströme durch Wärmeleitung, Gleichung (2.3-34) und Konvektion, Gleichung (2.3-35) identisch. Diese Gleichungen können dann in Analogie zum Ohmschen Gesetz  $U = R \cdot I$  interpretiert werden, wobei  $U$  der Temperaturdifferenz,  $I$  dem Wärmestrom und  $R$  dem Term  $(\Delta x/\lambda)$  bzw. dem reziproken Wärmeübergangskoeffizienten  $1/\alpha$  entspricht. Das Ersatzschaltbild ist in Abb. 2.3-5 dargestellt.

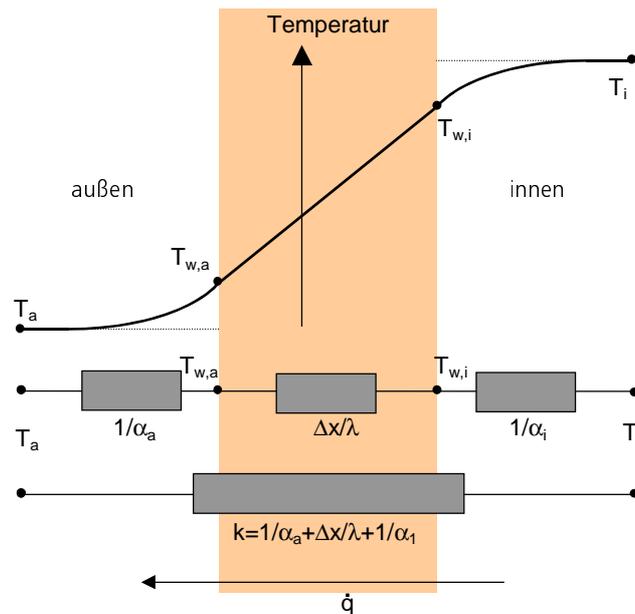


Abb. 2.3-5: Temperaturprofil und Ersatzschaltbild einer einschichtigen Wand im stationären Fall

Somit berechnet sich der Wärmestrom für eine einschichtige Wand über

$$\dot{q} = \frac{1}{\underbrace{1/\alpha_a + \Delta x/\lambda + 1/\alpha_i}_k} \cdot (T_i - T_a) \quad (2.3-36)$$

Der Wärmedurchgangskoeffizient  $k$  der Außenwand ( $k$ -Wert)

$$k \equiv \frac{1}{1/\alpha_a + \Delta x/\lambda + 1/\alpha_i} \quad [\text{W}/\text{m}^2/\text{K}] \quad (2.3-37)$$

ist Grundlage zur Berechnung des Heizwärmebedarfs. Die Wärmeschutzverordnung 1995 schreibt für Außenwände von Neubauten  $k < 0.5 \text{ W}/\text{m}^2/\text{K}$  vor [Ehm95]. In Tabelle 2.3-1 sind die  $k$ -Werte einiger typischer Wandaufbauten angegeben.

Baustoff	$k$ [ $\text{W}/\text{m}^2/\text{K}$ ]
Vollziegel (30 cm)	1.8
Gasbeton	ca. 1.0
Niedrigenergiehaus	ca. 0.2
Passivenergiehaus	ca. 0.1

Tabelle 2.3-1:  $k$ -Werte verschiedener Wandaufbauten [Stö94, Erh94]

Multiplikation von Gleichung (2.3-36) mit der Wandfläche  $A$  führt zur Berechnung des stationären Wärmestroms  $\dot{Q}_{\text{Trans}}$  durch die Wand (Transmissionswärmeverluste):

$$\dot{Q}_{\text{Trans}} = kA(T_i - T_a). \quad (2.3-38)$$

#### 2.3.4.2 Temperatur der Außenwand

Sowohl unter Behaglichkeits- wie unter bauphysikalischen Gesichtspunkten ist die Temperatur der zum Raum gerichteten Seite der Außenwand von Interesse. Bei kalten Wandflächen geht Strahlungswärme vom Menschen auf die Wand über, die der Mensch ähnlich wie Luftzugerscheinungen als unangenehm empfindet (vgl. Abschnitt 2.4). Weiter besteht bei kalten Wänden die Gefahr der Niederschlagsbildung, was zu Schimmelbildung und Bauwerksschäden führen kann [Erh86].

Ein einfaches statisches Modell der Wandtemperatur  $T_{w,i}$  (vgl. Abb. 2.3-5) ergibt sich aus der stationären Betrachtung des Wärmestroms in die Wand durch Konvektion  $\dot{q}_{\text{konv}}$ , Gleichung (2.3-35) und des Wärmestroms durch die gesamte Wand  $\dot{q}$ , Gleichung (2.3-34). Gleichsetzen von  $\dot{q}_{\text{konv}}$  mit  $\dot{q}$  ergibt

$$\alpha_i(T_i - T_{w,i}) = k(T_i - T_a). \quad (2.3-39)$$

Daraus leitet sich  $T_{w,i}$  ab zu

$$T_{w,i} = T_i - \frac{k}{\alpha}(T_i - T_a). \quad (2.3-40)$$

Zahlenbeispiel:  $k = 1 \text{ W/m}^2/\text{K}$ ,  $\alpha = 5 \text{ W/m}^2/\text{K}$ ,  $T_a = -10 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $T_i = 20 \text{ }^\circ\text{C} \Rightarrow T_{w,i} = 14 \text{ }^\circ\text{C}$

#### 2.3.4.3 Dynamisches Wandmodell

Zur Modellierung des dynamischen Verhaltens des Wärmestromes muß die Speicherfähigkeit der Wand berücksichtigt werden. Dazu wird die Wand in  $N$  Schichten diskretisiert und für jede Schicht wird eine Bilanzgleichung erstellt (Gleichung (2.3-41)). Die Vorgehensweise wird in Abb. 2.3-6 verdeutlicht.

$$C_i \dot{T}_i = k_{i-1}(T_{i-1} - T_i) + k_{i+1}(T_{i+1} - T_i), \quad i = 1, \dots, N \quad (2.3-41)$$

Es bezeichnet  $C_i$  die Wärmekapazität pro Flächeneinheit, die sich über die Dichte  $\rho_i$ , die spezifische Wärmekapazität  $c_i$  und die Dicke  $\Delta x_i$  der  $i$ -ten Schicht berechnet zu

$$C_i \equiv c_i \rho_i \Delta x_i. \quad (2.3-42)$$

Die Koeffizienten  $k_i$  bezeichnen den Wärmedurchgangskoeffizienten der  $i$ -ten Schicht bzw. für  $i = 0$  und  $i = N+1$  den Wärmeübergangskoeffizienten  $\alpha_i, \alpha_a$ . Sie sind definiert über

$$\begin{aligned} k_i &\equiv \lambda_i / \Delta x_i \quad \text{für } i = 1, \dots, N \\ k_0 &\equiv \alpha_a \\ k_{N+1} &\equiv \alpha_i \end{aligned} \quad (2.3-43)$$

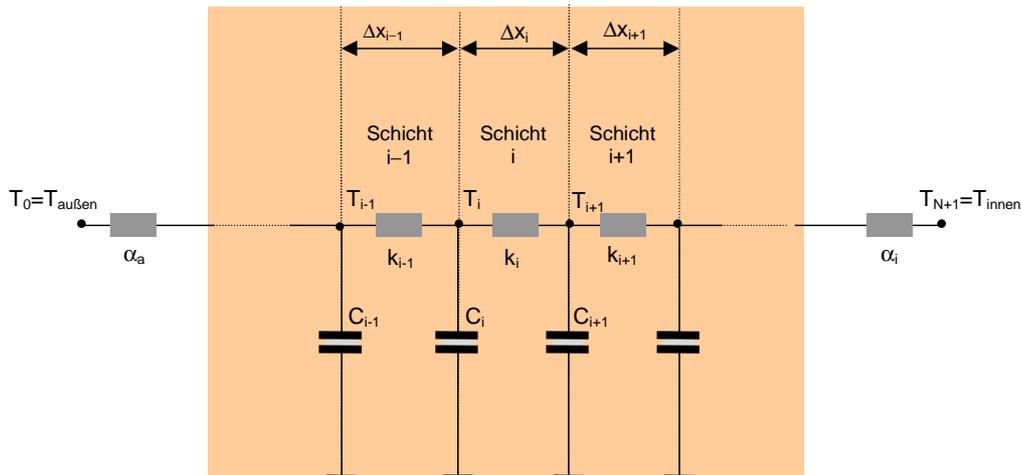


Abb. 2.3-6: Modellierung der Wand als RC-Netzwerk

Die Zusammenfassung der Temperaturen  $T_i$  der Wandschichten zum Vektor  $\mathbf{T} = [T_1, \dots, T_N]^T$  und der Temperaturen innen und außen zum Eingangsvektor  $\mathbf{u} = [T_{\text{außen}}, T_{\text{innen}}]^T$  überführt die  $N$  Gleichungen (2.3-41) in die lineare Matrixgleichung (2.3-44).

$$\dot{\mathbf{T}} = \mathbf{A}\mathbf{T} + \mathbf{B}\mathbf{u}, \quad \dim(\mathbf{A}) = (N, N), \quad \dim(\mathbf{B}) = (N, 2) \quad (2.3-44)$$

Die Elemente  $a_{i,j}$  der Matrix  $\mathbf{A}$  berechnen sich nach Gleichung (2.3-41) zu

$$a_{j,j-1} = \frac{k_{j-1}}{c_j} \quad (j = 2, \dots, N), \quad a_{j,j} = -\frac{k_{j-1} + k_j}{c_j} \quad (j = 1, \dots, N), \quad a_{j,j+1} = \frac{k_j}{c_j} \quad (j = 1, \dots, N-1) \quad (2.3-45)$$

Die zwei Elemente  $b_{1,1}$  und  $b_{2,N}$  der sonst leeren Matrix  $\mathbf{B}$  werden ermittelt über

$$b_{1,1} = \frac{\alpha_a}{c_1}, \quad b_{2,N} = \frac{\alpha_i}{c_N} \quad (2.3-46)$$

Wegen der Analogie zur Elektrizitätslehre wird dieses Modell als RC-Netzwerk oder auch als Beukenmodell bezeichnet [Fei94]. Das DGL-System (2.3-44) mit den Parametern (2.3-45), (2.3-46) wird im Simulationsmodell zur Modellierung der Innen- und Außenwände eingesetzt (vgl. Anhang B).

## 2.4 Thermische Behaglichkeit und Luftqualität

Das Behaglichkeitsempfinden eines Menschen hängt von vielen Faktoren ab und ist individuell sehr verschieden. Behaglichkeit kann aus verschiedenen Perspektiven beurteilt werden. Es wird u.a. unterschieden zwischen [Reck95, Vol94]

- Thermischer Behaglichkeit
- Lufthygienischer Behaglichkeit
- Visueller Behaglichkeit
- Akustischer Behaglichkeit.

Neben dem Einfluß physikalischer Größen der Raumluft und der Umgebung spielen individuelle Faktoren des Menschen wie Alter, Konstitution, Gesundheit, Kleidung, Art der Tätigkeit usw. eine Rolle [Reck95]. In dieser Arbeit erscheinen Thermische und Lufthygienische Behaglichkeit von besonderer Bedeutung, da sie über die zur Verfügung stehenden Heizungs- und Lüftungsregelkreise einstellbar sind. Daher werden diese Bereiche im folgenden kurz beleuchtet. Eine umfassendere Darstellung von Behaglichkeitskriterien wird in [Reck95, May89, Now96, Bisch88, Schw81, Fra75] vermittelt.

### 2.4.1 Definition der Thermischen Behaglichkeit

Für den Begriff "Thermische Behaglichkeit" gibt es eine Vielzahl von Definitionen [Now96]. Weite Verbreitung hat die 1970 von der American Society of Heating, Refrigerating and Airconditioning Engineers (ASHRAE) gegebene Definition gefunden [Ash92]:

"Thermal Comfort is the state of mind that expresses satisfaction with the thermal environment".

Da Thermische Behaglichkeit physiologisch stark an den Wärmezufuß bzw. -abfluß des menschlichen Körpers gekoppelt ist, wird sie hauptsächlich von folgenden Faktoren beeinflusst [DIN1946]:

- Temperatur der Luft und der Umschließungsflächen
- Luftbewegung
- Luftfeuchte
- Körperliche Betätigung und Bekleidung

Diese Einflußgrößen werden im folgenden näher diskutiert. Die Definitionen und Aussagen stützen sich - soweit nicht anders angegeben - auf DIN 1946, Teil 2 (Raumlufttechnik) [DIN1946].

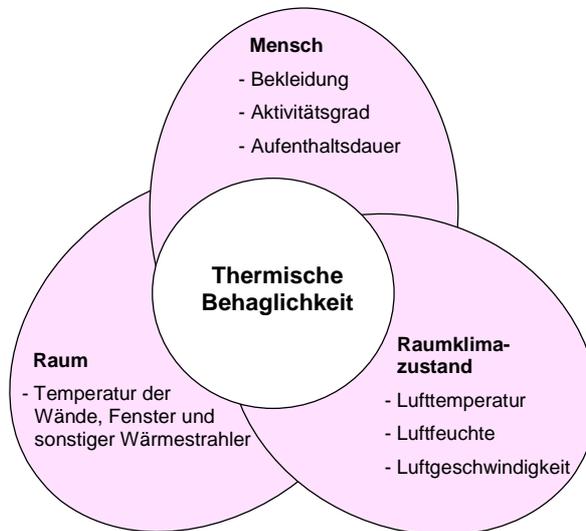


Abb. 2.4-1: Einflußgrößen für die Thermische Behaglichkeit [Vol94]

### Temperatur der Luft und der Umschließungsflächen

Wesentlich für den Menschen ist die empfundene (operative) Temperatur  $T_{op}$ , die neben der Lufttemperatur  $T_i$  von den Temperaturen der Umschließungsflächen, d.h. Wände und Fenster abhängt. Die Temperatur im Raum sollte in senkrechter wie in waagrechter Richtung möglichst gleichmäßig sein. Die Temperaturen der umgebenden Flächen eines Raumes einschließlich der Heizflächen sind wegen der Wärmestrahlung sehr wesentlich für die Entwärmung bzw. Aufwärmung des menschlichen Körpers und damit der Behaglichkeit [Reck95]. In [DIN1946] wird als charakteristische Größe die mittlere Strahlungstemperatur (Radiation Temperature)  $T_r$  definiert:

$$T_r = \frac{\sum_k A_k T_k}{\sum_k A_k} \quad (2.4-1)$$

Dabei bezeichnen  $A_k$  die Größe der k-ten Wandfläche und  $T_k$  deren mittlere Temperatur. Die empfundene Temperatur  $T_{op}$  berechnet sich für geringe Luftbewegung ( $< 0.2 \text{ m/s}$ ) als Mittelwert von Luft- und Strahlungstemperatur:

$$T_{op} = 0.5(T_i + T_r) \quad (2.4-2)$$

$T_{op}$  sollte im Normalfall zwischen 20 und 22 °C liegen, kann aber kurzzeitig bis 26 °C ansteigen.

## Luftbewegung

Bestimmte Luftbewegungen sind zur Erleichterung der Erwärmung des Menschen durch Konvektion und Verdunstung immer notwendig und im Interesse der Behaglichkeit erwünscht. Dabei sollte die Luftgeschwindigkeit im Mittel jedoch kleiner als etwa 0.2 m/s bleiben, um Zugfreiheit zu gewährleisten. Unter Zug versteht man eine starke örtliche Abkühlung des Körpers durch Luftbewegung oder Wärmeabstrahlung. Es werden solche unsymmetrischen thermischen Belastungen bereits ab etwa 20 W/m<sup>2</sup> deutlich wahrgenommen und ab 40 W/m<sup>2</sup> als unbehaglich empfunden [Reck95].

## Luftfeuchte

Da die Entwärmung des menschlichen Körpers zum Teil auch durch Verdunstung von der Haut erfolgt, hat auch die Luftfeuchte einen gewissen Einfluß auf die Behaglichkeit. Dieser Effekt ist jedoch bei Raumtemperaturen nur schwach ausgeprägt, so daß auch die Luftfeuchte nur einen geringen Einfluß hat. Bei steigender Temperatur und Feuchte wird der Wasserdampfgehalt der Luft zugleich mit dem Wärmegefühl erfaßt [Reck95]. Trotzdem nimmt man in der Klimatechnik 65 % als obere Grenze der relativen Feuchte an. Dies macht aus bauphysikalischen Gründen Sinn, da bei hoher Luftfeuchte an kalten Flächen Wasserausfall mit entsprechenden Langzeitschäden wie Schimmelbildung und Bauwerksschädigung auftreten kann.

Bei niedriger Luftfeuchte unter etwa 35 %, die im Winter in geheizten Räumen leicht auftreten kann, wird die Staubbildung erleichtert, was dann zu Reizung der Atmungsorgane und Austrocknen der Schleimhäute der oberen Luftwege führen kann.

## Körperliche Betätigung und Bekleidung

Die Tätigkeit der Person beeinflusst ihre Wärmeabgabe und somit die Thermische Behaglichkeit. In [DIN1946] wird daher zwischen vier Aktivitätsgraden unterschieden, denen verschiedene Wärmeabgaben als Anhaltswerte zugeordnet sind: I = Sitzende Tätigkeit (100 W), II = leichte Tätigkeit im Stehen (150 W), III = mäßig schwere körperliche Tätigkeit (200 W), IV = schwere körperliche Tätigkeit (>250 W). Auch die Kleidung beeinflusst die Abgabe der Wärme und wird daher in [DIN1946] mit berücksichtigt. Dabei dient der Wärmeleitwiderstand R in m<sup>2</sup>K/kW als Vergleichsmaß (Beispiel: ohne Bekleidung: R = 0, leichte Kleidung: R = 80 m<sup>2</sup>K/kW, warme Kleidung: R = 240 m<sup>2</sup>K/kW [Reck95]).

### 2.4.2 Statistik und Messung der Thermischen Behaglichkeit

Es gab bisher viele Versuche, die oben aufgeführten Einflußfaktoren zu einem einzigen Behaglichkeitswert (Klimasummenwert) zusammenzufassen [Reck95]. Dabei ist zu

unterscheiden zwischen statistischen Untersuchungen, die an einer großen Anzahl von Personen (mindestens 1000) vorgenommen wird, und online-fähigen Meßgeräten. Eine Übersicht dazu wird in [Reck95, Schw81, Fran75] vermittelt.

Ein Beispiel einer statistischen Auswertung ist die Komfort-Formel nach FANGER [Fan70], mit der die mittlere Anzahl der mit dem Raumklima Unzufriedenen (Predicted Percentage of Dissatisfied, PPD) in Abhängigkeit der Lufttemperatur  $T_i$ , der Strahlungstemperatur  $T_r$ , der mittleren Hauttemperatur, der Luftgeschwindigkeit  $v$ , dem Turbulenzgrad  $Tu$ , dem Aktivitätsgrad und dem Wärmeleitwiderstand der Kleidung berechnet werden kann. Nach FANGER berechnet sich PPD für sitzende, normal gekleidete Personen über

$$\frac{PPD}{\%} = (34 - \frac{T_{op}}{^{\circ}C}) (\frac{v}{m/s} - 0.05)^{0.6223} (3.14 + 0.369 \frac{v}{m/s} \cdot \frac{Tu}{\%}) \quad (2.4-3)$$

[Reck95]. Dabei ist  $T_{op}$  die in Gleichung (2.4-2) eingeführte empfundene Temperatur. Der Turbulenzgrad  $Tu$  ist definiert als das Verhältnis von Standardabweichung zu Mittelwert der Luftgeschwindigkeit.

Zahlenbeispiel:  $T_{op} = 21 \text{ }^{\circ}C$ ,  $v = 0.2 \text{ m/s}$ ,  $Tu = 20 \text{ \%}$   $\Rightarrow$   $PPD = 18 \text{ \%}$

Neben statistisch ermittelten Formeln wie Gleichung (2.4-3) wurden nach verschiedenen Prinzipien Meßgeräte entwickelt, die das menschliche Wärme- und Behaglichkeitsempfinden nachzubilden versuchen [Now96, Reck95]. Diese werten beispielsweise die Komfort-Formel von FANGER aus. Das Raumklimameßgerät nach Mayer [May89, May88] bildet das Wärmeverhalten der Haut nach und kann so direkt das Empfinden des Menschen "messen".

Zusammenfassend ist festzustellen, daß zwar umfangreiche und detaillierte Ergebnisse bezüglich Thermischer Behaglichkeit vorliegen, die jedoch nur relativ schwierig zur Raumklimaoptimierung genutzt werden können. Dies hat vor allem zwei Gründe. Zum einen hängt das Behaglichkeitsempfinden von physikalischen Größen ab, die bis dato nur aufwendig zu messen sind wie Turbulenzgrad und Geschwindigkeit der Luft, so daß die entwickelten Modelle und Meßgeräte eher im Labormaßstab und nicht in Wohn- oder Büroräumen anwendbar sind. Zum anderen beruhen die Erkenntnisse teilweise auf statistischen Auswertungen, so daß das individuelle Empfinden naturgemäß nicht immer korrekt wiedergegeben wird.

### 2.4.3 Luftqualität

Neben der Thermischen Behaglichkeit ist im Kontext dieser Arbeit vor allem die Luftqualität von Interesse. Dem Komplex der Luftverunreinigungen wird seit Mitte der 80er Jahre verstärkte Bedeutung beigemessen, weil durch immer dichtere Bauweise und Fenster der natürliche Luftwechsel von etwa 0.8/h auf 0.1/h um fast eine Zehnerpotenz abgenommen hat

und dadurch hygienische Probleme aufgetreten sind [Reck95]. Dies führte zum Begriff des Sick-Building-Syndroms, das eine Sammelbezeichnung für ein breites Spektrum von Gesundheits- und Behaglichkeitsstörungen ist [Reck95]. Zu den Symptomen zählen u.a. Kopfschmerzen, trockene Schleimhäute, Hals-/Nasenkrankheiten und Augenirritationen. Als Ursache sieht man die wachsende Zahl von Schadstoffen in Wohn- und Bürogebäuden [Reck95].

Die Qualität der Luft wird danach beurteilt, wie viele unerwünschte Stoffe sie enthält [Fit97]. Zu den normalen Bestandteilen gehören Sauerstoff, Stickstoff, Edelgase und Wasserdampf. Zusätzlich enthält die Luft bis zu 8000 Stoffe, die die Luft verunreinigen. Sie entstehen in normalen Aufenthaltsräumen durch die Ausdünstungen des Menschen, der Möbel, Teppiche, Tapeten, Farbanstriche, Baustoffe und durch das Eindringen verunreinigter Außenluft [Reck95]. Bei den meisten dieser Stoffe handelt es sich um komplexe organische Verbindungen. Die maximal zulässigen Konzentrationen von Schadstoffen finden sich z. B. in MAK-Wertlisten (MAK = Maximale Arbeitsplatzkonzentration), siehe z. B. [DFG93].

Ein sehr bedeutender Luftverschlechterer ist Tabakrauch, der eine große Anzahl gas- und dampfförmiger Bestandteile sowie auch flüssige und feste Partikel enthält. Eine Zigarette produziert beispielsweise 70 mg CO, dies entspricht in einem Raum mit 30 m<sup>3</sup> Volumen einem Volumenanteil von 2 ppm, das sind 40 % des MAK-Wertes (5 ppm).

#### 2.4.3.1 Messung der Luftqualität nach Fanger

Wegen der Vielzahl der Stoffe ist es heute mit vertretbarem Aufwand noch nicht möglich, die Luftqualität mit analytischen Methoden zu bestimmen. Ein Gerät, das die Empfindung der menschlichen Nase hat, gibt es noch nicht [Fit97]. Daher wird heute immer noch auf ein von FANGER entwickeltes Meßverfahren zur Bestimmung der Luftqualität mit der Nase zurückgegriffen (Olfaktometrie, [Fan88]). FANGER definierte das "olf" als Maßeinheit für die Stärke der Geruchsquelle. Dabei entspricht 1 olf der Verunreinigung durch eine Standardperson. Als Maß für die empfundene Luftqualität (LQ) führte FANGER die Einheit decipol ein. Es entspricht bei statischer Betrachtung 1 decipol einer Verunreinigungsquelle  $LQ_{\text{stör}} = 1 \text{ olf}$  und einem Lüftungsvolumenstrom  $\dot{V} = 10 \text{ Liter/s} = 36 \text{ m}^3/\text{h}$  [Fan88]:

$$LQ [\text{decipol}] = \frac{LQ_{\text{stör}} [\text{olf}]}{\dot{V} [10 \text{ Liter/s}]} \quad (2.4-4)$$

Bei der FANGER-Methode beurteilen trainierte Personen die Luftqualität über die Bewertungseinheit decipol. Zum Training und zur Kalibrierung der für die Geruchsbewertung einzusetzenden Personen wird als Emissionsquelle Aceton benutzt. Bei untrainierten Personen ergibt sich eine Unzufriedenheitsrate von etwa 15 % bei 1 decipol [Fan88].

### 2.4.3.2 CO<sub>2</sub>-Maßstab nach Pettenkofer

Kohlendioxyd (CO<sub>2</sub>) ist ein farb- und geruchloses Gas, das der Mensch mit einer Rate von 10 bis 70 Liter pro Stunde produziert [Reck95]. Die CO<sub>2</sub>-Konzentration der Außenluft liegt heute bei etwa 300 ppm. In kleinen Konzentrationen ist CO<sub>2</sub> harmlos, höhere Konzentrationen können jedoch zu Lähmungserscheinungen oder gar zum Tod führen ([Reck95], vgl. Abb. 2.4-2). Da der Mensch neben CO<sub>2</sub> eine Reihe weiterer, die Luftqualität verschlechternder Stoffe produziert, eignet es sich als Vergleichsmaß zur Bestimmung der Luftqualität. PETTENKOFER schlug bereits 1858 einen Grenzwert von 1000 ppm für die Luft in Aufenthaltsräumen vor (Pettenkofer-Wert, [Pet58]). Dieser Wert wurde in einschlägige Normen wie z. B. [DIN 1946] aufgenommen.

Geht man vom Mensch als alleinigen Luftverunreiniger aus, so läßt sich der CO<sub>2</sub>-Gehalt bei stationärer Betrachtungsweise in decipol umrechnen. Aus der stationären Gleichung

$$LWR_{\infty} = \frac{\dot{CO}_{2\text{stör}}}{CO_{2i,\infty} - CO_{2a}}, \quad (2.3-25)$$

folgt mit der Definition von LWR ( $\dot{V} = LWR \cdot V_{\text{Raum}}$ , Gleichung 2.3-4) sowie der Abkürzung  $\dot{CO}_{2\text{prod}} = V_{\text{Raum}} \dot{CO}_{2\text{stör}}$  in [m<sup>3</sup>/h] für die CO<sub>2</sub>-Produktionsrate der Ausdruck

$$\dot{V} = \frac{\dot{CO}_{2\text{prod}} \text{ [m}^3\text{/h]}}{CO_{2i} - CO_{2a} \text{ [ppm]}} \quad (2.4-5)$$

Somit läßt sich der FANGER-Maßstab (Gleichung (2.4-4)) mit dem CO<sub>2</sub>-Maßstab vergleichen:

$$\dot{V} = \frac{\dot{CO}_{2\text{prod}} \text{ [m}^3\text{/h]}}{CO_{2i} - CO_{2a} \text{ [ppm]}} = \frac{LQ_{\text{stör}} \text{ [olf]}}{LQ \text{ [decipol]}} \quad (2.4-6)$$

Bei einer angenommenen CO<sub>2</sub>-Produktionsrate eines Menschen von  $\dot{CO}_{2\text{prod}} = 18 \text{ Liter/s} = 64.8 \text{ m}^3\text{/h}$ , dies entspricht definitionsgemäß einer Verunreinigung  $LQ_{\text{stör}} = 1 \text{ olf}$ , folgt aus Gleichung (2.4-6)

$$\frac{CO_{2i} - CO_{2a}}{500} \text{ [ppm]} = LQ \text{ [decipol]}. \quad (2.4-7)$$

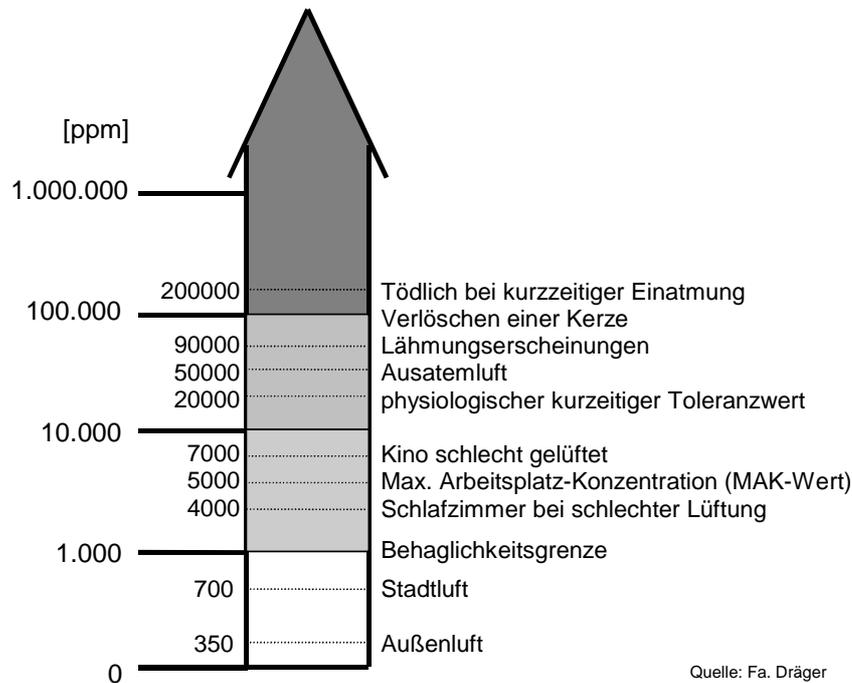


Abb. 2.4-2: Typische CO<sub>2</sub>-Konzentrationen und deren Auswirkungen

### 2.4.3.3 Messung der Luftqualität über Mischgassensoren

Die Gesamtheit aller Luftqualitätsmerkmale mit online-fähigen Sensoren zu erfassen ist bisher sehr aufwendig. Bei den meisten mess- und regelungstechnischen Aufgabenstellungen ist es ausreichend, sich auf die Messung repräsentativer Einzel- oder Mischgase zu beschränken. Dieser Kostenprämisse Rechnung tragend, haben sich in den letzten Jahren vor allem zwei Sensortypen zur Messung der Luftqualität durchgesetzt. Dies sind CO<sub>2</sub>- und sogenannte Mischgassensoren [Mei94].

Mischgassensoren arbeiten über das Oxidationsprinzip und können daher ausschließlich oxidierbare Gase detektieren. Dadurch eignen sie sich besonders gut zur Messung von Körpergerüchen, Tabakrauch, Essensgerüchen, Ausdünstungen von Möbeln, Teppichen, Farben usw. Allerdings werden die Stoffe unterschiedlich gut detektiert, so daß vom Ausgangssignal des Sensors weder auf einen bestimmten Stoff noch dessen Konzentration geschlossen werden kann (vgl. Abb. 2.4-3). Eine Kalibrierung nach "guter" und "schlechter" Luft muß somit individuell erfolgen. Trotzdem werden Mischgassensoren immer häufiger in Lüftungssteuerungen eingesetzt, u.a. wegen des preislichen Vorteils gegenüber CO<sub>2</sub>-Sensoren. Im experimentellen Teil dieser Arbeit werden sowohl CO<sub>2</sub>- als auch Mischgassensoren verwendet. Zur Illustration ist in Abb. 2.4-3 das typische Verhalten eines Mischgassensors bei unterschiedlichen Gasen gezeigt.

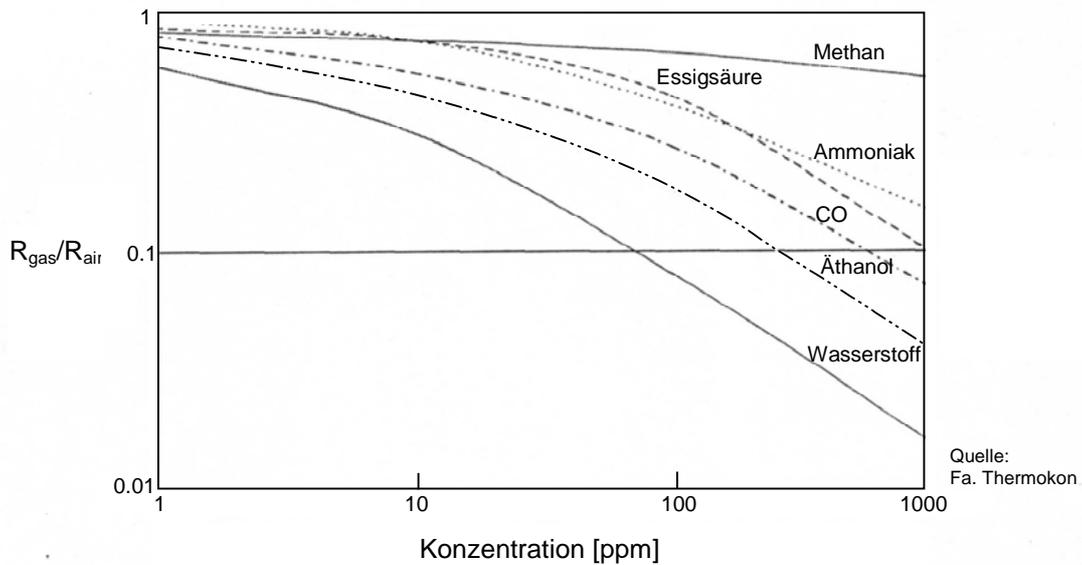


Abb. 2.4-3: Typisches Widerstandsverhalten eines Mischgassensors bei unterschiedlichen Gasen

Von den hier zusammengefaßten Grundlagen zur thermischen und lufthygienischen Behaglichkeit lassen sich einige Elemente aus meßtechnischen Gründen nicht in ein regelungstechnisches Konzept übernehmen, da für entsprechende Größen wie Turbulenzgrad und Luftgeschwindigkeit keine preiswerte Sensorik verfügbar ist.

Folgende für die Behaglichkeit wichtigen Größen jedoch sind leicht meßbar oder schätzbar und werden somit bei der Entwicklung des Optimierungskonzeptes berücksichtigt (vgl. Abschnitt 3.3):

- Luft- und Wandtemperatur
- Zugscheinungen bei Fensterlüftung
- relative Feuchte
- Luftqualität.

Wie aus den Definitionen der Behaglichkeitsgrenzen ersichtlich, sind diese nie als scharfe Grenzwerte zu verstehen. Somit drängt sich eine Beschreibung der Behaglichkeitskriterien durch unscharfe Zugehörigkeitsfunktionen (ZGF) geradezu auf. Diese ZGF werden in Abschnitt 3.3 eingeführt.

Nachdem in Kapitel 2 die benötigten Grundlagen zur Theorie Fuzzy Decision Making, zusammengestellt wurden, ein physikalisches Raummodell entwickelt sowie Behaglichkeitskriterien eingeführt wurden, ist das folgende Kapitel 3 der Entwicklung des neuen Lösungskonzeptes zur Optimierung der Heizungs- und Lüftungsregelkreise gewidmet.

### 3 Neues Lösungskonzept

Gegenstand dieses Kapitels ist die Entwicklung eines neuen Lösungskonzeptes zur Optimierung von Heizungs- und Lüftungsregelkreisen auf der Grundlage von Fuzzy Decision Making. Da bei der Optimierung des Raumklimas vor allem die unscharfen Komfort- und Ökonomiekriterien des Menschen zu berücksichtigen sind, drängt sich Fuzzy-Logik als Methode zur Behandlung des Problems geradezu auf. Der Mensch ist bezüglich des Raumklimas in bestimmten Grenzen anpassungsfähig, allerdings kann er sehr wohl zwischen mehr oder weniger angenehmen Raumklima unterscheiden, und bestimmte Klimazustände empfindet er als unzumutbar. Mit Fuzzy-Logik lassen sich diese Gütekriterien besser beschreiben als durch scharfe analytische Funktionen oder Funktionale.

Zur fuzzy-basierten Verarbeitung der Gütekriterien stehen prinzipiell unterschiedliche Möglichkeiten zur Verfügung. Zum einen kann die Berechnung der optimierten Sollwerte über Fuzzy-Regeln, wie z. B.

WENN ( $x_1 = \text{klein}$ ) UND ( $x_2 = \text{mittel}$ ) DANN ( $y = \text{mittel}$ )

erfolgen. Der prinzipielle Nachteil dabei ist, daß physikalisches Basiswissen, das in Form einfacher Gleichungen verfügbar ist (vgl. Abschnitt 2.3), in die Fuzzy-Regeln wieder integriert werden muß. Dadurch verliert das System an Transparenz und wird überdies durch die wachsende Regelanzahl unnötig komplex.

In dieser Arbeit wird deshalb die Methode des Fuzzy Decision Making (vgl. Abschnitt 2.2), die sich für vergleichbare Anwendungen im Bereich des Operations Research sehr bewährt hat (vgl. z. B. [Rom94, Gal91, Zim91]), als Lösungsansatz verwendet. In die Algorithmen des Fuzzy Decision Making können Modellgleichungen bezüglich des Raumklimaverhaltens, der prognostizierten Wärmeverluste und des Behaglichkeitsempfindens leicht integriert werden.

Im folgenden Abschnitt 3.1 werden die Schnittstellen zu den Heizungs- und Lüftungsregelkreisen diskutiert. Die Entwicklung des neuen Konzeptes zur Optimierung von Führungs- und Stellgrößen bei unscharfen Gütekriterien ist Gegenstand von Abschnitt 3.2. Die Modellierung der Komfort- und Ökonomie-Kriterien durch Fuzzy-ZGF<sub>n</sub> wird in Abschnitt 3.3 diskutiert. In Abschnitt 3.4 wird das entwickelte Konzept zur Optimierung einer Führungsgröße auf die Optimierung des Temperatursollwertes angewandt. Dazu wird ein statisches Modell zur Abschätzung der empfundenen Temperatur entwickelt. Abschnitt 3.5 ist der Optimierung des Lüftungssollwertes gewidmet. Dabei wird insbesondere die Robustheit des Ansatzes gegenüber Parameterungenauigkeiten nachgewiesen. Die

Einbeziehung heuristischer Strategieelemente für bestimmte Spezialfälle (Abschnitt 3.6) schließen die Entwicklung des Lösungskonzeptes ab.

### 3.1 Schnittstellen zu den Heizungs- und Lüftungsregelkreisen

Um die Heizungs- und Lüftungsregelkreise optimieren zu können, sind zunächst entsprechende Schnittstellen zwischen der zu entwickelnden Fuzzy-Leitkomponente und den entsprechenden Regelkreisen zu bestimmen.

Das Problem besteht darin, geeignete Stell- bzw. Führungsgrößen zu finden, so daß das betrachtete System, das Raumklima, bezüglich verschiedener Gütekriterien optimierbar ist.

Bei den Heizungsregelkreisen gibt es mehrere Ebenen, auf denen ein Eingriff möglich ist (vgl. Abb. 3.1-1):

- Ebene der Wärmeerzeugung (z. B. Heizkessel),
- Heizkörperventil,
- Vorgabe eines Temperatursollwertes an einem Raumtemperaturregler.

Jede Ebene hat sehr spezifische Eigenschaften. So ist die Art der Wärmeerzeugung beispielsweise sehr abhängig vom Haustyp und der regionalen Energieversorgung und die entsprechenden Steuerungen und Regelungen sind speziell auf die verwendete Technik abgestimmt.

Bei der direkten Ansteuerung des Ventils sind der jeweilige Ventiltyp und die Dynamik der Heizungsanlage zu berücksichtigen. Diese können jedoch sehr unterschiedlich sein, so daß z. T. erhebliche Anpassungen an die jeweilige Technik notwendig sind. Daher ist als generische Schnittstelle die Vorgabe des Temperatursollwertes an einen Raumtemperaturregler sinnvoll. Somit bleibt die Leitkomponente weitgehend unabhängig von den Eigenschaften der unterlagerten Regelkreise.

Als Schnittstelle zu den Lüftungsregelkreisen bietet sich die in Abschnitt 2.3 eingeführte Luftwechselrate LWR,

$$LWR = \dot{V} / V_{\text{Raum}} \quad (2.3-4)$$

an. Zum einen werden durch LWR die Klimazustandsgrößen  $CO_{2,i}$ ,  $\varphi_i$  und im Sommerfall auch  $T_i$  geregelt, zum anderen sind die Lüftungsverluste direkt von LWR abhängig (vgl. Abschnitt 2.3).

Prinzipiell ist es denkbar, auch hier unterlagerte Regelkreise einzuführen, so daß die Aufgabe darin besteht, Sollwerte von  $CO_{2,i}$ ,  $\varphi_i$  und im Sommerfall  $T_i$  bezüglich der

verschiedenen Komfort- und Kostenkriterien zu optimieren. Gegen diese Vorgehensweise spricht jedoch die starke Kopplung von  $\text{CO}_{2,i}$ ,  $\varphi_i$  und  $T_i$ .

Es wird im folgenden vorausgesetzt, daß ein vorgegebener Lüftungssollwert  $\text{LWR}_{\text{soll}}$  von einer Steuereinheit eingestellt wird. Steht als Aktorik ein Ventilator zur Verfügung, so entspricht  $\text{LWR}_{\text{soll}}$  einer bestimmten Drehzahl, bei der Lüftung über einen ansteuerbaren Fensteröffner einem Öffnungswinkel.

Es ist wichtig zu bemerken, daß der geforderte Sollwert

$$\text{LWR}_{\text{soll}} = \dot{V}_{\text{soll}} / V_{\text{Raum}} \quad (3.1-1)$$

in der Regel nicht genau eingehalten werden kann, weil zum einen das freie Raumvolumen  $V_{\text{Raum}}$  nie genau bekannt ist und auch der geforderte Volumenstrom  $\dot{V}_{\text{soll}}$  meist nur ungefähr eingestellt werden kann. Daraus ergibt sich nach Gleichung (3.1-1) eine Abweichung von  $\text{LWR}_{\text{soll}}$ . Außerdem setzt das Konzept der Luftwechselrate eine ideal durchmischte Raumluft voraus, was in der Praxis jedoch nur selten gegeben ist. Die zu entwickelnde Leitkomponente muß daher robust gegenüber dieser Ungenauigkeit von LWR sein.

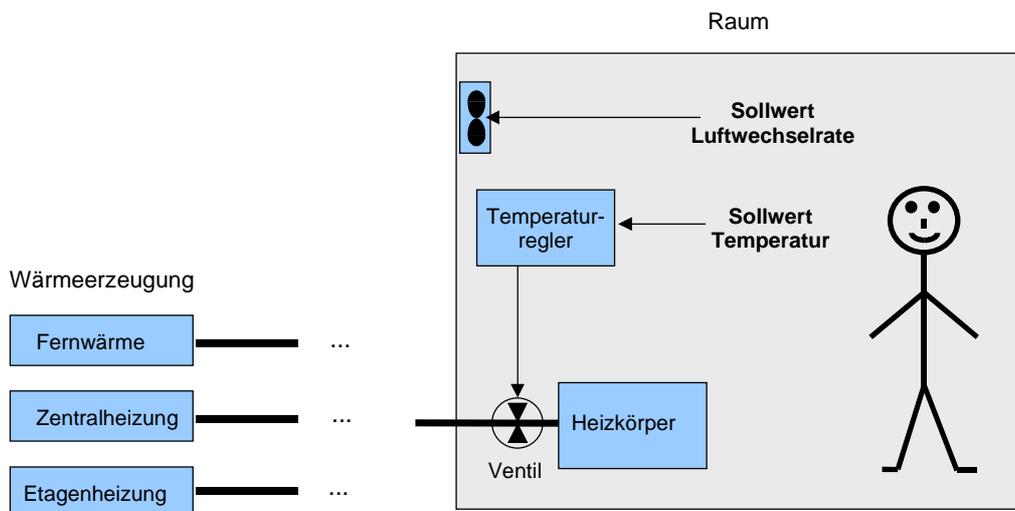


Abb. 3.1-1: Schnittstellen zu Heizungs- und Lüftungsregelkreisen

### 3.1.1 Eingangsgrößen der Leitkomponente

Nachdem mit den Sollwerten  $T_{i,\text{soll}}$  und  $\text{LWR}_{\text{soll}}$  die Schnittstellen zu den Heizungs- und Lüftungsregelkreisen und somit der Output der Fuzzy-Leitkomponente definiert sind, müssen die Eingangsgrößen noch spezifiziert werden.

Eine grobe, intuitive Vorstellung vermittelt Abb. 3.1-2. Danach sind das individuelle Komfort-Empfinden sowie die Bewertung des Heizungs-Lüftungsprozesses unter ökonomischen

Kriterien geeignet zu berücksichtigen. Sensoriell meßbare Größen sind das Außen- und Innenklima ( $T_a, \varphi_a, \text{CO}_{2a}$  und  $T_i, \varphi_i, \text{CO}_{2i}$ ) sowie die Belegung des Raumes (Anwesenheit). Eine wesentliche Vorgabe des Nutzers besteht in der Wichtung der Komfort- und Ökonomiekriterien, die durch ein einfaches Bedienelement wie beispielsweise einen Schieber realisiert werden kann.

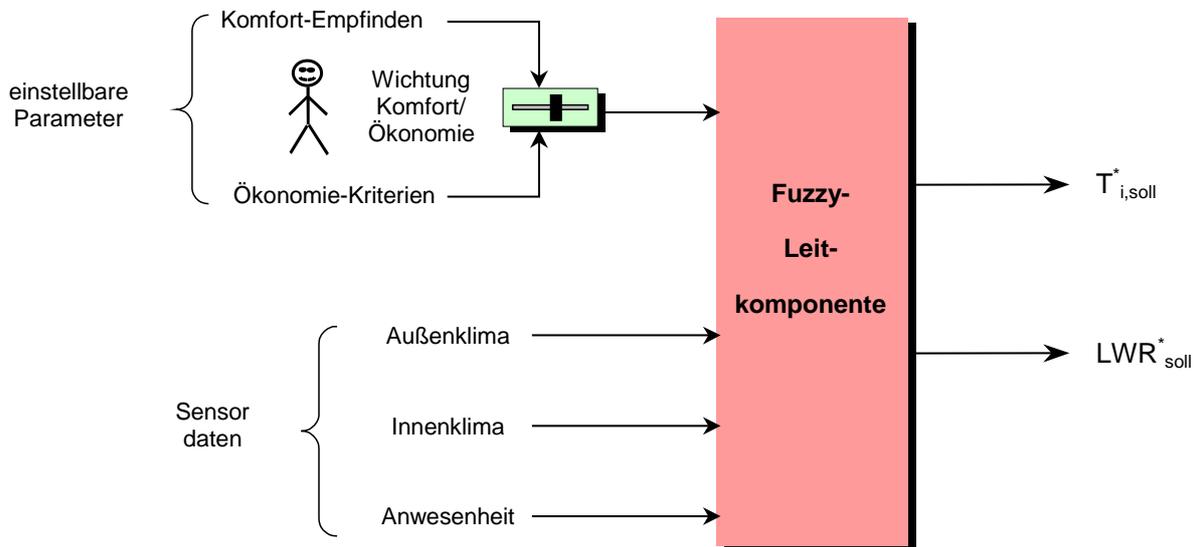
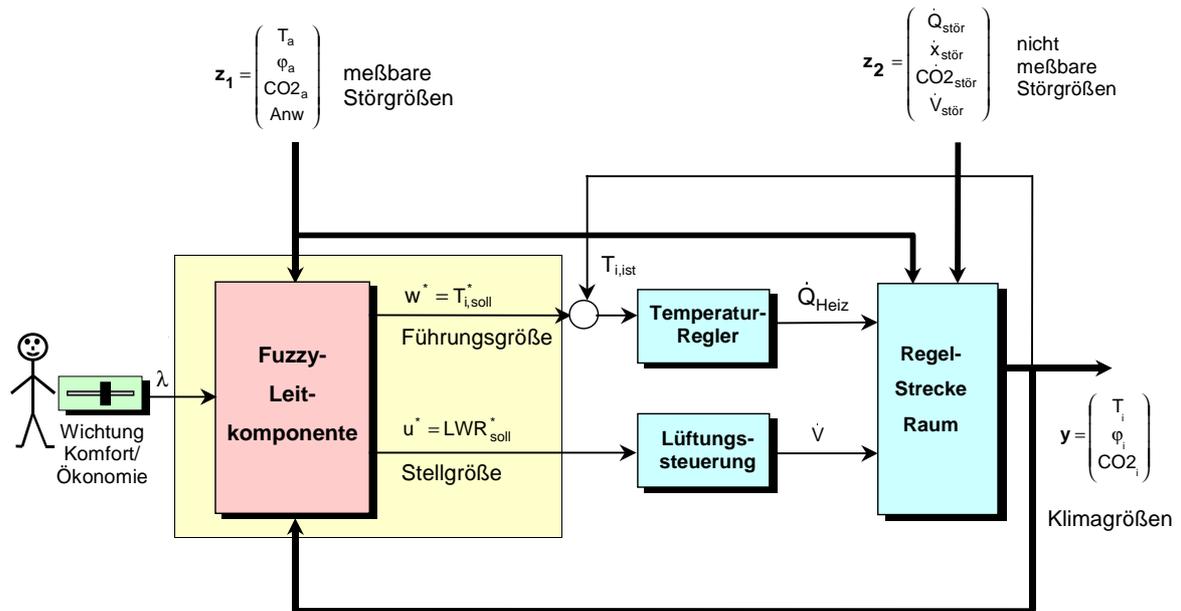


Abb. 3.1-2: Ein- und Ausgangsgrößen der Fuzzy-Leitkomponente

### 3.1.2 Stellung im geschlossenen Regelkreis

Die Stellung der Fuzzy-Leitkomponente im geschlossenen Regelkreis ist in Abb. 3.1-3 gezeigt. Während  $T_{i,soll}$  eine Führungsgröße darstellt und vom unterlagerten Temperaturregler eingestellt wird, entspricht  $LWR_{soll}$  einer Stellgröße, die direkt auf die Klimazustandsgrößen  $T_i$ ,  $\varphi_i$  und  $\text{CO}_{2i}$  wirkt. Da die Komfortkriterien von den Klimazustandsgrößen abhängen, existiert eine direkte Rückkopplung im Sinne eines Regelkreises. Daher ist der Einfluß von  $LWR$  auf die Dynamik von  $T_i$ ,  $\varphi_i$  und  $\text{CO}_{2i}$  bei der Entwicklung der Leitkomponente mit zu berücksichtigen (vgl. 3.2.2, 3.5).

Die mit der Anwesenheit von Personen im Raum verbundenen Wärme-, Wasserdampf- und  $\text{CO}_2$ -Störquellen  $\dot{Q}_{stör}$ ,  $\dot{x}_{stör}$ ,  $\dot{\text{CO}}_{2stör}$  sind nicht direkt meßbar. Da zur Optimierung von  $LWR_{soll}$  zumindest eine ungefähre Kenntnis der Störquellen unerlässlich ist, müssen sie geschätzt werden (vgl. 3.5.3).



$T_{i,soll}^*$ : optimierter Sollwert Innentemp. [°C]	$\dot{Q}_{Heiz}$ : Heizleistung [W]
$LWR_{soll}^*$ : optimierter Sollwert Luftwechselrate [1/h]	$\dot{V}$ : Lüftungsvolumenstrom [m <sup>3</sup> /h]
$\lambda$ : Wichtungsfaktor ( $0 < \lambda < 1$ )	$\dot{Q}_{stör}$ : Störwärmeströme [W]
$T_a, T_i$ : Temperatur außen, innen [°C]	$\dot{x}_{stör}$ : Störwasserdampfquellen [g/kg/h]
$\varphi_a, \varphi_i$ : relative Feuchte außen, innen [%]	$CO_{2, stör}$ : CO <sub>2</sub> -Störquellen [ppm/h]
$CO_{2a}, CO_{2i}$ : CO <sub>2</sub> -Gehalt außen, innen [ppm]	$\dot{V}_{stör}$ : Störvolumenstrom [m <sup>3</sup> /h]
Anw: Anwesenheit von Personen [0/1]	

Abb. 3.1-3: Stellung der Fuzzy-Leitkomponente im geschlossenen Regelkreis

### 3.2 Sollwertoptimierung bei unscharfen Gütekriterien

Aufbauend auf den in Abschnitt 2.2 eingeführten Algorithmus des Fuzzy Decision Making wird in diesem Abschnitt ein neues Konzept zur Sollwertoptimierung entwickelt, welches unscharfe Gütekriterien und deren Wichtigkeit berücksichtigt. Das Konzept wird in den Abschnitten 3.4 und 3.5 zur Optimierung des Temperatur- und Lüftungssollwertes angewandt.

Im folgenden wird unterschieden zwischen der Optimierung einer Führungsgröße  $w$  und einer Stellgröße  $u$ . Bei der Optimierung einer Führungsgröße  $w$ , z. B. eines Temperatursollwertes, wird die Existenz eines unterlagerten Reglers vorausgesetzt, der die entsprechende Stellgröße  $u$  berechnet und ausgibt, siehe Abb. 3.2-1. Die klassische Regelkreisstruktur bleibt also erhalten und wird lediglich durch die Optimierungskomponente überlagert.

Ist kein unterlagerter Regelkreis verfügbar oder macht die Vorgabe einer Führungsgröße keinen Sinn, weil die Gütekriterien von mehreren gekoppelten Größen abhängen, so ist die

Stellgröße  $u$  direkt bezüglich der Gütekriterien zu optimieren (Abb. 3.2-2). Dies ist bei der Optimierung von LWR wegen der Kopplung der Zustandsgrößen  $\mathbf{x} = [T_i, \varphi_i, \text{CO}_2]$  der Fall. Da die Größen  $\mathbf{y}$  durch  $u_2 = \text{LWR}$  gesteuert werden, muß in der Optimierung die Dynamik der Strecke berücksichtigt werden.

In den folgenden beiden Unterabschnitten 3.2.1 und 3.2.2 werden die Algorithmen zur Optimierung einer Führungsgröße  $w$  bzw. einer Stellgröße  $u$  entwickelt.

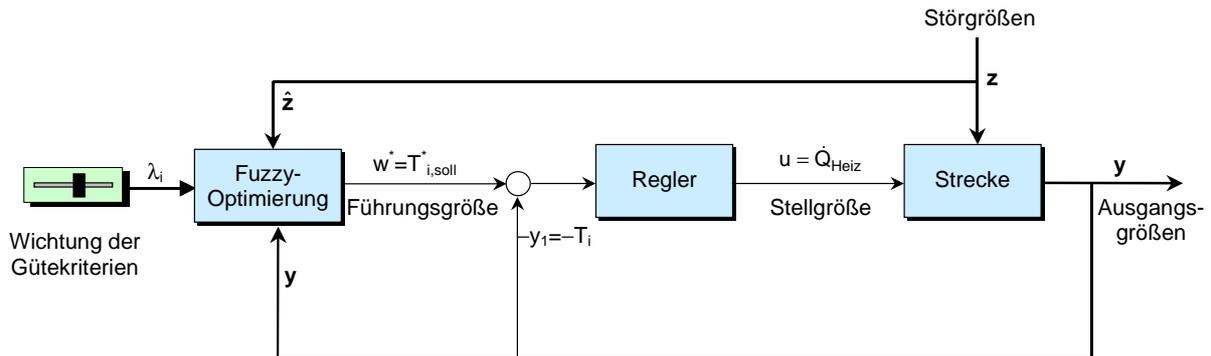


Abb. 3.2-1: Schema der Fuzzy-Optimierung mit unterlagertem Regelkreis

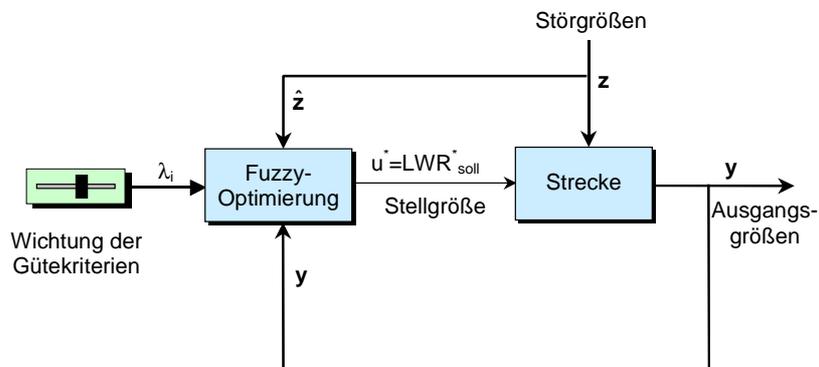


Abb. 3.2-2: Schema der Fuzzy-Optimierung ohne unterlagertem Regelkreis

### 3.2.1 Optimierung mit unterlagertem Regelkreis

Betrachtet wird ein stabiler Prozeß, der durch die Ausgangsgrößen  $\mathbf{y} = [y_1, \dots, y_n]$  beschrieben und durch die Stellgrößen  $\mathbf{u} = [u_1, \dots, u_p]$  steuerbar sei [Föl94]. Der Prozeß werde durch Störgrößen  $\mathbf{z} = [z_1, \dots, z_r]$  gestört (vgl. Abb. 3.2-1). Die Ausgangsgrößen  $\mathbf{y}$  werden als meßbar oder zumindest schätzbar vorausgesetzt. Es wird angenommen, daß ein Regler mit der Führungsgröße  $w$  existiert (vgl. Abb. 3.2-1).

Die Qualität des Prozesses werde gemessen am Zugehörigkeitsgrad zu unscharfen Gütekriterien, die durch ZGF  $\mu_i$  ( $i = 1, \dots, N$ ) repräsentiert seien. Ziel ist die Optimierung von  $w$

bezüglich aller  $\mu_i$ , die jeweils von einer Ausgangsgröße  $y_i$  oder einer Stellgröße  $u_j$  abhängen. In Gleichung (3.2-1) wird ohne Beschränkung der Allgemeinheit eine Abhängigkeit der Gütekriterien  $\mu_i$  von Ausgangsgrößen  $y_i$  angenommen.

$$\mu_i = f_i(y_i), \quad i = 1, \dots, N \quad (3.2-1)$$

Weiter wird vorausgesetzt, daß sich  $w$  geeignet diskretisieren läßt:

$$w \in W = \{w_0, w_1, \dots, w_p\} \quad (3.2-2)$$

Nun wird auf das in Abschnitt 2.2 eingeführte Konzept des Fuzzy Decision Making mit Wichtung der Gütekriterien durch Multiplikatoren zurückgegriffen (Gleichung 2.2-7, 2.2-13). Danach kann die optimale Entscheidung allerdings nur berechnet werden, wenn alle Gütekriterien  $\mu_1, \dots, \mu_N$  als Funktion der zu optimierenden Größe vorliegen. Sind also  $\mu_1, \dots, \mu_N$  als Funktion von  $w$  gegeben, so kann die Fuzzy-Entscheidung  $\mu_D$  gemäß Gleichung (3.2-3) und daraus die optimale Entscheidung  $w^*$  ermittelt werden (Gleichung (3.2-4)).

$$\mu_D(w) = \bigwedge_{i=1}^N \lambda_i \mu_i(w), \quad 0 < \lambda_i \leq 1, \quad \bigwedge = \min \quad (3.2-3)$$

$$\mu_D(w^*) = \max_{w \in W} \mu_D(w) \quad (3.2-4)$$

Da die Gütekriterien  $\mu_i$  nach Gleichung (3.2-1) jedoch von  $y_i$  abhängen, sind Modellfunktionen  $g_i$  zu finden, um Schätzwerte  $\hat{y}_i$  in Abhängigkeit von  $w$  berechnen zu können (Gleichung (3.2-5)).

$$\hat{y}_i = g_i(w), \quad i = 1, \dots, N \quad (3.2-5)$$

Durch Einsetzen von Gleichung (3.2-5) in (3.2-1) lassen sich die Gütekriterien  $\mu_i$  als Funktion von  $w$  darstellen:

$$\mu_i = f_i(\hat{y}_i) = f_i(g_i(w)), \quad i = 1, \dots, N. \quad (3.2-6)$$

Somit können die Fuzzy-Entscheidung  $\mu_D(w)$  und damit die optimale Entscheidung  $w^*$  gemäß den Gleichungen (3.2-3) und (3.2-4) berechnet werden.

In der Regel werden die  $y_i$  nicht, wie in Gleichung (3.2-5) angenommen wurde, nur von der zu optimierenden Führungsgröße  $w$  abhängen, sondern auch von den aktuell gemessenen Ausgangs- und Störgrößen  $\mathbf{y}$  und  $\mathbf{z}$ :

$$\hat{y}_i = g_i(\mathbf{y}, \mathbf{z}, w), \quad i = 1, \dots, N \quad (3.2-7)$$

Die Modellgleichungen (3.2-7) sind statischer Natur, d.h. das Übergangsverhalten der  $y_i$  wird nicht explizit berücksichtigt. Dies ist z. B. über die Definition von Referenztrajektorien möglich, siehe dazu den folgenden Unterabschnitt 3.2.2.

Mit den Modellgleichungen (3.2-7) sind auch die Gütekriterien  $\mu_i$ , die Fuzzy-Entscheidung  $\mu_D$  und schließlich die optimale Entscheidung  $w^*$  von  $\mathbf{y}$  und  $\mathbf{z}$  abhängig:

$$\mu_i = f_i(g_i(\mathbf{y}, \mathbf{z}, \mathbf{w})), \quad i = 1, \dots, N \quad (3.2-8)$$

$$\mu_D(\mathbf{y}, \mathbf{z}, \mathbf{w}) = \bigwedge_{i=1}^N \lambda_i \mu_i(g_i(\mathbf{y}, \mathbf{z}, \mathbf{w})), \quad 0 < \lambda_i \leq 1 \quad (3.2-9)$$

$$\mu_D(\mathbf{y}, \mathbf{z}, \mathbf{w}^*) = \max_{\mathbf{w} \in W} \mu_D(\mathbf{y}, \mathbf{z}, \mathbf{w}) \quad (3.2-10)$$

Der Algorithmus ist schematisch in Abb. 3.2-3 dargestellt.

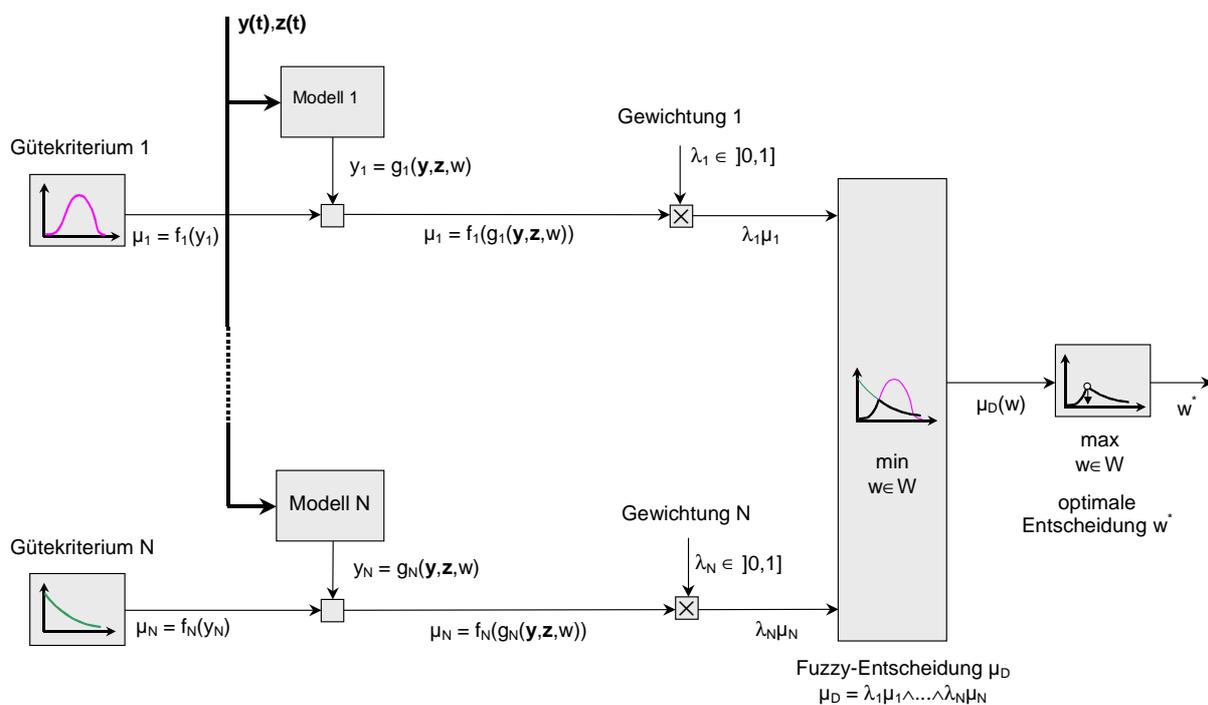


Abb. 3.2-3: Algorithmus zur Optimierung einer Führungsgröße  $w$  bezüglich unscharfer Gütekriterien  $\mu_i$  ( $i=1, \dots, N$ )

### 3.2.2 Optimierung ohne unterlagertem Regelkreis

Da bei der Optimierung ohne unterlagertem Regelkreis die Dynamik der Strecke zu berücksichtigen ist, bieten sich prädiktive Ansätze an, bei denen das Verhalten des Systems bis zu einem bestimmten Zeithorizont  $t_H$  berechnet wird. Somit steht das Problem in engem Zusammenhang mit mehrstufigen Entscheidungsproblemen (vgl. 2.2.4). Bisher vorgestellte

Ansätze zur Optimierung mehrstufiger Entscheidungen mit Fuzzy-Gütekriterien sind jedoch häufig sehr rechenintensiv, da sie z. B. auf der Methode der Dynamischen Programmierung oder Branch-and-Bound-Verfahren beruhen (vgl. z. B. [Bel70], [Kac97]). Da die in dieser Arbeit entwickelten Algorithmen auch auf einfachen Plattformen implementierbar sein sollen, wird im folgenden ein einfacher prädiktiver Ansatz vorgeschlagen.

Wie in Unterabschnitt 3.2.1 wird ein stabiler Prozeß betrachtet, der durch die Ausgangsgrößen  $\mathbf{y} = [y_1, \dots, y_n]$  beschrieben und durch Störgrößen  $\mathbf{z} = [z_1, \dots, z_r]$  gestört wird. Es wird angenommen, daß eine Stellgröße  $u$  existiert, über die der Prozeß vollständig steuerbar ist (vgl. Abb. 3.2-2).

Die Qualität des Prozesses werde gemessen am Zugehörigkeitsgrad zu unscharfen Gütekriterien  $\mu_i$  ( $i = 1, \dots, N$ ). Ziel ist die Optimierung von  $u$  bezüglich aller  $\mu_i$ , die jeweils von einer Ausgangsgröße  $y_i$ , der Stellgröße  $u$  oder einer anderen, den Prozeß charakterisierenden Hilfsgröße  $\tilde{y}_i$  abhängen.

Bei der Definition der  $N$  Gütekriterien in den Gleichungen (3.2-11) und (3.2-12) wird angenommen, daß die ersten  $m$  Gütekriterien  $\mu_1, \dots, \mu_m$  jeweils von einer Ausgangsgröße  $y_i$  ( $i=1, \dots, m$ ) und die Gütekriterien  $\mu_{m+1}, \dots, \mu_N$  von einer Hilfsgröße  $\tilde{y}_j$  ( $j=m+1, \dots, N$ ) abhängen.

Da die Ausgangsgrößen  $y_i$  durch  $u$  gesteuert werden, muß bei der Optimierung bezüglich der Gütekriterien (3.2-11) das Übergangsverhalten der  $y_i$  berücksichtigt werden. Bei den Gütekriterien  $\mu_{m+1}, \dots, \mu_N$  wird angenommen, daß kein Übergangsverhalten zu berücksichtigen ist.

mit Übergangsverhalten  $\mu_i = f_i(y_i), \quad i = 1, \dots, m \quad (3.2-11)$

ohne Übergangsverhalten  $\mu_j = f_j(\tilde{y}_j), \quad j = m + 1, \dots, N \quad (3.2-12)$

Die Dynamik der Größen  $y_i$  in Abhängigkeit von  $\mathbf{y}$ ,  $\mathbf{z}$  und  $u$  werde durch Modelldifferentialgleichungen (Modell-DGL)  $d_i$  beschrieben (3.2-13). Bezüglich der Hilfsgrößen  $\tilde{y}_j$  wird angenommen, daß diese sich über statische Modellgleichungen  $g_j$  in Abhängigkeit von  $\mathbf{y}$ ,  $\mathbf{z}$  und  $u$  schätzen lassen (Gleichung (3.2-14)).

$$\hat{y}_i = d_i(\mathbf{y}, \mathbf{z}, u), \quad i = 1, \dots, m. \quad (3.2-13)$$

$$\hat{\tilde{y}}_j = g_j(\mathbf{y}, \mathbf{z}, u), \quad j = m + 1, \dots, N \quad (3.2-14)$$

Weiter wird vorausgesetzt, daß sich die Stellgröße  $u$  geeignet diskretisieren läßt:

$$u \in U = \{u_0, u_1, \dots, u_p\}. \quad (3.2-15)$$

### Berücksichtigung der Gütekriterien $\mu_1, \dots, \mu_m$

Für die folgenden Überlegungen werden zunächst nur die ersten  $m$  Gütekriterien

$$\mu_i = f_i(y_i), \quad i = 1, \dots, m \quad (3.2-11)$$

betrachtet, bei denen das Übergangsverhalten von  $y_i$  in Abhängigkeit von  $u$  zu berücksichtigen ist.

Ausgehend von den aktuellen Werten  $y_i(t)$  können über die Stellgröße  $u$  andere Zustände angesteuert werden. Diese Zustände werden im folgenden als **interne Sollwerte**  $y_{i,soll}$  bezeichnet und zunächst als konstant angenommen, wie in Abb. 3.2-4 dargestellt ist. Jedem Wert  $y_{i,soll}$  entspricht ein Güteindex  $\mu(y_{i,soll})$ . Die Berechnung von  $y_{i,soll}$  folgt in der weiteren Entwicklung des Algorithmus. Der wesentliche Punkt besteht nun darin, bei der Bewertung des Prozesses durch die Gütekriterien gemäß Gleichung (3.2-11) den internen Sollwert  $y_{i,soll}$  an Stelle des aktuellen Wertes  $y_i(t)$  einzusetzen:

$$\mu_i = f_i(y_{i,soll}), \quad i = 1, \dots, m \quad (3.2-16)$$

Diese Vorgehensweise ist notwendig, da aus der Menge der möglichen Stellwerte  $U$  der optimale Wert  $u^*$  auszuwählen ist, der den Prozeß in der Zukunft in den bestmöglichen Zustand überführt. Daher ist es plausibel, in die Gütekriterien  $\mu_i$  den anzusteuern Sollwert  $y_{i,soll}$  und nicht den aktuellen Wert  $y_i(t)$  einzusetzen. Dabei ist der Zeithorizont  $t_H$  zu definieren, in dem der Übergang von  $y_i(t)$  nach  $y_{i,soll}$  vollzogen wird. Das beschriebene Prinzip weist Elemente einer prädiktiven Regelung auf (vgl. z. B. [Saj97, Soe90, Gar87, Smi59]) und ist in Abb. 3.2-4 illustriert.

Um das Konzept des Fuzzy Decision Making zur Berechnung des optimalen Stellwertes  $u^*$  anwenden zu können, sind die  $\mu_i$  als Funktion von  $u$  darzustellen. Da die  $\mu_i$  in Gleichung (3.2-16) in Abhängigkeit von  $y_{i,soll}$  definiert sind, sind also Funktionen  $g_i(u)$  mit

$$y_{i,soll} = g_i(u), \quad i = 1, \dots, m \quad (3.2-17)$$

zu finden.

Wie bei einer prädiktiven Regelung wird nun eine Referenztrajektorie definiert, die den Übergang vom momentanen Wert  $y_i(t)$  zum internen Sollwert  $y_{i,soll}$  festlegt (vgl. Abb. 3.2-4). Dies kann z. B. Tiefpaßverhalten mit einer Zeitkonstanten  $\tau_i$  sein, welches durch die Differentialgleichung (3.2-18) beschrieben wird.

$$\dot{y}_i = -\frac{1}{\tau_i}(y_i - y_{i,soll}), \quad i = 1, \dots, m \quad (3.2-18)$$

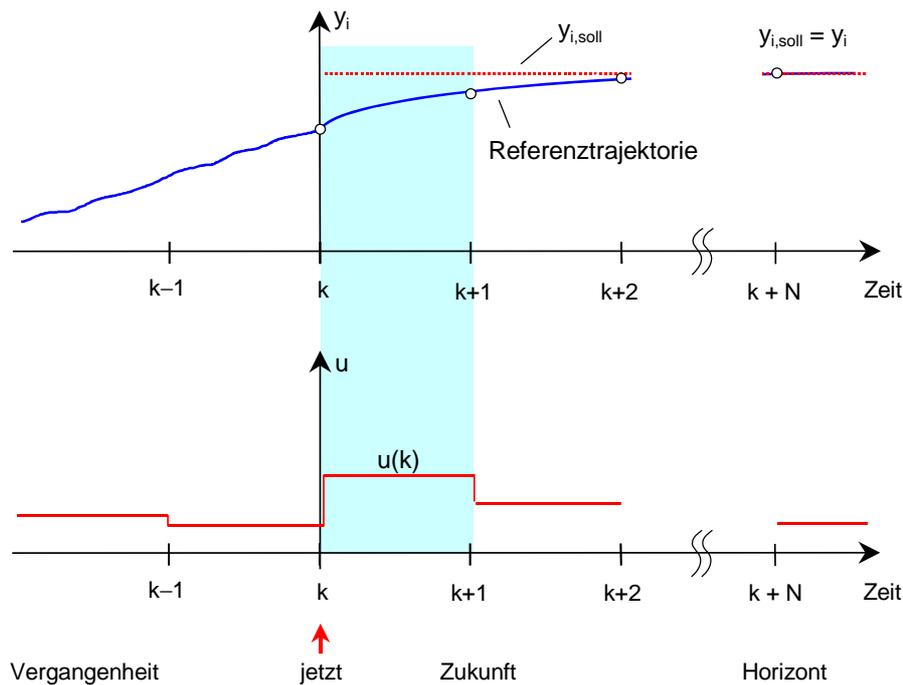


Abb. 3.2-4: Interner Sollwert  $y_{i,soll}$  mit Referenztrajektorie und Stellstrategie

Zwar wird  $y_{i,soll}$  somit nur asymptotisch erreicht, doch da die Annäherung exponentiell verläuft, kann dies als gute Näherung betrachtet werden.

Gleichsetzen der DGL der Referenztrajektorie (3.2-18) mit der Modell-DGL (3.2-13)  $\hat{y}_i = d_i(\mathbf{y}, \mathbf{z}, u)$  führt zum Ausdruck

$$-\frac{1}{\tau_i}(y_i - y_{i,soll}) = d_i(\mathbf{y}, \mathbf{z}, u), \quad i = 1, \dots, m \quad (3.2-19)$$

und schließlich auf den in Gleichung (3.2-17) geforderten Zusammenhang  $y_{i,soll} = g_i(u)$ :

$$y_{i,soll} = y_i + \tau_i d_i(\mathbf{y}, \mathbf{z}, u) \equiv g_i(\mathbf{y}, \mathbf{z}, u), \quad i = 1, \dots, m \quad (3.2-20)$$

Durch Einsetzen von Gleichung (3.2-20) in (3.2-16) erfolgt die Berechnung der Fuzzy-Entscheidung  $\mu_D$  (Gleichung (3.2-21)) und schließlich die Berechnung der optimalen Entscheidung  $u^*$  (Gleichung (3.2-22)).

$$\mu_D(\mathbf{y}, \mathbf{z}, u) = \bigwedge_{i=1}^m \lambda_i \mu_i(g_i(\mathbf{y}, \mathbf{z}, u)), \quad 0 < \lambda_i \leq 1 \quad (3.2-21)$$

$$\mu_D(\mathbf{y}, \mathbf{z}, u^*) = \max_{u \in U} \mu_D(\mathbf{y}, \mathbf{z}, u) \quad (3.2-22)$$

Die formale Berechnung verläuft also vollkommen analog zur Optimierung der Führungsgröße  $w$  (vgl. Gleichungen (3.2-8) - (3.2-10)). Unterschiedlich ist die Vorgehensweise beim Aufstellen der Modellgleichungen  $g_i$ . Während bei der Berechnung von  $w^*$  statische Gleichungen verwendet werden (Gleichung (3.2-8)), müssen bei der Berechnung von  $u^*$  Differentialgleichungen herangezogen werden (Gleichung (3.2-13)). Zusammen mit internen Sollwerten  $y_{i,\text{soll}}$  und Referenztrajektorien (Gleichung (3.2-18)) führen sie zu den Modellgleichungen  $g_i$  (Gleichung (3.2-20)). Die Zeitkonstanten der Referenztrajektorien  $\tau_i$  sind als wichtiger Parameter entsprechend der gewünschten Übergangszeit zu wählen, sie müssen jedoch in physikalisch sinnvollen Grenzen bleiben. Dies wird erreicht, indem die  $\tau_i$  nicht kleiner als die kleinste typische Zeitkonstante der entsprechenden Größe  $y_i$  gewählt werden. "Große" Werte von  $\tau_i$  führen zu einem entsprechend trägen Folgeverhalten von  $y_i$  und sind somit unkritisch.

### Berücksichtigung der Gütekriterien $\mu_{m+1}, \dots, \mu_N$

Nachdem von den  $N$  Gütekriterien

$$\mu_i = f_i(y_i), \quad i = 1, \dots, m \quad (3.2-11)$$

$$\mu_j = f_j(\tilde{y}_j), \quad j = m+1, \dots, N \quad (3.2-12)$$

bisher nur die ersten  $m$  Gütekriterien (3.2-11) berücksichtigt wurden, müssen noch die von Hilfsgrößen  $\tilde{y}_j$  abhängigen Gütekriterien (3.2-12) in den Algorithmus integriert werden. Es wurde angenommen, daß  $\tilde{y}_j$  durch statische Beziehungen  $g_j$  in Abhängigkeit von  $\mathbf{y}$ ,  $\mathbf{z}$  und  $u$  modelliert werden kann:

$$\hat{\tilde{y}}_j = g_j(\mathbf{y}, \mathbf{z}, u), \quad j = m+1, \dots, N \quad (3.2-14)$$

Durch Einsetzen von (3.2-14) in die letzten  $(N - m)$  Gütekriterien (3.2-12) werden die  $\mu_j$  als Funktion von  $u$  ausgedrückt. Somit kann der Formalismus des Fuzzy Decision Making zur Berechnung von  $u^*$  angewandt werden (Gleichung (3.2-23), (3.2-24)).

$$\begin{aligned} \mu_D(\mathbf{y}, \mathbf{z}, u) &= \left( \bigwedge_{i=1}^m \lambda_i \mu_i(g_i(\mathbf{y}, \mathbf{z}, u)) \right) \wedge \left( \bigwedge_{j=m+1}^N \lambda_j \mu_j(g_j(\mathbf{y}, \mathbf{z}, u)) \right) \\ &= \bigwedge_{i=1}^N \lambda_i \mu_i(g_i(\mathbf{y}, \mathbf{z}, u)), \quad 0 < \lambda_{i/j} \leq 1 \end{aligned} \quad (3.2-23)$$

$$\mu_D(\mathbf{y}, \mathbf{z}, u^*) = \max_{u \in U} \mu_D(\mathbf{y}, \mathbf{z}, u) \quad (3.2-24)$$

Der Algorithmus ist schematisch in Abb. 3.2-5 dargestellt.

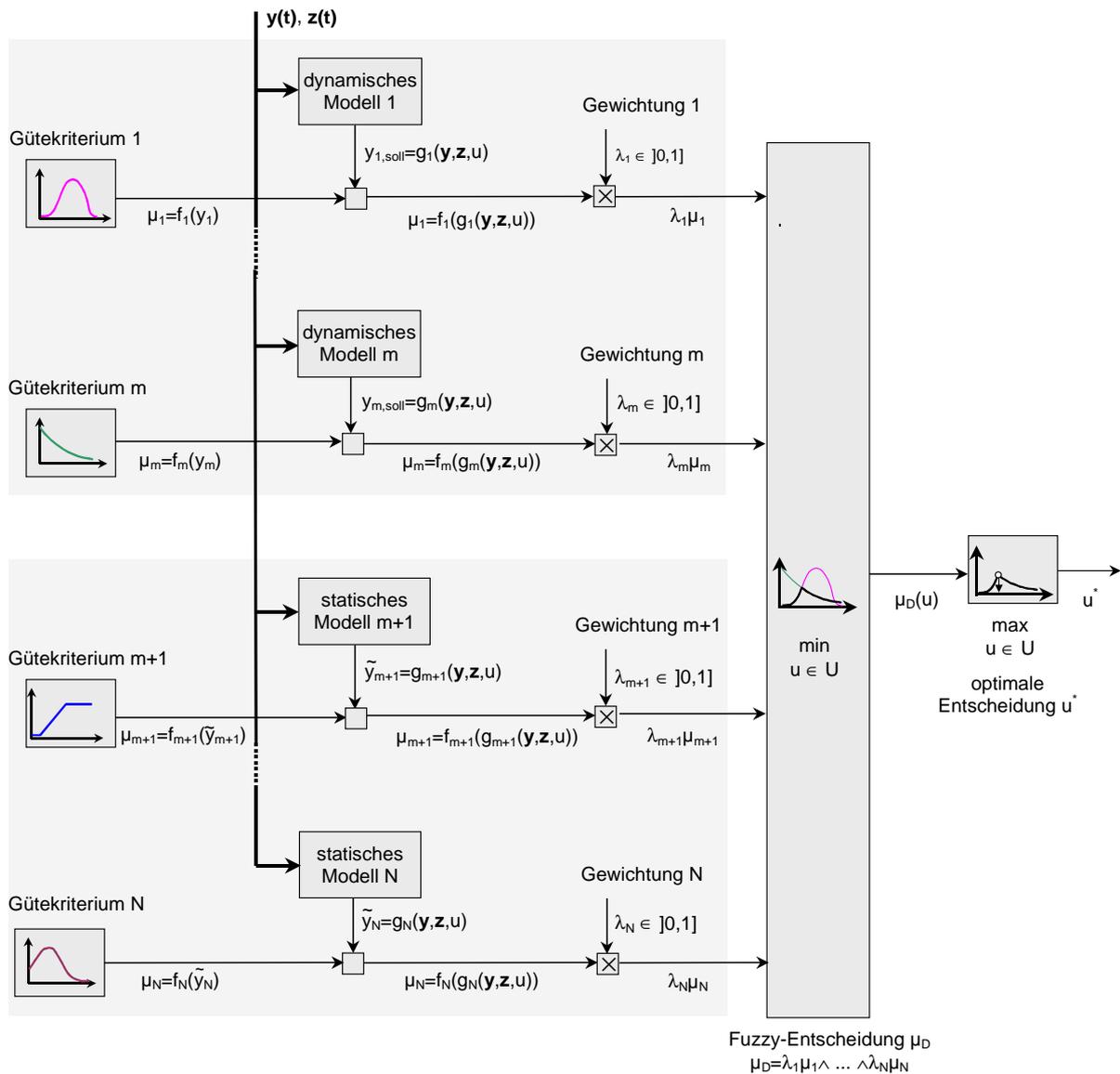


Abb. 3.2-5: Algorithmus zur Optimierung einer Stellgröße  $u$  bezüglich unscharfer Gütekriterien

### 3.2.3 Überlegungen zur Stabilität

Da die Optimierung der Stellgröße  $u$  in einem geschlossenen Kreis erfolgt, ist es notwendig, die Stabilität der Ruhelage zu überprüfen. Ein destabilisierender Einfluß kann insbesondere von den Modellen  $g_1, \dots, g_m$  herrühren, da diese dynamischer Natur sind. Eine Stabilitätsanalyse ist aufgrund des Max-Min-Algorithmus in analytischer Form zwar nicht ohne weiteres möglich, doch kann zumindest der Einfluß der dynamischen Teilmodelle  $g_1, \dots, g_m$  untersucht werden.

Für regelbasierte Fuzzy-Regler, die als nichtlineare statische Kennfeldregler interpretiert werden können, gibt es Verfahren und Ansätze zur Stabilitätsanalyse. Eine Übersicht dazu

wird in [Böhm95, Brett94, Opitz93] vermittelt. Bei einem bekannten mathematischen Modell der Regelstrecke können hier Stabilitätsverfahren der nichtlinearen Regelungstheorie (z. B. Hyperstabilitätstheorie) eingesetzt werden (vgl. z. B. [Föl93, Göll78]). Diese Verfahren können hier jedoch nicht angewandt werden, weil durch die Gleichungen (3.2-23), (3.2-24) kein statisches Kennfeld definiert wird.

Eine separate Untersuchung des Einflusses der dynamischen Teilmodelle  $g_1, \dots, g_m$  bietet sich vor allem dann an, wenn die statischen Teilmodelle  $g_{m+1}, \dots, g_N$  von langsam veränderlichen Größen abhängig sind. Die ZGF  $\mu_{m+1}(g_{m+1}), \dots, \mu_N(g_N)$  führen somit bei quasistationärer Betrachtung und konstanten Wichtungsfaktoren  $\lambda_{m+1}, \dots, \lambda_N$  nach Gleichung (3.2-23) zu einer konstanten Restriktion der dynamischen ZGF  $\mu_1(g_1), \dots, \mu_m(g_m)$ .

Im folgenden werden einige allgemeine Überlegungen zur separaten Untersuchung des Einflusses der dynamischen Teilmodelle  $g_1, \dots, g_m$  vorgestellt. Diese erheben jedoch nicht den Anspruch einer konkreten Stabilitätsuntersuchung.

Über Gleichung (3.2-20)

$$y_{i,\text{soll}} = y_i + \tau_i d_i(\mathbf{y}, \mathbf{z}, u) \equiv g_i(\mathbf{y}, \mathbf{z}, u), \quad i = 1, \dots, m \quad (3.2-20)$$

werden die internen Sollwerte  $y_{i,\text{soll}}$  in Abhängigkeit der aktuellen Werte  $\mathbf{y}(t)$ ,  $\mathbf{z}(t)$  und der zu optimierenden Größe  $u$  berechnet. Durch Auflösen von Gleichung (3.2-20) nach  $u$  wird das Steuergesetz

$$u = g_i^{-1}(\mathbf{y}, \mathbf{z}, y_{i,\text{soll}}), \quad i = 1, \dots, m. \quad (3.2-25)$$

erhalten (vgl. Abb. 3.2-6). Stimmen die Modell-DGL

$$\hat{y}_i = d_i(\mathbf{y}, \mathbf{z}, u), \quad i = 1, \dots, m \quad (3.2-13)$$

exakt mit der Realität überein, so ist der geschlossene Regelkreis stabil, da über die Referenztrajektorie

$$\dot{y}_i = -\frac{1}{\tau_i} (y_i - y_{i,\text{soll}}), \quad i = 1, \dots, m, \quad (3.2-18)$$

die in Gleichung (3.2-20) und (3.2-25) enthalten ist, exponentielles Abklingen des momentanen Wertes  $y_i(t)$  vom internen Sollwert  $y_{i,\text{soll}}$  gefordert wurde. Weil die Modelle in der Regel durch Parameterschwankungen oder Unwissen über die Struktur der Strecke fehlerbehaftet sind, ist die Stabilität des geschlossenen Regelkreises jedoch nicht garantiert.

Eine Möglichkeit zur Stabilitätsuntersuchung besteht darin, die Parameter- bzw. Strukturungenauigkeiten in modifizierten Modellgleichungen

$$\hat{y}_i = d_{\text{mod},i}(\mathbf{y}, \mathbf{z}, u), \quad i = 1, \dots, m \quad (3.2-26)$$

zu erfassen und den Teilregler (3.2-25) in die modifizierten Modellgleichungen (3.2-26) einzusetzen. Die dadurch erhaltenen dynamischen Systeme

$$\hat{y}_i = d_{\text{mod},i}(\mathbf{y}, \mathbf{z}, g_i^{-1}(\mathbf{y}, \mathbf{z}, y_{i,\text{soll}})), \quad i = 1, \dots, m \quad (3.2-27)$$

können nun, ggf. nach Linearisierung, mit konventionellen Methoden auf Stabilität der Ruhelage  $y_{i,\text{soll}}$  untersucht werden. Sind diese Tests erfolgreich verlaufen, so kann das zumindest als Hinweis gewertet werden, daß das Gesamtsystem stabil ist.

Bei der Anwendung des Konzeptes zur Optimierung des Lüftungssollwertes  $LWR_{\text{soll}}$  traten in der simulativen und experimentellen Erprobung keine Stabilitätsprobleme auf (vgl. Kapitel 4). Dies ist auf das zwar nichtlineare, aber im wesentlichen durch Tiefpaßverhalten gekennzeichnete Verhalten des Lüftungsprozesses zurückzuführen (vgl. Gleichungen (2.3-20), (2.3-23), (2.3-26), (2.3-28)).

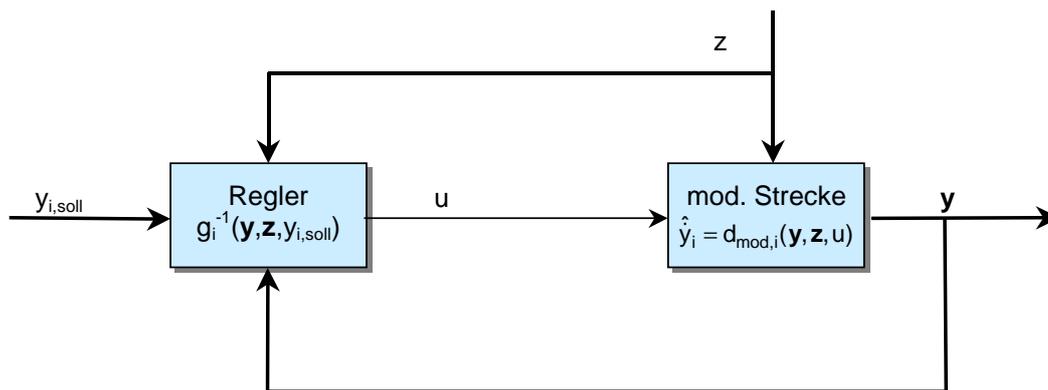


Abb. 3.2-6: Verwendung eines invertierten Teilmoduls  $u = g_i^{-1}(\mathbf{y}, \mathbf{z}, y_{i,\text{soll}})$ ,  $i = 1, \dots, m$  als Regler mit modifiziertem Streckenmodell zur Stabilitätsuntersuchung

### 3.2.4 Bestimmung eines Referenzparameters

Oft ist ein Gütekriterium nur bis auf einen freien Referenzparameter definiert. Bei der Definition des Ökonomiekriteriums in Abschnitt 3.3 beispielsweise wird es notwendig werden, eine Referenzheizleistung anzugeben, um den momentanen Verbrauch bewerten zu können.

Für die Bestimmung des Referenzparameters gibt es mehrere Möglichkeiten. Zum einen kann anhand von Erfahrungswerten ein entsprechender Wert gewählt werden. Oft ist dieses Wissen jedoch nicht verfügbar.

Der Algorithmus, der im folgenden vorgeschlagen wird, geht für eine bestimmte Referenzsituation, die durch einen Referenzzustand  $\mathbf{y}_{\text{ref}}$  und einen Referenzstörvektor  $\mathbf{z}_{\text{ref}}$  definiert

wird, vom gewünschten Optimierungsergebnis  $w_{\text{ref}}^*$  aus und berechnet daraus den freien Parameter. Dies entspricht der Vorgabe eines Referenzpunktes, wie es bei Problemstellungen der interaktiven Fuzzy-Optimierung üblich ist (vgl. z. B. [Sak93]).

Der Einfachheit halber werden im folgenden nur zwei Gütekriterien  $\mu_1(\mathbf{y}, \mathbf{z}, w)$  und  $\mu_2(\mathbf{y}, \mathbf{z}, w, c)$  betrachtet. In  $\mu_2$  sei der Parameter  $c$  zu bestimmen. Die optimale Entscheidung  $w^*$  berechnet sich bei gleicher Wichtung der Gütekriterien über

$$\mu_D(\mathbf{y}, \mathbf{z}, w^*) = \max_w \min_w (\mu_1(\mathbf{y}, \mathbf{z}, w), \mu_2(\mathbf{y}, \mathbf{z}, w, c)). \quad (3.2-28)$$

Der Max-Min-Algorithmus aus Gleichung (3.2-28) entspricht bei genügend feiner Diskretisierung von  $w$  der Schnittpunktbestimmung von  $\mu_1(w)$  und  $\mu_2(w)$  bei konstanten Werten  $\mathbf{y}_{\text{ref}}$  und  $\mathbf{z}_{\text{ref}}$  (vgl. Abb. 3.2-7). Dies wird über die Gleichung

$$\mu_1(\mathbf{y}_{\text{ref}}, \mathbf{z}_{\text{ref}}, w_{\text{ref}}^*) = \mu_2(\mathbf{y}_{\text{ref}}, \mathbf{z}_{\text{ref}}, w_{\text{ref}}^*, c) \quad (3.2-29)$$

ausgedrückt, wobei der Schnittpunkt zu  $w_{\text{ref}}^*$  angenommen wurde. Zur Berechnung des Parameters  $c$  wird der Ausdruck (3.2-29) nach  $c$  aufgelöst.

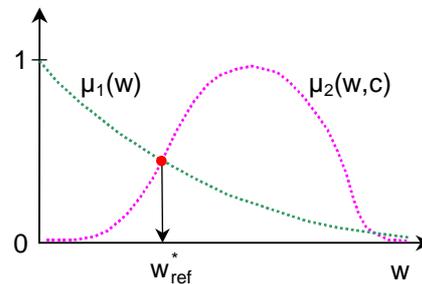


Abb. 3.2-7: Vorgabe eines Referenzpunktes  $w_{\text{ref}}^*$  zur Bestimmung des freien Parameters  $c$

### 3.3 Definition der Gütekriterien

Die den Raumklimazustand beeinflussenden Heizungs- und Lüftungsvorgänge können mit verschiedenen Gütekriterien bewertet werden. Dies sind vor allem Komfort- und Ökonomiekriterien, welche realitätsnah durch ZGF beschrieben werden können. Es erweist sich hier als besonders sinnvoll, daß im Konzept des Fuzzy Decision Making Gütekriterien und Restriktionen in vollkommen symmetrischer Weise behandelt werden (vgl. Abschnitt 2.2), da beispielsweise das Ökonomiekriterium eher einer Restriktion entspricht, je nach Blickwinkel jedoch auch als Gütekriterium betrachtet werden kann. Auch einige der Komfortkriterien sind eher als Restriktionen anzusehen. Beispielsweise sollte die relative Feuchte  $\varphi_i$  etwa zwischen 30 % und 65 % liegen, Werte kleiner als 30 % oder größer als 65 % entsprechen einem niedrigem Komfortniveau (vgl. Abschnitt 2.4).

Besonders nützlich ist die Gleichbehandlung von Zielen und Restriktionen hier deshalb, weil die durch UND-Verknüpfung der Ziele  $\mu_{G,i}$  ( $i=1,\dots,m$ ) und Restriktionen  $\mu_{C,j}$  ( $j=1,\dots,m$ ) entstehende Fuzzy-Entscheidung  $\mu_D$

$$\mu_D(x) = \mu_{G,1}(x) \wedge \dots \wedge \mu_{G,n}(x) \wedge \mu_{C,1}(x) \wedge \dots \wedge \mu_{C,m}(x) \quad (2.2-4)$$

dem vom Menschen verbal formulierten Ziel nahe kommt. Die Entscheidung  $\mu_D(x)$  hat nach Gleichung (2.2-4) nur dann einen Zugehörigkeitsgrad  $\alpha$ , wenn alle Kriterien  $\mu_{G,i}$ ,  $\mu_{C,i}$  mindestens gleich oder größer als  $\alpha$  sind. Dies läßt sich sehr gut auf die Modellierung der Ökonomie- und Komfortkriterien übertragen. Der Prozeß wird dann als optimal bewertet, wenn alle Kriterien einen bestimmten minimalen Zugehörigkeitsgrad besitzen.

In den folgenden Unterabschnitten werden die Komfortkriterien (s. 3.3.1) und das Ökonomiekriterium (s. 3.3.2) eingeführt sowie die Grenzen der vorgeschlagenen Modellierung der Gütekriterien diskutiert (s. 3.3.3).

#### 3.3.1 Komfortkriterien

Zur Definition der Komfort-ZGF muß das Behaglichkeitsempfinden des Menschen betrachtet werden, welches jedoch, wie in Abschnitt 2.4 dargestellt, von einer Vielzahl von Faktoren abhängt und individuell sehr unterschiedlich sein kann. Zum einen ist das Komfortniveau abhängig von physikalischen Größen wie Temperatur der Luft und Umgebungsflächen, Luftfeuchte, Luftqualität, Sonneneinstrahlung, Helligkeit, Temperaturprofil im Raum und Luftbewegung. Zum anderen spielen individuelle Faktoren wie Bekleidung, Aktivität, Geschlecht, Alter, Konstitution und Gesundheit eine Rolle. Nun sind aus dieser Vielzahl von Kriterien diejenigen auszuwählen, welche durch Heizung und Lüftung einflußbar und durch

geeignete, auch im Haus- und Bürobereich einsetzbare Sensorik meßbar bzw. schätzbar sind. Dies sind besonders die folgenden Größen:

- Temperatur der Luft und Umgebungsflächen
- Zugscheinungen bei Fensterlüftung
- relative Feuchte
- Luftqualität (CO<sub>2</sub>-Gehalt/Mischgas)

Wie in Abschnitt 2.4 näher ausgeführt wurde, sind in der Klimatechnik folgende Grenzen zur thermischen Behaglichkeit und Luftqualität definiert:

$$\text{Empfundene Temperatur} \quad 20 \text{ °C} < T_{\text{op}} < 24 \text{ °C} \quad (3.3-1)$$

$$\text{relative Feuchte} \quad 30 \% < \varphi_i < 65 \% \quad (3.3-2)$$

$$\text{Luftqualität} \quad \text{CO}_{2i} < 1000 \text{ ppm} \quad (3.3-3)$$

$$\text{Zugscheinungen} \quad 20 \text{ W/m}^2 < \dot{q}_{\text{zug}} < 40 \text{ W/m}^2 \quad (3.3-4)$$

Da es bisher keine standardisierten Mischgassensoren zur Messung der Luftqualität gibt, können für Mischgas keine allgemeingültigen Werte angegeben werden. Prinzipiell ist das Verhalten jedoch analog zu CO<sub>2i</sub>, d.h. mit steigendem Ausgangssignal sinkt die Luftqualität. Daher wird im folgenden nur CO<sub>2i</sub> betrachtet, die Ergebnisse lassen sich jedoch übertragen und werden in Kapitel 4 bei der Darstellung der Ergebnisse auch berücksichtigt.

Da die Grenzwerte in (3.3-1) - (3.3-4) natürlich nur Richtwerte darstellen, erscheint eine Beschreibung über Fuzzy-ZGF als sinnvoll. Unter der hier zulässigen Annahme einer entkoppelten Betrachtung der Komfort-Zugehörigkeit in Abhängigkeit von  $T_{\text{op}}$ ,  $\varphi_i$  und CO<sub>2i</sub> lassen sich beispielsweise die in Abb. 3.3-1 dargestellten Komfort-ZGF definieren. Der Vergleich mit binären ZGF (gestrichelte Kurven) der klassischen Logik verdeutlicht die weitaus realistischere, dem Menschen angepaßtere Gütebewertung auf der Grundlage von Fuzzy-Logik. Durch Verschieben der wesentlichen ZGF-Parameter läßt sich das Komfortkriterium an das individuelle Empfinden des Nutzers einfach anpassen. Dies kann z. B. durch Verstellen der minimalen bzw. optimalen empfundenen Temperatur  $T_{\text{min}}$ ,  $T_{\text{opt}}$ , der unteren bzw. oberen Grenze der relativen Feuchte  $\varphi_{\text{min}}$ ,  $\varphi_{\text{max}}$  sowie des optimalen bzw. maximalen CO<sub>2</sub>-Gehaltes CO<sub>2opt</sub>, CO<sub>2max</sub> bewirkt werden (vgl. Abb. 3.3-1). Auch die Form der ZGF kann individuell angepaßt werden. Oft sind stückweise lineare ZGF ausreichend, da der wesentliche Informationsgehalt im Support und den Maxima der ZGF liegt.

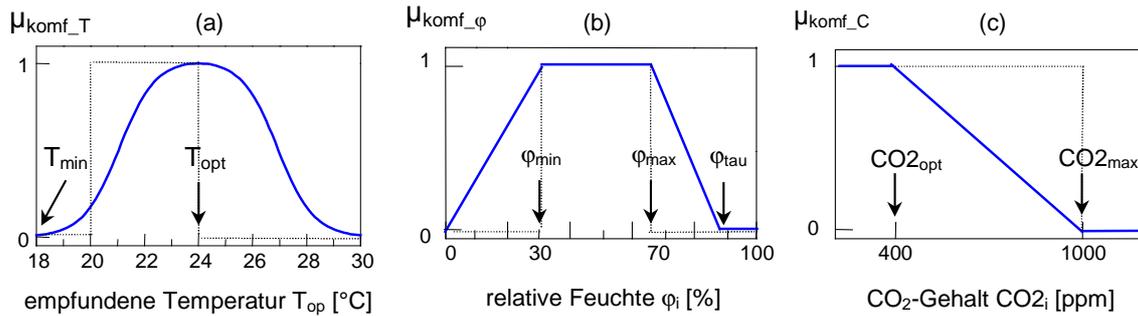


Abb. 3.3-1: Mögliche Komfort-ZGF bezüglich empfundener Temperatur (a), relativer Feuchte (b) und CO<sub>2</sub>-Gehalt (c)

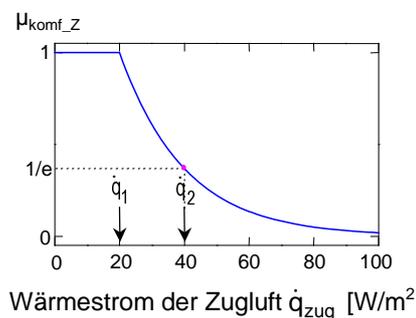


Abb. 3.3-2: Mögliche Komfort-Zugehörigkeitsfunktion zur Zugfreiheit

Die Komfort-ZGF  $\mu_{\text{kompf\_Z}}$  bezüglich Zugfreiheit (Abb. 3.3-2) wurde mit den Kennwerten  $\dot{q}_1 = 20 \text{ W/m}^2$ ,  $\dot{q}_2 = 40 \text{ W/m}^2$  konstruiert über

$$\mu_{\text{kompf\_Z}}(\dot{q}_{\text{zug}}) = \begin{cases} 1 & \text{für } \dot{q}_{\text{zug}} < \dot{q}_1 \\ e^{-(\dot{q}_{\text{zug}} - \dot{q}_1)/(\dot{q}_2 - \dot{q}_1)}, & \text{für } \dot{q}_{\text{zug}} \geq \dot{q}_1 \end{cases} \quad (3.3-5)$$

Dabei wird für  $\dot{q}_{\text{zug}} = \dot{q}_2$  ein Zugehörigkeitsgrad von  $1/e \approx 0.37$  angenommen. Da diese exponentiell abfallende ZGF niemals den Wert Null annimmt, werden hier keine Bereiche von  $\dot{q}_{\text{zug}}$  ausgeschlossen. Wenn Wärmeleistungen  $\dot{q}_{\text{zug}}$ , die größer als ein Schwellwert  $\dot{q}_{\text{max}}$  sind, als verboten gelten sollen, so muß die ZGF so definiert werden, daß  $\mu_{\text{kompf\_Z}} = 0$  ist für  $\dot{q}_{\text{zug}} > \dot{q}_{\text{max}}$ . Dies kann mit einer linear fallenden ZGF erfolgen (Abb. 3.3-3).

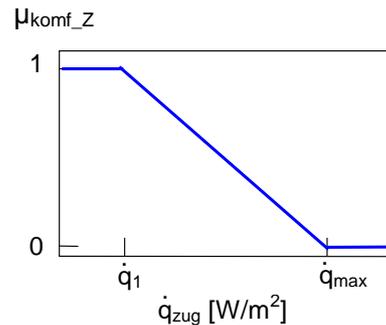


Abb. 3.3-3: Mögliche Komfort-Zugehörigkeitsfunktion zur Zugfreiheit mit dem verbotenen Bereich  $\dot{q}_{\text{zug}} > \dot{q}_{\text{max}}$

### 3.3.1.1 Taupunktparameter

Der Parameter  $\varphi_{\text{tau}}$  der Komfort-ZGF bezüglich relativer Feuchte (vgl. Abb. 3.3-1,b) kennzeichnet einen kritischen Wert der relativen Feuchte  $\varphi_i$  im Raum. Bei kalten Wänden kondensiert für  $\varphi_i > \varphi_{\text{tau}}$  Wasser an den Wänden, was zu Schimmel und anderen Bauwerksschäden führen kann.

Der Parameter  $\varphi_{\text{tau}}$  ist abhängig von den aktuellen Werten der Raum- und Wandtemperatur. Diese Abhängigkeit wird im folgenden abgeleitet. Unter der Annahme, daß die Luft im Raum gleichmäßig durchmischt ist und somit der absolute Wassergehalt im Raum und in Wandnähe gleich  $x_i$  ist und sich lediglich die mittlere Raumtemperatur  $T_i$  und die Wandtemperatur  $T_w$  unterscheiden, gilt nach Gleichung (2.3-7) folgende Beziehung:

$$x_i = \varphi_i x_{\text{max}}(T_i) = \varphi_w x_{\text{max}}(T_w) \quad (3.3-6)$$

Dabei bezeichnet  $\varphi_i$  die relative Feuchte im Raum und  $\varphi_w$  die relative Feuchte in Wandnähe. Der Taupunkt liegt bei  $\varphi_w = 100\%$ . Damit ergibt sich

$$\varphi_i \Big|_{\varphi_w=100\%} = \frac{x_{\text{max}}(T_w)}{x_{\text{max}}(T_i)}. \quad (3.3-7)$$

Somit berechnet sich die maximal zulässige Feuchte  $\varphi_{\text{tau}}$  im Raum zu

$$\varphi_{\text{tau}} = \frac{x_{\text{max}}(T_w)}{x_{\text{max}}(T_i)}. \quad (3.3-8)$$

Die Wandtemperatur  $T_w$  wird in Abhängigkeit des k-Wertes der Außenwand, des Wärmeübergangskoeffizienten  $\alpha$  und der Temperaturen innen und außen  $T_i$ ,  $T_a$  geschätzt über

$$\hat{T}_w = T_i - \frac{k}{\alpha}(T_i - T_a) \quad (2.3-40)$$

Durch Einsetzen der Modellgleichung (2.3-40) in (3.3-8) ist ersichtlich, daß  $\varphi_{\text{tau}}$  abhängig von  $T_i$  und  $T_a$  ist.

Zahlenbeispiel:  $k = 1 \text{ W/m}^2/\text{K}$ ,  $\alpha = 5 \text{ W/m}^2/\text{K}$ ,  $T_a = -10 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $T_i = 20 \text{ }^\circ\text{C} \Rightarrow T_w = 14 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $\varphi_{\text{tau}} = 66 \%$

Wie das Zahlenbeispiel zeigt, kann bei extrem niedrigen  $T_a$ -Werten  $\varphi_{\text{tau}}$  kleiner als 70 % sein, so daß dann auch der Parameter  $\varphi_{\text{max}}$  kleiner als in Abb. 3.3-1,b gewählt werden muß. Dies läßt sich beispielsweise durch folgende Vorschrift realisieren:

$$\varphi_{\text{max}} = \begin{cases} 65\%, & \text{für } \varphi_{\text{tau}} > 70 \\ \varphi_{\text{tau}} - 5\%, & \text{für } \varphi_{\text{tau}} \leq 70 \end{cases} \quad (3.3-9)$$

### 3.3.1.2 Weitere mögliche Komfortkriterien

Ein weiteres mögliches Komfortkriterium liegt im Bereich der akustischen Behaglichkeit, da die Lüftung u. U. mit unangenehmen Geräuschen verbunden ist. Bei Ventilatorlüftung wird Lärm direkt durch die Motorgeräusche verursacht, bei Fensterlüftung kann Lärmbelästigung von außen hervorgerufen werden. Diese Kriterien werden hier jedoch nicht berücksichtigt, zum einen, um die Komplexität der Leitkomponente zu begrenzen, zum anderen, da in der verwendeten Testumgebung keine Lärmbelästigung mit der Lüftung verbunden war und somit keine Möglichkeit der Validierung bestanden hat.

### 3.3.2 Ökonomiekriterium

Neben dem Bedürfnis nach maximalem Komfort möchte der Nutzer auch, daß der Betrieb von Heizung und Lüftung möglichst ökonomisch verläuft. Es wird also eine Zugehörigkeitsfunktion  $\mu_{\text{öko}}$  benötigt, die den Ökonomiegrad der Heizungs-Lüftungsanlage in Abhängigkeit von der Heizleistung beschreibt. Die Kosten für bestimmte Sollwerte zu  $T_i$  und LWR resultieren unmittelbar aus der dafür erforderlichen Heizleistung  $\dot{Q}_{\text{Heiz}}$ . Daher ist es sinnvoll, eine ZGF  $\mu_{\text{öko}}(\dot{Q}_{\text{Heiz}})$  zu definieren, die monoton fallend ist und folgenden Bedingungen genügt:

$$\mu_{\text{öko}}(\dot{Q}_{\text{Heiz}} = 0) = 1 \quad (3.3-10)$$

$$\mu_{\text{öko}}(\dot{Q}_{\text{Heiz}} \gg \dot{Q}_{\text{ref}}) \approx 0 \quad (3.3-11)$$

In Gleichung (3.3-11) ist  $\dot{Q}_{\text{ref}}$  eine bestimmte Referenzleistung. Es eignet sich beispielsweise der Ansatz einer abfallenden Exponentialfunktion:

$$\mu_{\text{öko}} = e^{-\dot{Q}_{\text{Heiz}}/\dot{Q}_{\text{ref}}} \quad (3.3-12)$$

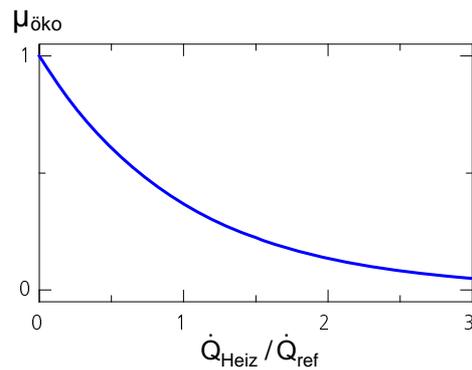


Abb. 3.3-4: Mögliche Ökonomie-Zugehörigkeitsfunktion in Abhängigkeit von der Heizleistung  $\dot{Q}_{\text{Heiz}}$  und einer wählbaren Referenzleistung  $\dot{Q}_{\text{ref}}$

Obwohl der Ansatz (3.3-12) einer gewissen Willkür unterliegt, ist es wichtig, daß  $\mu_{\text{öko}}$  nicht identisch Null wird ab einer bestimmten maximalen Leistung  $\dot{Q}_{\text{Heiz}} > \dot{Q}_{\text{max}}$ . Alle Werte  $\dot{Q}_{\text{Heiz}}$  mit

$$\{\dot{Q}_{\text{Heiz}} \mid \mu_{\text{öko}}(\dot{Q}_{\text{Heiz}}) = 0\} \quad (3.3-13)$$

sind "verbotene" Werte, d.h. sie werden durch den Algorithmus des Fuzzy Decision Making automatisch nicht berücksichtigt. Ein Beispiel einer solchen Ökonomie-ZGF mit Beschränkung auf eine maximale Heizleistung  $\dot{Q}_{\text{max}}$  ist in Abb. 3.3-5 dargestellt.

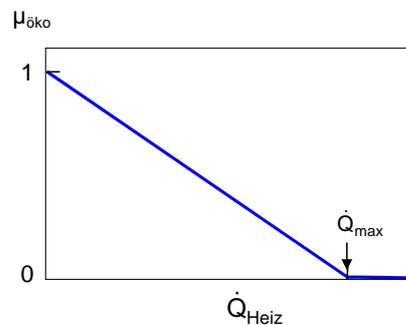


Abb. 3.3-5: Ökonomie-Zugehörigkeitsfunktion mit maximal zulässiger Heizleistung  $\dot{Q}_{\text{max}}$

### 3.3.3 Grenzen des Ansatzes

Obwohl die hier vorgeschlagene Modellierung des menschlichen Behaglichkeitsempfindens durch Fuzzy-ZGF bereits eine sehr viel bessere Qualität erreicht als bei Anwendung von binären ZGF, d.h. einfachen Grenzwerten, ist offensichtlich, daß auch Fuzzy-ZGF die Realität nicht genügend genau abbilden können. Das hat folgende Gründe:

- Das Behaglichkeitsempfinden unterliegt tages- und jahreszeitlichen Schwankungen, die bisher erst in Ansätzen erforscht sind [May89].
- Die vom Menschen empfundene Luftqualität kann mit CO<sub>2</sub>- und Mischgassensoren nur annähernd erfaßt werden. Sensorik, die dem Geruchssinn der Nase entsprechen, gibt es zur Zeit noch nicht [Fit97].
- Zur Berücksichtigung der empfundenen Temperatur T<sub>op</sub> müssen eigentlich Konvektions- und Strahlungseinflüsse in der Umgebung des Menschen berücksichtigt werden. Solche Sensoren gibt es bisher nur als Prototypen (MAYER's "künstliche Haut", [May88, Now96]).

Weiter ist zu berücksichtigen, daß die Toleranz gegenüber zeitlichen Schwankungen der einzelnen Gütemaße unterschiedlich ist. Während bei der empfundenen Temperatur, bei Zugscheinungen und bei der Verschlechterung der Luftqualität beispielsweise durch Zigarettenrauch einige Minuten bereits als zu lange empfunden werden, sind bezüglich der relativen Feuchte kurzzeitige Schwankungen als nicht so kritisch einzustufen.

### 3.4 Optimierung des Temperatursollwertes

Nachdem in Abschnitt 3.2 das Optimierungskonzept vorgestellt und in Abschnitt 3.3 die Komfort- und Ökonomie-ZGF eingeführt wurden, ist die Optimierung des Temperatursollwertes

$$w = T_{i,soll} \quad (3.4-1)$$

Gegenstand dieses Abschnitts. Dabei wird vorausgesetzt, daß ein unterlagerter Temperaturregler existiert, der die Einstellung der ausgegebenen Führungsgröße T<sub>i,soll</sub> übernimmt.

Zur Optimierung von T<sub>i,soll</sub> wird der in Unterabschnitt 3.2.1 entwickelte Algorithmus der statischen Optimierung angewandt. Der Formalismus wird in den folgenden Gleichungen zusammengefaßt:

$$\mu_i = f_i(y_i), \quad i = 1, \dots, N \quad (3.2-1)$$

$$\hat{y}_i = g_i(\mathbf{y}, \mathbf{z}, w), \quad i = 1, \dots, N \quad (3.2-7)$$

$$\mu_D(\mathbf{y}, \mathbf{z}, w) = \bigwedge_{i=1}^N \lambda_i \mu_i(g_i(\mathbf{y}, \mathbf{z}, w)), \quad 0 < \lambda_i \leq 1 \quad (3.2-9)$$

$$\mu_D(\mathbf{y}, \mathbf{z}, w^*) = \max_{w \in W} \mu_D(\mathbf{y}, \mathbf{z}, w) \quad (3.2-10)$$

Zur Anwendung des Algorithmus ist der Definitionsbereich von  $w = T_{i,\text{sol}}l$  zu diskretisieren, z. B.  $w \in \{16,16.2, \dots, 28\}$  °C.

In Abschnitt 3.3 wurden beispielhaft die in Abb. 3.4-1 gezeigten Komfort- und Ökonomie-ZGF eingeführt. In Abb. 3.4-1 links ist das Komfort-Kriterium  $\mu_{\text{kompf}_T}$  in Abhängigkeit von der empfundenen Temperatur  $T_{\text{op}}$  und rechts das Ökonomie-Kriterium  $\mu_{\text{öko}}$  als Funktion der aufzuwendenden Heizleistung  $\dot{Q}_{\text{Heiz}}$  dargestellt. Die Referenzleistung  $\dot{Q}_{\text{ref}}$  ist ein noch festzulegender Parameter. Eine Methode zur Bestimmung von  $\dot{Q}_{\text{ref}}$  wird in Unterabschnitt 3.4.3 angegeben.

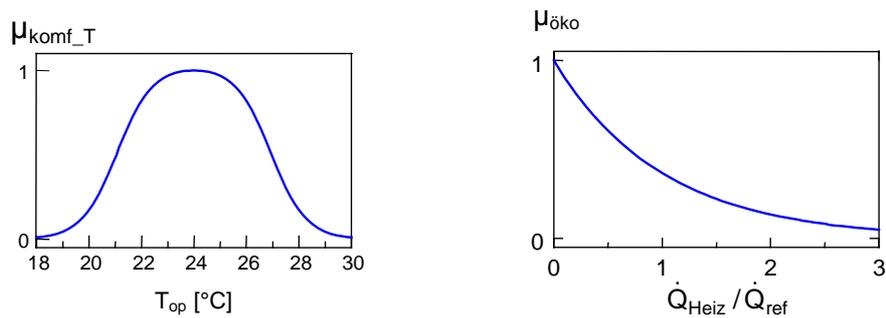


Abb. 3.4-1: Komfort-ZGF bezüglich der empfundenen Temperatur  $T_{\text{op}}$  (links) und Ökonomie-ZGF (rechts)

Entsprechend den definierten Gütekriterien und der Notation in Gleichung (3.2-1) werden folgende Bezeichnungen eingeführt:

$$\begin{aligned} y_1 &\equiv T_{\text{op}}, & \mu_1 &\equiv \mu_{\text{kompf}_T} = f_1(y_1) \\ y_2 &\equiv \dot{Q}_{\text{Heiz}}, & \mu_2 &\equiv \mu_{\text{öko}} = f_2(y_2) \end{aligned} \quad (3.4-2)$$

Der Berechnungsablauf der Gleichungen (3.2-1), (3.2-7), (3.2-9), (3.2-10) ist schematisch in Abb. 3.4-2 dargestellt. Die Parameter  $\lambda_1$  und  $\lambda_2$  zur Wichtung der Gütekriterien werden aus dem Parameter  $\lambda$  abgeleitet, der der Schieberstellung entspricht:

$$\lambda_1 = (1 - \lambda), \quad \lambda_2 = \lambda, \quad 0 < \lambda < 1. \quad (2.2-20)$$

Dabei wird mit  $\lambda \rightarrow 1$  das Ökonomiekriterium und mit  $\lambda \rightarrow 0$  das Komfortkriterium maximal gewichtet. Die Werte  $\lambda = 0$  und  $\lambda = 1$  sind auszuschließen, da dies den Parametern  $\lambda_1 = 0$  bzw.  $\lambda_2 = 0$  entspricht und somit die Fuzzy-Entscheidung  $\mu_D$  identisch Null wird. Mit  $\mu_D \equiv 0$  ist jedoch keine Entscheidungsfindung möglich (vgl. 2.2.3.6).

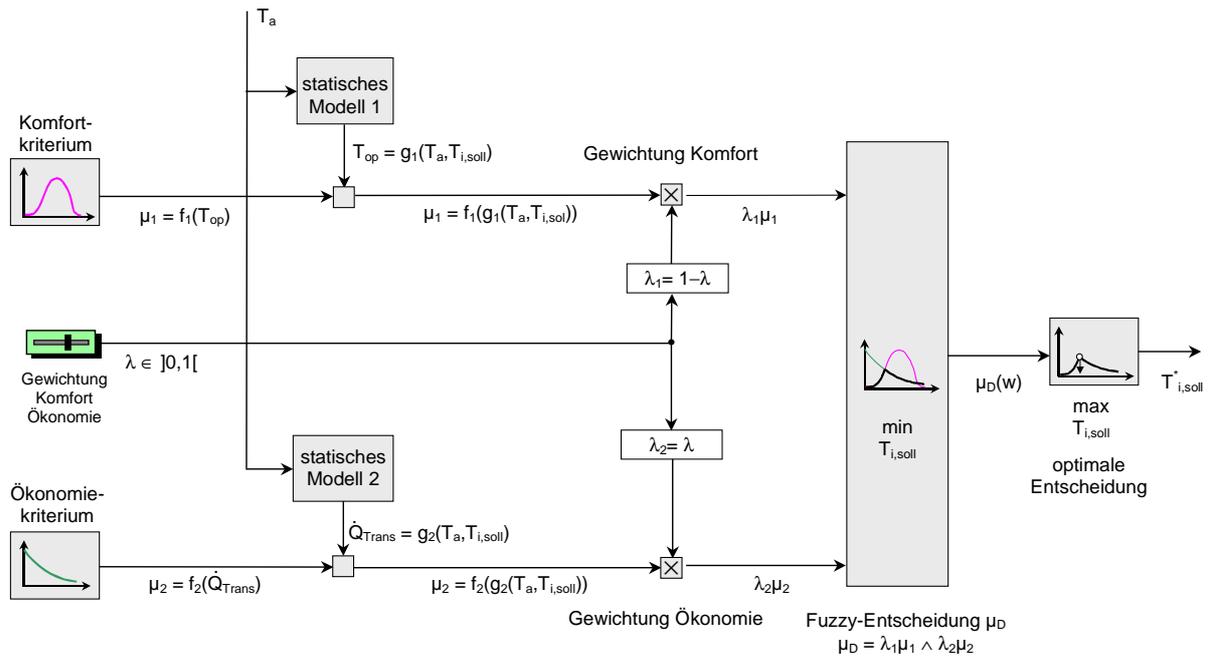


Abb. 3.4-2: Schematische Darstellung des Berechnungsablaufes bei der Optimierung des Innentemperatursollwertes  $T_{i,soll}$

Nun sind nach Gleichung (3.2-7) die Modellgleichungen  $\hat{y}_i = g_i(\mathbf{y}, \mathbf{z}, w)$ , ( $i=1,2$ ) aufzustellen. Es sind also folgende Zusammenhänge gesucht:

$$T_{op} = g_1(\mathbf{y}, \mathbf{z}, w = T_{i,soll}) \quad (3.4-3)$$

$$\dot{Q}_{Heiz} = g_2(\mathbf{y}, \mathbf{z}, w = T_{i,soll}) \quad (3.4-4)$$

Der Entwicklung dieser Zusammenhänge widmen sich die beiden folgenden Unterabschnitte. Dabei wird auf die in Abschnitt 2.3 diskutierten physikalischen Grundlagen zurückgegriffen.

### 3.4.1 Modell der empfundenen Temperatur

Gegenstand dieses Unterabschnitts ist die Entwicklung eines einfachen statischen Modells der empfundenen Temperatur  $T_{op}$  (Gleichung (3.4-3)). Dazu werden die Definitionsgleichungen von  $T_{op}$  und der Strahlungstemperatur  $T_r$  herangezogen (vgl. Abschnitt 2.4):

$$T_r = \frac{\sum_k A_k T_k}{\sum_k A_k} \quad (2.4-1)$$

$$T_{op} = 0.5(T_i + T_r) \quad (2.4-2)$$

Die Temperaturen  $T_k$  der Wände, Fenster und Heizkörper des Raumes sind i. a. jedoch nicht bekannt. Daher ist es zweckmäßig, von der stark vereinfachten Vorstellung auszugehen, daß die Temperaturen aller Innenwände gleich der Lufttemperatur des Raumes sind, so daß nur die Temperatur der Außenwand zu bestimmen ist. Es werden folgende Variablen eingeführt:

$T_w$ : Temperatur der Innenseite der Außenwand

$A_a$ : Fläche der Außenwand

$A_{ges}$ : Summe aller Umschließungsflächen

Somit ergibt sich für  $T_r$  folgender Zusammenhang:

$$T_r = \frac{\sum_k A_k T_k}{\sum_k A_k} = \frac{A_a T_w + (A_{ges} - A_a) T_i}{A_{ges}} \quad (3.4-5)$$

Die Wandtemperatur  $T_w$  wird durch das statische Modell

$$T_w = T_i - \frac{k}{\alpha} (T_i - T_a) \quad (2.3-40)$$

geschätzt (vgl. Abschnitt 2.3). Einsetzen dieser Gleichung in (3.4-5) ergibt

$$T_r = (1 - 2\varepsilon) T_i + 2\varepsilon T_a, \quad \varepsilon = \frac{k A_a}{2\alpha A_{ges}}. \quad (3.4-6)$$

Der Parameter  $\varepsilon$  kann als normierter Wärmedurchgangskoeffizient der Außenwand interpretiert werden. Mit  $A_a/A_{ges} \approx 1/6$ ,  $\alpha = 5 \text{ W/m}^2$  und den k-Werten aus Tabelle 2.3-1 ergeben sich Werte  $\varepsilon = 0.01 \dots 0.05$ .

Einsetzen von Gleichung (3.4-6) in  $T_{op} = 0.5(T_i + T_r)$  (Gleichung (2.4-2)) liefert eine Beziehung der empfundenen Temperatur  $T_{op}$  in Abhängigkeit von  $T_i$  und  $T_a$ :

$$T_{op} = (1 - \varepsilon) T_i + \varepsilon T_a, \quad \varepsilon = \frac{k A_a}{2\alpha A_{ges}} \quad (3.4-7)$$

In Abb. 3.4-3 ist  $T_{op}$  als Funktion von  $T_a$  für unterschiedlich gut isolierte Wände bei  $T_i = 20 \text{ }^\circ\text{C}$  aufgetragen. Es ist ersichtlich, daß für den Fall  $k = 1 \text{ W/m}^2/\text{K}$ , dies entspricht guter Isolation,  $T_{op}$  nicht sehr von  $T_i$  abweicht und für  $k = 3 \text{ W/m}^2/\text{K}$  bereits eine Differenz von bis zu  $1.5 \text{ }^\circ\text{C}$  zwischen  $T_{op}$  und  $T_i$  besteht. Bei ideal isolierter Außenwand, d.h.  $k = 0$  und somit  $\varepsilon = 0$ , folgt  $T_{op} = T_i$ .

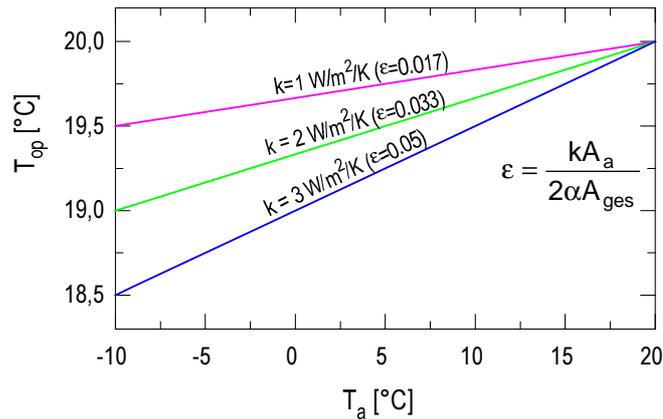


Abb. 3.4-3: Empfundene Temperatur  $T_{op}$  als Funktion der Außentemperatur  $T_a$  bei  $T_i = 20\text{ °C}$ ,  $A_a/A_{ges} = 1/6$ ,  $\alpha = 5\text{ W/m}^2/\text{K}$  für unterschiedlich isolierte Wände

Nun wird in Gleichung (3.4-7) der tatsächliche Temperaturwert  $T_i$  durch den zu optimierenden Sollwert  $w = T_{i,soll}$  ersetzt und  $z = T_a$  als Störgröße eingeführt. Dies führt auf die in (3.4-3) gesuchte Modellgleichung

$$T_{op} = g_1(z, w) = (1 - \varepsilon)w + \varepsilon z. \quad (3.4-8)$$

Durch Einsetzen von Gleichung (3.4-8) in  $\mu_{komf\_T}(T_{op})$  wird  $\mu_{komf\_T}$  eine Funktion von  $w = T_{i,soll}$  und  $z = T_a$ . Diese Funktion ist in Abb. 3.4-4 dargestellt. Dabei wurde  $\mu_{komf\_T}(T_{op})$  aus Abb. 3.4-1 zugrunde gelegt und  $\varepsilon = 0.05$  gesetzt. Dies entspricht einer schlecht isolierten Wand. In Abb. 3.4-4 ist zu erkennen, daß sich die Kurve für kleiner werdende  $T_a$ -Werte zu höheren  $T_{i,soll}$ -Werten verschiebt. Um also bei kleiner werdendem  $T_a$  einen bestimmten Wert von  $T_{op}$  zu halten, muß  $T_{i,soll}$  erhöht werden. Physikalisch entspricht dies dem Ausgleich der Strahlungsverluste des Menschen, die durch die kälter werdende Außenwand entstehen.

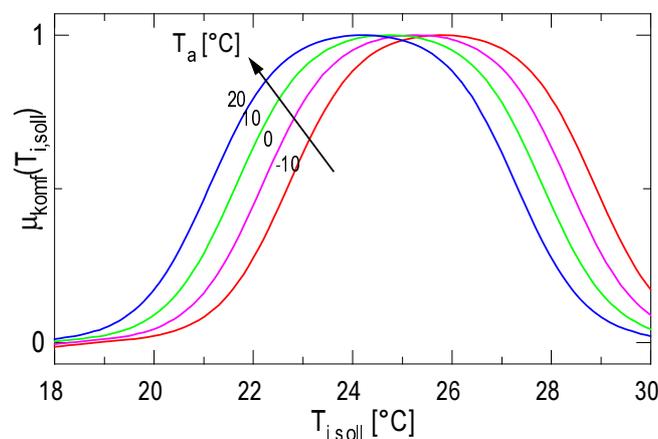


Abb. 3.4-4: Komfort-ZGF in Abhängigkeit des Temperatursollwertes  $T_{i,soll}$  und der Außentemperatur  $T_a$  für den Fall einer schlecht isolierten Wand ( $\varepsilon = 0.05$ )

### 3.4.2 Modell der Heizleistung

Ziel dieses Unterabschnitts ist die Entwicklung eines einfachen statischen Modells für die Heizleistung  $\dot{Q}_{\text{Heiz}}$  (Gleichung (3.4-4)). Wie in Abschnitt 2.3 diskutiert, setzt sich die in den Raum eingebrachte Wärmeleistung  $\dot{Q}$  aus der Heizleistung  $\dot{Q}_{\text{Heiz}}$ , solaren und internen Wärmegewinnen  $\dot{Q}_{\text{solar}}$ ,  $\dot{Q}_{\text{int}}$  sowie Lüftungs- und Transmissionsverlusten  $\dot{Q}_{\text{Lüft}}$ ,  $\dot{Q}_{\text{Trans}}$  zusammen:

$$\dot{Q} = (\dot{Q}_{\text{Heiz}} + \dot{Q}_{\text{solar}} + \dot{Q}_{\text{int}}) - (\dot{Q}_{\text{Lüft}} + \dot{Q}_{\text{Trans}}). \quad (2.3-8)$$

Im stationären Fall ( $\dot{Q} = 0$ ) berechnet sich  $\dot{Q}_{\text{Heiz}}$  somit über

$$\dot{Q}_{\text{Heiz}} = \underbrace{\dot{Q}_{\text{Lüft}} + \dot{Q}_{\text{Trans}}}_{\text{Verluste}} - \underbrace{(\dot{Q}_{\text{solar}} + \dot{Q}_{\text{int}})}_{\text{Gewinne}} \quad (3.4-9)$$

Im folgenden wird davon ausgegangen, daß der Term  $\dot{Q}_{\text{solar}}$  einen vernachlässigbaren Beitrag zur Heizleistung  $\dot{Q}_{\text{Heiz}}$  darstellt. Diese Vereinfachung ist nicht prinzipieller Natur, sondern wird hier getroffen, um das Konzept zunächst auf die wesentlichen Elemente zu beschränken.

Auch die internen Gewinne  $\dot{Q}_{\text{int}}$  werden im folgenden nicht berücksichtigt, da  $\dot{Q}_{\text{int}}$  zumindest in Büro- und Wohnräumen zum größten Teil der Wärmeabgabe von elektrischen Geräten entspricht. Da diese Energie ebenso wie die Heizenergie bezahlt werden muß, ist es sinnvoll, den Term bei der Abschätzung von  $\dot{Q}_{\text{Heiz}}$  nicht den (kostenlosen) Wärmegewinnen zuzurechnen, sondern wegzulassen. Somit ergibt sich als obere Abschätzung für  $\dot{Q}_{\text{Heiz}}$ :

$$\dot{Q}_{\text{Heiz}} = \dot{Q}_{\text{Lüft}} + \dot{Q}_{\text{Trans}} \quad (3.4-10)$$

$\dot{Q}_{\text{Lüft}}$  und  $\dot{Q}_{\text{Trans}}$  berechnen sich gemäß Gleichung (2.3-14) bzw. (2.3-38)

$$\dot{Q}_{\text{Lüft}} = \rho_L c_L V_{\text{Raum}} \text{LWR} (T_i - T_a) \quad (2.3-14)$$

$$\dot{Q}_{\text{Trans}} = kA (T_i - T_a) \quad (2.3-38)$$

Somit setzt sich  $\dot{Q}_{\text{Heiz}}$  aus dem langsam veränderlichen Term  $\dot{Q}_{\text{Trans}}$  und dem schnell veränderlichen Term  $\dot{Q}_{\text{Lüft}}$  zusammen. Da der Aufheizvorgang deutlich langsamer verläuft als LWR und damit  $\dot{Q}_{\text{Lüft}}$  variiert, ist es sinnvoll, die beiden Terme bei der Beurteilung der Ökonomie der Heizungs- und Lüftungsvorgänge zu separieren. Damit werden bei der Optimierung von  $T_{i,\text{soll}}$  die Transmissionsverluste  $\dot{Q}_{\text{Trans}}$  und bei der Optimierung von  $\text{LWR}_{\text{soll}}$

die Lüftungsverluste  $\dot{Q}_{\text{Lüft}}$  als charakteristische Größe an Stelle von  $\dot{Q}_{\text{Heiz}}$  berücksichtigt. Somit folgt:

$$\dot{Q}_{\text{Heiz}} \equiv \dot{Q}_{\text{Trans}} = kA(T_i - T_a). \quad (3.4-11)$$

Ersetzen des tatsächlichen Temperaturwertes  $T_i$  durch den zu optimierenden Sollwert  $w = T_{i,\text{soll}}$  und Einführung von  $z = T_a$  führt auf das in Gleichung (3.4-4) gesuchte Modell

$$\dot{Q}_{\text{Heiz}} = g_2(z, w) = \begin{cases} kA(w - z) & \text{für } w > z \\ 0 & \text{für } w \leq z \end{cases} \quad (3.4-12)$$

Dabei wurde berücksichtigt, daß im Fall  $w \leq z$ , d.h.  $T_{i,\text{soll}} > T_a$  keine Heizleistung aufzuwenden und somit  $\dot{Q}_{\text{Heiz}} = 0$  zu setzen ist.

### 3.4.3 Bestimmung der Referenzleistung

Um die Ökonomie-ZGF

$$\mu_{\text{öko}} = e^{-\dot{Q}_{\text{Heiz}} / \dot{Q}_{\text{ref}}} \quad (3.3-12)$$

berechnen zu können, ist noch die Referenzleistung  $\dot{Q}_{\text{ref}}$  zu bestimmen.

Dieser Parameter kann beispielsweise anhand entsprechender Erfahrungswerte wie der mittleren Jahresheizleistung gewählt werden. Da solches Wissen jedoch oft nicht verfügbar ist, wird hier die Methode gewählt, die in allgemeiner Form in Unterabschnitt 3.2.4 vorgestellt wurde und die auf der Vorgabe eines Referenzpunktes beruht. Wie in Unterabschnitt 3.2.4 diskutiert wurde, entspricht der Max-Min-Algorithmus des Fuzzy Decision Making bei gleicher Wichtung und genügend feiner Diskretisierung der Schnittpunktbestimmung der ZGF. Folglich ist anzusetzen:

$$\mu_{\text{komp}_T}(T_{i,\text{soll}}^*, T_a) = \mu_{\text{öko}}(T_{i,\text{soll}}^*, T_a, \dot{Q}_{\text{ref}}) \quad (3.4-13)$$

Gleichung (3.4-13) kann bei gegebenen Referenzwerten  $T_{i,\text{soll,ref}}^*$  und  $T_{a,\text{ref}}$  nach dem gesuchten Parameter  $\dot{Q}_{\text{ref}}$  aufgelöst werden. Da  $\mu_{\text{komp}_T}$  in Abhängigkeit von  $T_{\text{op}}$  definiert ist, ist es transparenter,  $T_{\text{op,ref}}^*$  an Stelle von  $T_{i,\text{soll,ref}}^*$  vorzugeben.  $T_{i,\text{soll,ref}}$  wird dann unter Verwendung von Gleichung (3.4-8) bestimmt über

$$T_{i,\text{soll,ref}} = \frac{1}{1-\varepsilon}(T_{\text{op,ref}} - \varepsilon T_{a,\text{ref}}). \quad (3.4-14)$$

Einsetzen von  $\mu_{\ddot{o}ko} = e^{-\dot{Q}_{Heiz}/\dot{Q}_{ref}}$  (Gleichung (3.3-12)) und  $\dot{Q}_{Heiz} = kA(T_{i,soll,ref} - T_{a,ref})$  (Gleichung (3.4-12)) in Gleichung (3.4-13) ergibt

$$\mu_{komf\_T}(T_{op,ref}) = \exp(-kA(T_{i,soll,ref} - T_{a,ref})/\dot{Q}_{ref}). \quad (3.4-15)$$

Daraus berechnet sich  $\dot{Q}_{ref}$  zu

$$\dot{Q}_{ref} = -kA \frac{T_{i,soll,ref} - T_{a,ref}}{\underbrace{\log(\mu_{komf\_T}(T_{op,ref}))}_{\Delta T_{ref}}} \quad (3.4-16)$$

Durch Einführung der Referenzgröße  $\Delta T_{ref}$  über

$$\Delta T_{ref} = -\frac{T_{i,soll,ref} - T_{a,ref}}{\log(\mu_{komf\_T}(T_{op,ref}))} \quad (3.4-17)$$

ergibt sich folgender vereinfachter Ausdruck für  $\mu_{\ddot{o}ko}$ , in dem die Wandparameter  $k$  und  $A$  gar nicht mehr vorkommen:

$$\mu_{\ddot{o}ko} = \begin{cases} \exp(-(T_{i,soll} - T_a)/\Delta T_{ref}) & \text{für } T_{i,soll} > T_a \\ 1 & \text{für } T_{i,soll} \leq T_a \end{cases} \quad (3.4-18)$$

In Abb. 3.4-5 ist die resultierende Ökonomie-ZGF für die Referenzwerte  $T_{op,ref} = 21 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $\mu_{komf\_T}(T_{op,ref}) = 0.5$ ,  $T_{a,ref} = 5^\circ\text{C}$  dargestellt. Nach Gleichung (3.4-17) ergibt sich mit den gewählten Parametern  $\Delta T_{ref} = 23,25 \text{ }^\circ\text{C}$ . Der Zugehörigkeitsgrad sinkt für konstantes  $T_a$  mit steigenden Werten bezüglich  $T_{i,soll}$ . Umgekehrt ist  $\mu_{\ddot{o}ko}$  bei konstantem  $T_{i,soll}$  um so kleiner, je kleiner  $T_a$  ist. Folglich wird der menschliche Ökonomie-Begriff durch die erhaltene Ökonomie-ZGF  $\mu_{\ddot{o}ko}$  (3.4-18) realitätsnah und transparent abgebildet.

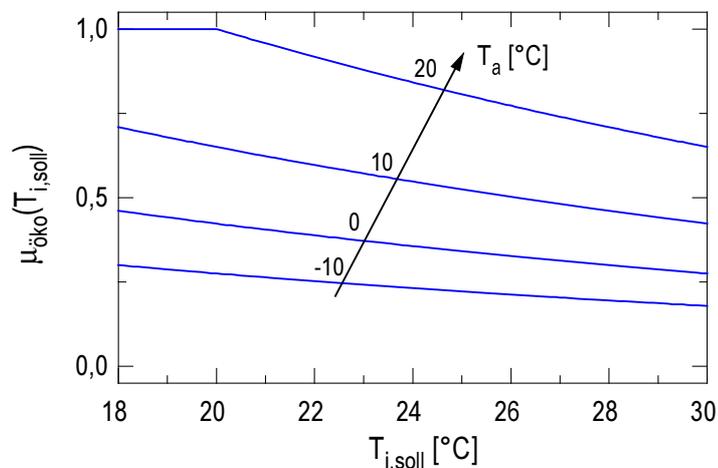


Abb. 3.4-5: Ökonomie-Zugehörigkeitsfunktion  $\mu_{\ddot{o}ko}$  in Abhängigkeit des Innentemperatur-Sollwertes  $T_{i,soll}$  und der Außentemperatur  $T_a$

### 3.5 Optimierung des Lüftungssollwertes

Die Optimierung des Lüftungssollwertes

$$u = \text{LWR}_{\text{soll}} \quad (3.5-1)$$

ist aus mehreren Gründen komplexer als die Optimierung des Innentemperatur-Sollwertes  $T_{i,\text{soll}}$ . Zum einen sind neben dem Ökonomiekriterium mehrere Komfortkriterien zu berücksichtigen. Zum anderen fungiert LWR für die Zustandsgrößen  $\text{CO}_{2,i}$ ,  $\varphi_i$  und  $T_i$  als Stellgröße, somit ist das dynamische Verhalten dieser Größen zu berücksichtigen. Eine weitere Schwierigkeit liegt darin, daß die Störgrößen, die von Personen im Raum verursacht werden ( $\text{CO}_2$ -, Feuchte- und Wärmequellen) nicht meßbar sind und daher geschätzt werden müssen.

Der Abschnitt gliedert sich wie folgt. Zuerst wird eine Aggregation der vier Komfort-ZGF zu einer gesamtheitlichen Komfort-ZGF vorgeschlagen (s. 3.5.1). Danach werden Modell-DGL bezüglich  $\text{CO}_{2,i}$ ,  $\varphi_i$ ,  $T_i$  entwickelt (s. 3.5.2). Da die internen Störgrößen im Raum für das Verhalten von  $\text{CO}_{2,i}$ ,  $\varphi_i$ ,  $T_i$  von großer Bedeutung sind, aber nicht direkt gemessen werden können, wird ein Algorithmus zur Störgrößenschätzung entwickelt (s. 3.5.3). Für die praktische Realisierung sehr wesentlich ist der Nachweis der Robustheit des Algorithmus gegenüber Ungenauigkeit in LWR (s. 3.5.4). Schließlich werden einfache statische Modelle zur Abschätzung des Luftzugs und der Lüftungsverluste angegeben (s. 3.5.5, 3.5.6).

Zur Optimierung der Stellgröße  $u = \text{LWR}_{\text{soll}}$  wird das in Unterabschnitt 3.2.2 entwickelte Optimierungskonzept angewandt. Der Formalismus ist in den folgenden Gleichungen zusammengefaßt:

$$\text{GK mit Übergangsverhalten} \quad \mu_i = f_i(y_i), \quad i = 1, \dots, m \quad (3.2-11)$$

$$\text{GK ohne Übergangsverhalten} \quad \mu_j = f_j(\tilde{y}_j), \quad j = m + 1, \dots, N \quad (3.2-12)$$

$$m \text{ dynamische Modelle} \quad \dot{y}_i = d_i(\mathbf{y}, \mathbf{z}, u), \quad i = 1, \dots, m \quad (3.2-13)$$

$$y_{i,\text{soll}} = y_i + \tau_i d_i(\mathbf{y}, \mathbf{z}, u) \equiv g_i(\mathbf{y}, \mathbf{z}, u), \quad i = 1, \dots, m \quad (3.2-20)$$

$$N-m \text{ statische Modelle} \quad \tilde{y}_j = g_j(\mathbf{y}, \mathbf{z}, u), \quad j = m + 1, \dots, N \quad (3.2-14)$$

$$\text{Fuzzy-Entscheidung} \quad \mu_D(\mathbf{y}, \mathbf{z}, u) = \bigwedge_{i=1}^N \lambda_i \mu_i(g_i(\mathbf{y}, \mathbf{z}, u)), \quad 0 < \lambda_i \leq 1 \quad (3.2-23)$$

$$\text{optimale Entscheidung} \quad \mu_D(\mathbf{y}, \mathbf{z}, u^*) = \max_{u \in U} \mu_D(\mathbf{y}, \mathbf{z}, u) \quad (3.2-24)$$

Um den Algorithmus anwenden zu können, ist der Definitionsbereich von  $u = \text{LWR}_{\text{sol}}l$  zu diskretisieren, z. B.  $u \in \{0, 0.1, 0.2, \dots, \text{LWR}_{\text{max}}\} 1/h$ . Die Diskretisierung kann von der Lüftungsaktorik abhängen, da z. B. nur bestimmte Ventilator Drehzahlen eingestellt werden können.

Die in Abschnitt 3.3 eingeführten Komfort- und Ökonomie-ZGF sind in Abb. 3.5-1 - Abb. 3.5-3 zusammengefaßt dargestellt. Zugfreiheit als Komfortkriterium (Abb. 3.5-2) ist nur zu berücksichtigen, falls ein Fensterschwenker als Lüftungsaktorik verwendet wird, da bei einer kontrollierten Ventilatorlüftung die Zugfreiheit in der Regel durch konstruktive Maßnahmen gewährleistet ist.

Bezüglich der Luftqualität kann alternativ oder ergänzend zu  $\text{CO}_2$  auch Mischgas ( $\text{MG}_i$ ) in Betracht gezogen werden. Die entsprechende ZGF kann analog zu der in Abb. 3.5-1 (a) dargestellten ZGF parametrisiert werden.

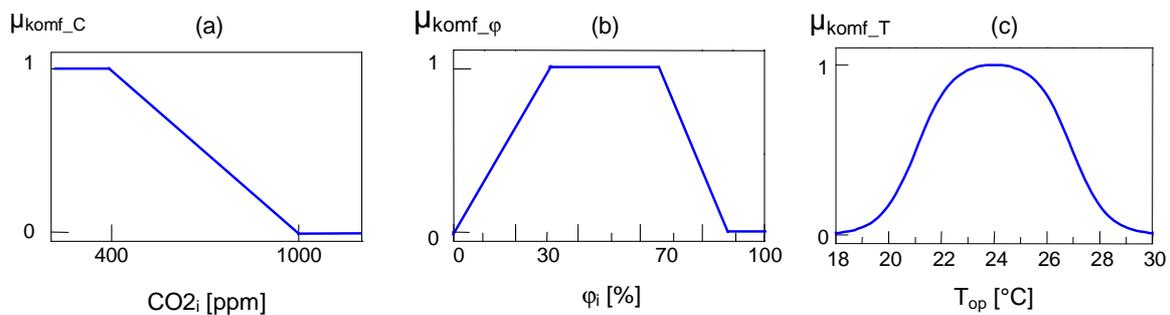


Abb. 3.5-1: Komfortkriterien in Abhängigkeit von  $\text{CO}_2$ -Gehalt (a), relativer Feuchte (b) und empfundener Temperatur (c)

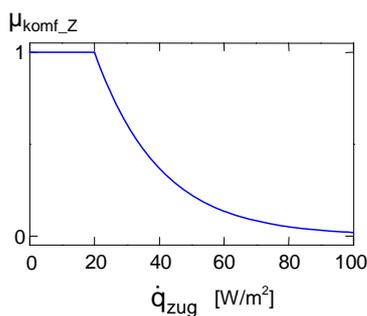


Abb. 3.5-2: Zugfreiheit als Komfortkriterium

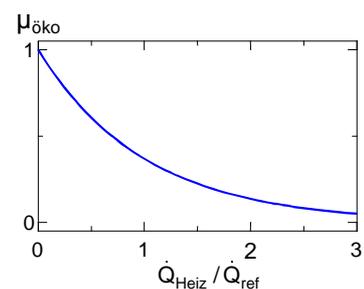


Abb. 3.5-3: Ökonomie als Kriterium

Entsprechend der Notation (3.2-11) werden für die Gütekriterien, bei denen das dynamische Verhalten in Abhängigkeit von  $u = \text{LWR}_{\text{sol}}l$  zu berücksichtigen ist, folgende Bezeichnungen eingeführt:

$$\begin{aligned}
y_1 &\equiv \text{CO}_{2i}, & \mu_1 &\equiv \mu_{\text{komf\_C}} = f_1(y_1) \\
y_2 &\equiv \varphi_i, & \mu_2 &\equiv \mu_{\text{komf\_}\varphi} = f_2(y_2) \\
y_3 &\equiv T_i, & \mu_3 &\equiv \mu_{\text{komf\_T}} = f_3(y_3)
\end{aligned}
\tag{3.5-2}$$

Bezüglich der Gütekriterien mit statischer Abhängigkeit von  $u$  wird definiert:

$$\begin{aligned}
\tilde{y}_4 &\equiv \dot{q}_{\text{Zug}}, & \mu_4 &\equiv \mu_{\text{komf\_Z}} = f_4(\tilde{y}_4) \\
\tilde{y}_5 &\equiv \dot{Q}_{\text{Heiz}}, & \mu_5 &\equiv \mu_{\text{öko\_L}} = f_5(\tilde{y}_5)
\end{aligned}
\tag{3.5-3}$$

### 3.5.1 Aggregation der Komfortkriterien

Die Wichtung aller Komfort-Gütekriterien  $\mu_1, \dots, \mu_4$  (Gleichung (3.5-2), (3.5-3)) ist nicht immer notwendig, da in vielen Fällen davon ausgegangen werden kann, daß die relative Wichtung von  $\mu_1, \dots, \mu_4$  konstant bleibt. Von Interesse hingegen ist die Wichtung eines übergeordneten, gesamtheitlichen Komfortkriteriums gegenüber dem Ökonomiekriterium. Daher wird hier die Aggregation der Komfort-ZGF  $\mu_1, \dots, \mu_4$  zu einer Komfort-ZGF  $\mu_{\text{komf}}$  über eine UND-Verknüpfung durch den MIN-Operator vorgeschlagen (Gleichung (3.5-4)).

$$\mu_{\text{komf}} \equiv \mu_{\text{komf\_C}} \wedge \mu_{\text{komf\_}\varphi} \wedge \mu_{\text{komf\_T}} \wedge \mu_{\text{komf\_Z}}
\tag{3.5-4}$$

Formal kann dies auch dadurch erfolgen, indem bei der Berechnung von  $\mu_D$  gemäß Gleichung (3.2-23) die Wichtungsfaktoren  $\lambda_1, \dots, \lambda_4$  gleich  $\lambda$  gesetzt werden, da für den MIN-Operator gilt

$$\min_x(\lambda\mu_1(x), \dots, \lambda\mu_N(x)) = \lambda \min_x(\mu_1(x), \dots, \mu_N(x)).
\tag{3.5-5}$$

Denkbar ist auch die UND-Verknüpfung durch kompensatorische Operatoren, falls gewünscht ist, daß sich die Komfortkriterien gegenseitig kompensieren können. Dieser Ansatz wird hier jedoch nicht weiter verfolgt.

Bei der Berücksichtigung der Komfort-ZGF bezüglich Temperatur ( $\mu_{\text{komf\_T}}$ ) in Gleichung (3.5-4) ist zwischen Winter- und Sommerfall zu unterscheiden. Da LWR im Sommerfall eine Stellgröße zur Beeinflussung der Temperatur ist, muß im Sommerfall  $\mu_{\text{komf\_T}}$  mit einbezogen werden. Im Winterfall wird  $\mu_{\text{komf\_T}}$  bei der Optimierung von  $T_{i,\text{soll}}$  berücksichtigt. Details zur Umschaltung Winter-/Sommerfall sind in Abschnitt 3.6 beschrieben.

Weiter ist bei der Berechnung von  $\mu_{\text{komf}}$  in Gleichung (3.5-4) zu berücksichtigen, ob als Lüftungstellglied ein Ventilator oder Schwenkfenster zur Verfügung steht, da Zugscheinungen i. a. nur bei Fensterlüftung eine Rolle spielen.

Somit ergeben sich insgesamt folgende vier Möglichkeiten:

	Ventilatorlüftung	Fensterlüftung
Winterfall	$\mu_{\text{kompf\_C}} \wedge \mu_{\text{kompf\_}\varphi}$	$\mu_{\text{kompf\_C}} \wedge \mu_{\text{kompf\_}\varphi} \wedge \mu_{\text{kompf\_Z}}$
Sommerfall	$\mu_{\text{kompf\_C}} \wedge \mu_{\text{kompf\_}\varphi} \wedge \mu_{\text{kompf\_T}}$	$\mu_{\text{kompf\_C}} \wedge \mu_{\text{kompf\_}\varphi} \wedge \mu_{\text{kompf\_T}} \wedge \mu_{\text{kompf\_Z}}$

Tabelle 3.5-1: Fallunterscheidungen bei der Aggregation der Komfort-ZGF  $\mu_{\text{kompf}}$  (Gleichung (3.5-4))

Durch die Einführung einer Komfort-ZGF  $\mu_{\text{kompf}}$  reduziert sich Gleichung (3.2-23) zu

$$\mu_D(\mathbf{y}, \mathbf{z}, u) = \lambda_1 \mu_{\text{kompf}}(\mathbf{y}, \mathbf{z}, u) \wedge \lambda_2 \mu_{\text{öko}}(\mathbf{y}, \mathbf{z}, u), \quad 0 < \lambda_{1,2} \leq 1. \quad (3.5-6)$$

Wie bei der Optimierung von  $T_{i,\text{soil}}$  werden die Parameter  $\lambda_1$  und  $\lambda_2$  zur Wichtung der Gütekriterien aus dem Parameter  $\lambda$  abgeleitet, der der Schieberstellung des Kosten-Komfort-Schiebers entspricht:

$$\lambda_1 = (1 - \lambda), \quad \lambda_2 = \lambda, \quad 0 < \lambda < 1 \quad (3.5-7)$$

Dabei wird mit  $\lambda \rightarrow 0$  das Ökonomiekriterium und mit  $\lambda \rightarrow 1$  das Komfortkriterium maximal gewichtet.

Der Berechnungsablauf bei der Optimierung von  $LWR_{\text{soil}}$  ist schematisch in Abb. 3.5-4 dargestellt.

Der nächste Schritt besteht in der Entwicklung der Modell-Differentialgleichungen (3.2-13) für die Größen  $y_1 = \text{CO}_{2,i}$ ,  $y_2 = \varphi_i$  und  $y_3 = T_i$  sowie statischen Modellgleichungen (3.2-14) für  $\tilde{y}_4 = \dot{q}_{\text{zug}}$  und  $\tilde{y}_5 = \dot{Q}_{\text{Heiz}}$ . Dies ist Gegenstand der folgenden Unterabschnitte 3.5-2 - 3.5-6.

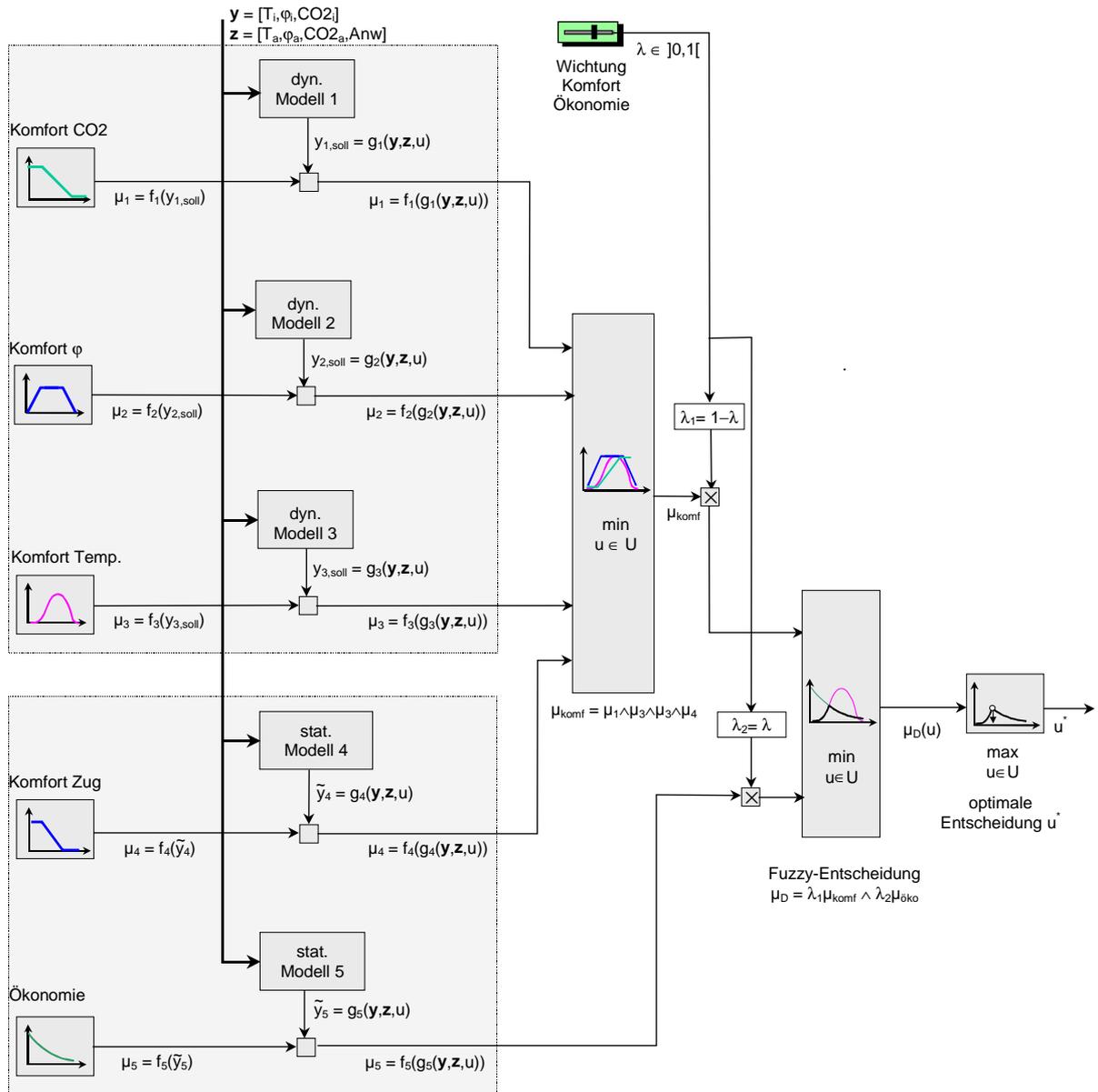


Abb. 3.5-4: Schematische Darstellung des Berechnungsablaufes bei der Optimierung von  $u = LWR_{soll}$

### 3.5.2 Dynamische Modelle für CO<sub>2</sub>, Feuchte, Temperatur

Es sind Differentialgleichungen der Form (3.2-13)

$$\dot{y}_i = d_i(y, z, u), \quad i = 1, 2, 3$$

für  $y_1 = CO2_i$ ,  $y_2 = \varphi_i$  und  $y_3 = T_i$  zu finden.

Nach Unterabschnitt 2.3.3 wird der Einfluß von LWR auf die Zustandsgrößen  $CO2_i$ ,  $\varphi_i$  und  $T_i$  beschrieben über

$$\dot{C}O_{2i} = -LWR(CO_{2i} - CO_{2a}) + \dot{C}O_{2\text{stör}} \quad (2.3-23)$$

$$\dot{\varphi}_i = -LWR(\varphi_i - \tilde{\varphi}_a) + \dot{\varphi}_{\text{stör}}, \quad \tilde{\varphi}_a = \varphi_a \frac{x_{\max}(T_a)}{x_{\max}(T_i)} \quad (2.3-31)$$

$$\dot{T}_i = -LWR(T_i - T_a) + \dot{T}_{\text{stör}} \quad (2.3-20)$$

Die Struktur dieser Gleichungen ist identisch. Die Änderung der jeweiligen Zustandsgröße setzt sich zusammen aus einem Beitrag proportional zu LWR und einem Störterm. Mit  $u = LWR$  und den in Tabelle 3.5-2 aufgeführten Bezeichnungen werden die Gleichungen durch (3.5-8) zusammengefaßt.

$$\dot{y}_v = -u(y_v - z_{a,v}) + z_{\text{stör},v} \quad (3.5-8)$$

v	$y_v$	$z_{a,v}$	$z_{\text{stör},v}$
1	$CO_{2i}$	$CO_{2a}$	$\dot{C}O_{2\text{stör}}$
2	$\varphi_i$	$\tilde{\varphi}_a$	$\dot{\varphi}_{\text{stör}}$
3	$T_i$	$T_a$	$\dot{T}_{\text{stör}}$

Tabelle 3.5-2: Bezeichnungen der Zustands- und Störgrößen

Trotz dieser formalen Äquivalenz sind die Gleichungen aus physikalischen Gründen sehr unterschiedlich. Dies betrifft hauptsächlich die Störgrößen  $z_a$  und  $z_{\text{stör}}$ . Die Unterschiede und Konsequenzen für das Vorzeichen des Terms  $(y_v - z_{a,v})$  sind in Tabelle 3.5-3 zusammengefaßt.

Für die Modellierung sehr wichtig ist die Tatsache, daß das Vorzeichen des Terms  $(y_v - z_{a,v})$  im Falle von  $y_2 = \varphi_i$  und  $y_3 = T_i$  wechseln kann. Dies bedeutet, daß für  $(y_v - z_{a,v}) \approx 0$  wegen des real existierenden Rauschens keine gesicherte Aussage über das Vorzeichen von  $(y_v - z_{a,v})$  getroffen werden kann. Der Term  $u(y_v - z_{a,v})$  in Gleichung (3.5-8)

$$\dot{y}_v = -u(y_v - z_{a,v}) + z_{\text{stör},v}$$

ist jedoch wesentlich, um den Einfluß von  $u$  auf  $\dot{y}_v$  abzuschätzen. Bei wechselndem Vorzeichen von  $(y_v - z_{a,v})$  kehrt sich auch die Wirkungsrichtung von  $u$  bezüglich  $\dot{y}_v$  um. Dieser Effekt muß jedoch physikalisch abgesichert sein, d.h. es muß eine durch Rauscheinflüsse induzierte Vorzeichenumkehr von  $(y_v - z_{a,v})$  ausgeschlossen werden.

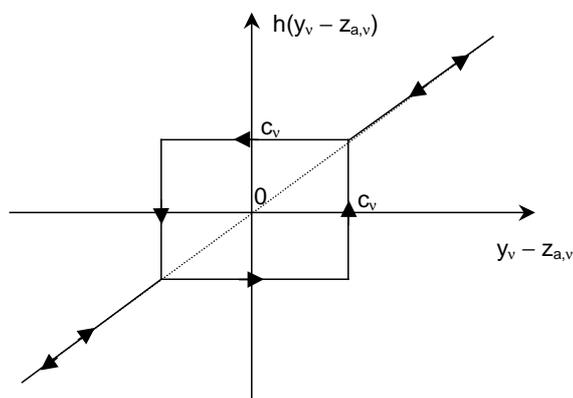
v	$y_v$	$z_{a,v}$	$(y_v - z_{a,v})$	$z_{stör,v}$
1	CO <sub>2i</sub>	CO <sub>2a</sub> ≈ 300 ppm	CO <sub>2i</sub> ≥ CO <sub>2a</sub> ⇒ (y <sub>1</sub> - z <sub>a,1</sub> ) immer positiv	CO <sub>2stör</sub> entspricht dem vom Menschen produzierten CO <sub>2</sub> ⇒ z <sub>stör,1</sub> immer positiv
2	φ <sub>i</sub>	$\tilde{\varphi}_a = \varphi_a \frac{x_{\max}(T_a)}{x_{\max}(T_i)}$	$\tilde{\varphi}_a$ kann größer/kleiner φ <sub>i</sub> sein ⇒ Vorzeichen von (y <sub>2</sub> - z <sub>a,2</sub> ) nicht festgelegt	$\dot{\varphi}_{stör}$ abhängig von Wasserdampfstörungen $\dot{x}_{stör}$ , aber auch von φ <sub>i</sub> , T <sub>i</sub> , $\dot{T}_i$ ⇒ Vorzeichen von z <sub>stör,2</sub> nicht festgelegt
3	T <sub>i</sub>	T <sub>a</sub>	T <sub>a</sub> kann größer/kleiner T <sub>i</sub> sein ⇒ Vorzeichen von (y <sub>3</sub> - z <sub>a,3</sub> ) nicht festgelegt	$\dot{T}_{stör}$ abhängig von Wärmestörquellen $\dot{Q}_{stör}$ , aber auch von φ <sub>i</sub> , T <sub>i</sub> , $\dot{T}_i$ ⇒ Vorzeichen von z <sub>stör,3</sub> nicht festgelegt

Tabelle 3.5-3: Unterschiede in der Bedeutung der Terme  $(y_v - z_{a,v})$  und  $z_{stör,v}$  bei den Modellen für CO<sub>2i</sub>, φ<sub>i</sub>, T<sub>i</sub> in Gleichung (3.5-8)

Daher ist es sinnvoll, den Term  $(y_v - z_{a,v})$  mit einer Hystereseffunktion  $h(y_v - z_{a,v})$  zu filtern, die ein träges Umschalten des Vorzeichens gewährleistet (vgl. Abb. 3.5-5)). So wird zwar das Modell verfälscht, dies ist jedoch aus den oben genannten Gründen zu akzeptieren.

Obwohl beim CO<sub>2</sub>-Modell das Vorzeichen von  $(y_1 - z_{a,1})$  nicht wechselt, da CO<sub>2i</sub> nicht kleiner als CO<sub>2a</sub> werden kann, ist auch hier die Anwendung der Hystereseffunktion  $h$  sinnvoll, um  $(y_1 - z_{a,1})$  nicht beliebig klein werden zu lassen und somit den Einfluß des Rauschens zu unterdrücken.

Der Parameter  $c_v$  der Hystereseffunktion  $h$  (vgl. Abb. 3.5-5) ist deutlich oberhalb des jeweiligen Rauschlevels von  $(y_v - z_{a,v})$  zu wählen. Typische, experimentell ermittelte Werte für  $c_v$  sind in Tabelle 3.5-4 aufgeführt.



v	$y_v - z_{a,v}$	$c_v$
1	CO <sub>2i</sub> - CO <sub>2a</sub>	50 ppm
2	φ <sub>i</sub> - $\tilde{\varphi}_a$	5 %
3	T <sub>i</sub> - T <sub>a</sub>	1 °C

Tabelle 3.5-4: Typische Werte für  $c_v$

Abb. 3.5-5: Hystereseffunktion  $h$  für den Term  $(y_v - z_{a,v})$

Obwohl die Störterme  $z_{\text{stör},v}$  aus Gleichung (3.5-8) für die Modelle bezüglich  $\text{CO}_2$ ,  $\varphi_i$  und  $T_i$  physikalisch sehr unterschiedlich zu interpretieren sind (vgl. Tabelle 3.5-3), so haben sie gemeinsam, daß sie abhängig sind von nicht direkt meßbaren Störquellen bezüglich  $\text{CO}_2$ , Wasserdampf und Wärmeeintrag, die von Menschen und Maschinen verursacht werden.

Der Störterm  $z_{\text{stör},v}$  ist jedoch nicht zu vernachlässigen, wie die Betrachtung des stationären Falls ( $\dot{y}_v = 0$ ) von Gleichung (3.5-8) zeigt:

$$\dot{y}_v = 0 \Rightarrow z_{\text{stör},v} = u(y - z_{a,v}) \quad (3.5-9)$$

In diesem Fall ist  $z_v$  genauso groß wie der Beitrag von  $u$ . Da  $z_v$  nicht direkt meßbar ist, aber auch nicht vernachlässigt werden kann, muß der entsprechende Wert geschätzt werden. Der Schätzalgorithmus wird im folgenden Unterabschnitt vorgestellt.

### 3.5.3 Störgrößenschätzung

Ein einfacher Algorithmus zur Schätzung von  $z_{\text{stör},v}$  ( $v = 1,2,3$ ) besteht darin, Gleichung (3.5-8)

$$\dot{y}_v = -u(y_v - z_{a,v}) + z_{\text{stör},v} \quad (3.5-8)$$

nach  $z_{\text{stör},v}$  aufzulösen und zeitlich zu diskretisieren (Gleichung (3.5-10), (3.5-11)). Es ist zu beachten, daß von der Stellgröße  $u$  ebenfalls nur ein angenommener Schätzwert  $\hat{u}$  bekannt ist. Die Größen  $y_v$  und  $z_{a,v}$  können als meßbar bzw. einfach berechenbar vorausgesetzt werden (vgl. Tabelle 3.5-3).

$$\hat{z}_{\text{stör},v} = \dot{y}_v + \hat{u}(y_v - z_{a,v}) \quad (3.5-10)$$

$$\Rightarrow \hat{z}_{\text{stör},v}(k) \approx \frac{y_v(k) - y_v(k-1)}{\Delta t} + \hat{u}(k-1)(y_v(k) - z_{a,v}(k)) \quad (3.5-11)$$

In Gleichung (3.5-11) wurde der Zeitindex  $k$  über  $t = t_0 + k\Delta t$  eingeführt. Dabei bezeichnen  $t_0$  einen Anfangszeitpunkt und  $\Delta t$  die Abtastzeit. Diese muß ausreichend groß gewählt werden, da in Gleichung (3.5-10) implizit eine ideale Durchmischung der Luft vorausgesetzt wurde. Der Trend von  $y_v$  muß also eindeutig bestimmbar sein. Andererseits werden bei zu groß gewähltem  $\Delta t$  sprunghafte Störungen, wie sie z. B. durch Zigarettenrauch gegeben sind, zu spät erkannt. Diese gegenläufigen Anforderungen werden mit Werten  $\Delta t = 0.2 \dots 0.5$  Minuten gut erfüllt.

In Gleichung (3.5-11) ist zur Schätzung von  $\hat{z}_{\text{stör},v}(k)$  der Wert der Stellgröße  $\hat{u}$  zum Zeitpunkt  $k - 1$  einzusetzen, da  $\hat{u}(k - 1)$  die Stellgröße im vergangenen Zeitintervall  $[k-1, k]$  ist (vgl. Abb. 3.5-6). Eine genauere Approximation wird erreicht, indem der Mittelwert von

$(y_v - z_{a,v})$  im Intervall  $[k-1, k]$  an Stelle des aktuellen Wertes  $(y_v(k) - z_{a,v}(k))$  berücksichtigt wird. Dadurch ergibt sich folgender Ausdruck:

$$\hat{z}_{\text{stör},v}(k) \approx \frac{y_v(k) - y_v(k-1)}{\Delta t} + \hat{u}(k-1) \frac{y_v(k) + y_v(k-1) - z_{a,v}(k) - z_{a,v}(k-1)}{2} \quad (3.5-12)$$

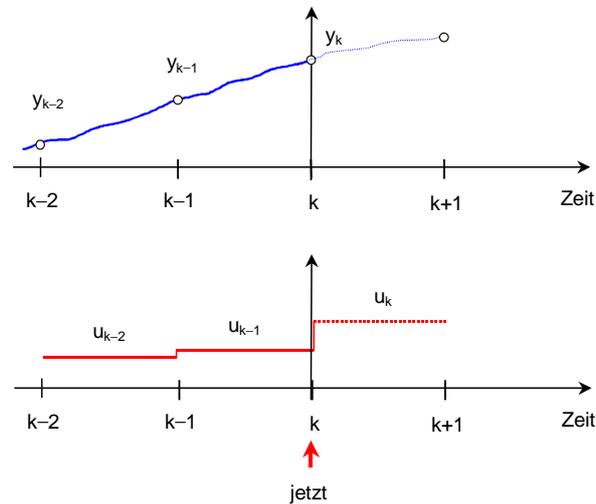


Abb. 3.5-6: Zum Algorithmus der Störgrößenschätzung

### 3.5.4 Robustheit des Algorithmus

Im folgenden wird untersucht, wie sich der Algorithmus bei nicht genau bekannter Stellgröße  $u = \text{LWR} = \frac{\dot{V}}{V_{\text{Raum}}}$  verhält. Da das freie Raumvolumen  $V_{\text{Raum}}$  nicht genau bekannt ist oder sich ändert, ist  $u$  immer mit einem Fehler behaftet. Auch der tatsächliche Volumenstrom  $\dot{V}$  wird in der Regel vom nominalen Wert abweichen, da  $\dot{V}$  stark von den Druck- und Strömungsverhältnissen im Raum abhängt.

Es werden im folgenden zwei typischen Abweichungsformen diskutiert, die durch einen Fehler in  $V_{\text{Raum}}$  und durch einen konstanten Störvolumenstrom  $\dot{V}_{\text{stör}}$  hervorgerufen werden.

#### 3.5.4.1 Fallbeispiel 1: Fehler im Raumvolumen

Weicht das geschätzte Raumvolumen  $\hat{V}_{\text{Raum}}$  vom tatsächliche Raumvolumen  $V_{\text{Raum}}$  um  $\Delta V$  ab, so gilt:

$$\hat{u} = \frac{\dot{V}}{\hat{V}_{\text{Raum}}} = \frac{\dot{V}}{V_{\text{Raum}} + \Delta V} \quad (3.5-13)$$

Über die Einführung eines Fehlerparameters  $\varepsilon$  gemäß

$$\varepsilon = -\frac{\Delta V}{V_{\text{Raum}} + \Delta V} \quad (3.5-14)$$

wird Gleichung (3.5-13) auf die Form (3.5-15) gebracht.

$$\hat{u} = (1 + \varepsilon)u \quad (3.5-15)$$

In Gleichung (3.5-15) ist  $u = \dot{V}/V_{\text{Raum}}$  der tatsächliche Wert der Stellgröße. Für  $\varepsilon = 0$ , d.h.  $\Delta V = 0$  stimmt  $\hat{u}$  also mit  $u$  überein. Es werden nun das tatsächliche System  $S$  und das geschätzte System  $\hat{S}$  betrachtet, das ein Beobachter annimmt (Gleichungen (3.5-16), (3.5-17)). Der Beobachter schätzt die Stellgröße  $\hat{u}$  und die Störgröße  $\hat{z}_{\text{stör},v}$ . Die Größen  $y_v$ ,  $\dot{y}_v$  und  $z_{a,v}$  seien meßbar und nicht fehlerbehaftet. Diese Annahme ist realistisch, da  $y_v$  den meßbaren Zustandsgrößen  $\text{CO}_{2,i}$ ,  $\varphi_i$ ,  $T_i$  und  $z_{a,v}$  den Außenklimagrößen  $\text{CO}_{2,a}$ ,  $\bar{\varphi}_a$ ,  $T_a$  entspricht.

$$\text{tatsächliches System } S \quad \dot{y}_v = -u(y_v - z_{a,v}) + z_{\text{stör},v} \quad (3.5-16)$$

$$\text{geschätztes System } \hat{S} \quad \dot{y}_v = -\hat{u}(y_v - z_{a,v}) + \hat{z}_{\text{stör},v} \quad (3.5-17)$$

Gleichsetzen von (3.5-16) mit (3.5-17) und Berücksichtigung von Gleichung (3.5-15) ergibt

$$\frac{\hat{z}_{\text{stör},v} - z_{\text{stör},v}}{y_v - z_{a,v}} = \hat{u} - u = \varepsilon u \quad (3.5-18)$$

$$\Rightarrow \hat{z}_{\text{stör},v} = z_{\text{stör},v} + \varepsilon u (y_v - z_{a,v}) \quad (3.5-19)$$

Wird also im Falle  $\varepsilon > 0$ , dies entspricht  $\Delta V < 0$ ,  $\hat{u}$  als zu groß angenommen (Gleichung (3.5-15)) und gilt  $(y_v - z_{a,v}) > 0$ , so ist nach Gleichung (3.5-19) auch die geschätzte Störgröße  $\hat{z}_{\text{stör},v}$  größer als der tatsächliche Wert  $z_{\text{stör},v}$ . Umgekehrt wird für  $\varepsilon < 0$   $\hat{z}_{\text{stör},v}$  kleiner als  $z_{\text{stör},v}$  geschätzt.

Aus einer fehlerhaften Schätzung von  $z_{\text{stör},v}$  folgt im stationären Fall ( $\dot{y}_v = 0$ ) jedoch keine Abweichung vom internen Sollwert  $y_{v,\text{soll}}$ . Da die Referenztrajektorie definiert wurde über

$$\dot{y}_v = -\frac{1}{\tau_v}(y_v - y_{v,\text{soll}}), \quad (3.2-18)$$

gilt für  $\dot{y}_v = 0$  unabhängig vom System  $S$  bzw.  $\hat{S}$   $y_v = y_{v,\text{soll}}$ , d.h. es bleibt auch bei fehlerbehaftetem  $\hat{u}$  keine Sollwertabweichung.

### 3.5.4.2 Fallbeispiel 2: Störvolumenstrom

Eine zweite typische Fehlerklasse besteht in einer Abweichung des nominalen Volumenstroms  $\dot{V}$  um einen Störvolumenstrom  $\dot{V}_{\text{stör}}$ . Dies ist in der praktischen Realisierung immer gegeben, da ein bestimmter Luftwechsel über Undichtigkeit der Gebäudehülle erfolgt [Reck95]. Dann gilt

$$\dot{V} = \hat{\dot{V}} + \dot{V}_{\text{stör}} \quad (3.5-20)$$

bzw. mit  $u = \dot{V} / V_{\text{Raum}}$  und  $u_{\text{stör}} \equiv \dot{V}_{\text{stör}} / V_{\text{Raum}}$

$$u = \hat{u} + u_{\text{stör}}, \quad (3.5-21)$$

wobei  $\hat{u}$  den angenommenen,  $u$  den tatsächlichen Wert der Stellgröße und  $u_{\text{stör}}$  einen als konstant angenommen Störeinfluß darstellen. Dieser Fall läßt sich durch die Substitution

$$u_{\text{stör}} \equiv -\varepsilon u \quad (3.5-22)$$

auf den Ansatz (3.5-15)

$$\hat{u} = (1 + \varepsilon)u$$

zurückführen. Somit kann das Ergebnis aus Gleichung (3.5-18) übernommen werden und es ergibt sich mit Gleichung (3.5-22)

$$\frac{\hat{z}_{\text{stör},v} - z_{\text{stör},v}}{y_v - z_{a,v}} = \hat{u} - u = -u_{\text{stör}}. \quad (3.5-23)$$

Ist  $u_{\text{stör}} > 0$ , dies entspricht  $\dot{V}_{\text{stör}} > 0$  und  $y_v - z_{a,v} > 0$ , so folgt daraus  $\hat{u} < u$  und  $\hat{z}_{\text{stör}} < z_{\text{stör}}$ , d.h. die Störgröße wird zu gering geschätzt. Wie in Fallbeispiel 1 gibt es im stationären Fall keine Sollwertabweichung.

Zahlenbeispiel: In einem Raum befindet sich eine Person, die einer  $\text{CO}_2$ -Störquelle  $z_{\text{stör}} = 200 \text{ ppm/h}$  entspricht. Der momentane  $\text{CO}_2$ -Gehalt innen und außen sei  $y = 1300 \text{ ppm}$  und  $z_a = 300 \text{ ppm}$ . Die von einem Ventilator erbrachte Luftwechselrate sei  $u = 1/h$ . Zusätzlich werde mit  $u_{\text{stör}} = 1/h$  gelüftet.

Ergebnis:  $\hat{z}_{\text{stör}} - z_{\text{stör}} = -1000 \text{ ppm/h} \Rightarrow \hat{z}_{\text{stör}} = -800 \text{ ppm/h}$ . Der geschätzte Wert ist also stark negativ, während der tatsächliche Wert positiv ist.

Wie in den Fallbeispielen gezeigt wurde, ist der hier vorgeschlagene Algorithmus zur Störgrößenschätzung robust gegenüber Abweichungen der tatsächlichen zur angenommenen Luftwechselrate. In der praktischen Umsetzung wird der geschätzte Wert

$\hat{z}_{\text{stör},v}$  tiefpaßgefiltert, um kurzfristige Schwankungen, die physikalisch nicht plausibel sind, zu glätten. Damit wird der Tatsache Rechnung getragen, daß im Modell der Mischkammer

$$\dot{y}_v = -u(y_v - z_{a,v}) + z_{\text{stör},v} \quad (3.5-8)$$

eine ideale Durchmischung der Luft angenommen wurde, die aber real nicht existiert.

Zusammenfassend ist in Abb. 3.5-7 der Berechnungsablauf der Modellgleichungen  $\dot{y}_v = d_v(\mathbf{y}(t), \mathbf{z}(t), \hat{u})$  schematisch dargestellt.

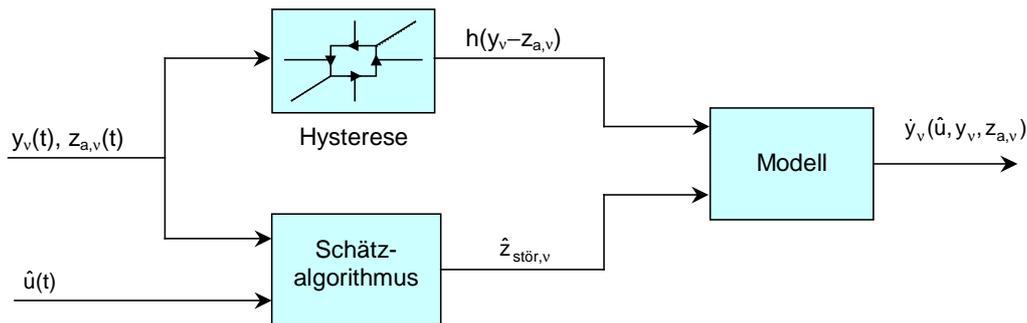


Abb. 3.5-7: Schematische Darstellung zur Berechnung der Modellgleichungen  $\dot{x}_v = d_v(\mathbf{x}(t), \mathbf{z}(t), u)$

### 3.5.5 Modell für Luftzug

Da die Komfort-ZGF bezüglich Zegerscheinungen in Abhängigkeit der vom Mensch empfundenen Wärmeleistungsdichte  $\dot{q}_{\text{zug}}$  definiert ist (vgl. Gleichung 3.3-5, Abb. 3.5-8), ist eine Modellgleichung zu finden, mit der sich  $\dot{q}_{\text{zug}}$  abschätzen läßt.

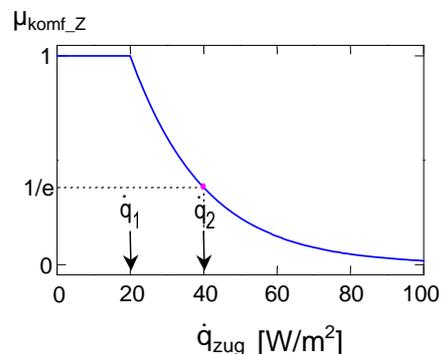


Abb. 3.5-8: Komfort-Zugehörigkeitsfunktion zur Zugfreiheit

Physikalische Ursache von Zegerscheinungen sind starke örtliche Abkühlung des Körpers durch Luftbewegung oder Wärmeabstrahlung (vgl. Abschnitt 2.4). Im folgenden werden nur

die mit der Lüftung verbundenen Konvektionswärmeströme berücksichtigt, die besonders bei Lüftung über Fensterschwenker von Bedeutung sind. Um zu einer exakten Aussage über die Konvektionswärmeströme zu kommen, müssen die Temperatur der Haut und die lokale Luftgeschwindigkeit und -temperatur in der Umgebung des Menschen bekannt sein. Diese wiederum sind abhängig von der Außentemperatur, dem Fensteröffnungswinkel, der Fenstergröße und -position sowie dem Abstand der Person zum Fenster. Eine wichtige Rolle spielen außerdem die Strömungsverhältnisse im Raum.

Da ein exaktes Modell zur Berechnung von  $\dot{q}_{\text{zug}}$  sehr aufwendig ist, wird an dieser Stelle von der stark vereinfachten Vorstellung ausgegangen, daß  $\dot{q}_{\text{zug}}$  sich proportional zu den Lüftungswärmeverlusten

$$\dot{Q}_{\text{Lüft}} = \rho_L c_L V_{\text{Raum}} \text{LWR}(T_i - T_a) \quad (2.3-14)$$

verhält. Diese Annahme ist bei ideal durchmischter Raumluft und gleichbleibendem Abstand der Person zum Fenster erfüllt. Somit wird von der Modellgleichung

$$\dot{q}_{\text{zug}} = \gamma \text{LWR}(T_i - T_a) \quad (3.5-24)$$

ausgegangen. Dabei ist  $\gamma$  eine Proportionalitätskonstante, die beispielsweise über geometrische und strömungstechnische Parameter wie Fenstergröße und -position sowie dem Abstand der Person zum Fenster ermittelt werden kann. Eine andere, hier gewählte Methode ist die Bestimmung von  $\gamma$  durch Vorgabe eines Referenzpunktes analog zur Bestimmung von  $\dot{Q}_{\text{ref}}$  in Unterabschnitt 3.4.3.

In Gleichung (3.3-5) bzw. Abb. 3.5-8 wird der Parameter  $\dot{q}_2$  definiert über

$$\mu_{\text{komf}_z}(\dot{q}_2 = 40 \text{ W/m}^2) = 1/e \approx 0.37. \quad (3.5-25)$$

Werden auf experimentellem Weg Referenzwerte  $\text{LWR}_{\text{ref}}$ ,  $T_{i,\text{ref}}$  und  $T_{a,\text{ref}}$  bestimmt, für die der Komfort-Zugehörigkeitsgrad etwa gleich  $1/e \approx 0.37$  ist, so kann durch Umformen von Gleichung (3.5-24) und Einsetzen der Referenzwerte der gesuchte Parameter  $\gamma$  bestimmt werden über

$$\gamma = \frac{\dot{q}_2}{\text{LWR}_{\text{ref}}(T_{i,\text{ref}} - T_{a,\text{ref}})}. \quad (3.5-26)$$

Zahlenbeispiel:  $\dot{q}_2 = 40 \text{ W/m}^2$ ,  $\text{LWR}_{\text{ref}} = 0.8/\text{h}$ ,  $T_{i,\text{ref}} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $T_{a,\text{ref}} = 5 \text{ }^\circ\text{C} \Rightarrow \gamma = 3.3 \text{ Wh/m}^2/\text{K}$

Obwohl mit Gleichung (3.5-24) ein sehr einfaches Modell gewählt wurde, können damit zumindest in grober Näherung Komforteinbußen durch Zugerscheinungen berücksichtigt werden.

### 3.5.6 Modell der Lüftungsverluste

Die ZGF zur Bewertung der Ökonomie des Lüftungsvorganges wird wie bei der Optimierung des Temperatursollwertes angesetzt zu

$$\mu_{\text{öko}} = e^{-\dot{Q}_{\text{Heiz}} / \dot{Q}_{\text{ref}}} \quad (3.3-12)$$

Während bei der Optimierung des Temperatursollwertes die Transmissionsverluste  $\dot{Q}_{\text{Trans}}$  als charakteristische Größe an Stelle der gesamten Heizleistung  $\dot{Q}_{\text{Heiz}}$  berücksichtigt wurden, so erscheint hier der mit dem Lüftungsvorgang verbundene Energieverbrauch  $\dot{Q}_{\text{LWR}}$  als geeignete Größe.  $\dot{Q}_{\text{LWR}}$  setzt sich aus den Lüftungswärmeverlusten  $\dot{Q}_{\text{Lüft}}$  und der Leistungsaufnahme des Ventilators  $\dot{Q}_{\text{Vent}}$  zusammen:

$$\dot{Q}_{\text{LWR}} = \dot{Q}_{\text{Lüft}} + \dot{Q}_{\text{Vent}} \quad (3.5-27)$$

Die Lüftungswärmeverluste  $\dot{Q}_{\text{Lüft}}$  berechnen sich zu

$$\dot{Q}_{\text{Lüft}} = \begin{cases} \rho_L c_L V_{\text{Raum}} \text{LWR} (T_i - T_a), & T_i > T_a \\ 0 & T_i \leq T_a \end{cases} \quad (2.3-14)$$

Obwohl die Leistungsaufnahme des Ventilators  $\dot{Q}_{\text{Vent}}$  prinzipiell quadratisch vom Volumenstrom  $\dot{V}$  abhängt, wird  $\dot{Q}_{\text{Vent}}$  an dieser Stelle der Einfachheit halber proportional zu  $\dot{V}$  und damit zu LWR angenommen (Gleichung (3.5-28)). Diese Vereinfachung ist nicht notwendig, aber sie ist zu vertreten, da der Beitrag von  $\dot{Q}_{\text{Vent}}$  in der Regel viel kleiner als  $\dot{Q}_{\text{Lüft}}$  ist.

$$\dot{Q}_{\text{Vent}} = \frac{P_{\text{max}}}{\text{LWR}_{\text{max}}} \text{LWR} \quad (3.5-28)$$

Der Parameter  $P_{\text{max}}$  bezeichnet die Leistungsaufnahme bei maximaler Luftwechselrate  $\text{LWR}_{\text{max}}$ . Im Falle von Fensterlüftung, d.h. bei Lüftung ohne Ventilator gilt also  $P_{\text{max}} = 0$ .  $\text{LWR}_{\text{max}}$  berechnet sich mit dem maximalen Volumenstrom  $\dot{V}_{\text{max}}$  über

$$\text{LWR}_{\text{max}} = \frac{\dot{V}_{\text{max}}}{V_{\text{Raum}}} \quad (3.5-29)$$

Einsetzen von Gleichung (2.3-14) und (3.5-28) in Gleichung (3.5-27) ergibt:

$$\dot{Q}_{LWR} = \begin{cases} LWR \left( \rho_L c_L V_{\text{Raum}} (T_i - T_a) + \frac{P_{\text{max}}}{LWR_{\text{max}}} \right) & T_i > T_a \\ LWR \frac{P_{\text{max}}}{LWR_{\text{max}}} & T_i \leq T_a \end{cases} \quad (3.5-30)$$

Gleichung (3.5-30) führt mit  $\mu_{\text{öko}} = \exp(-\dot{Q}_{LWR} / \dot{Q}_{\text{ref}})$  auf den Ausdruck (3.5-31).

$$\mu_{\text{öko}} = \begin{cases} \exp\left(-LWR \left( \rho_L c_L V_{\text{Raum}} (T_i - T_a) + \frac{P_{\text{max}}}{LWR_{\text{max}}} \right) / \dot{Q}_{\text{ref}}\right) & T_i > T_a \\ \exp\left(-LWR \frac{P_{\text{max}}}{LWR_{\text{max}}} / \dot{Q}_{\text{ref}}\right) & T_i \leq T_a \end{cases} \quad (3.5-31)$$

Um  $\mu_{\text{öko}}$  berechnen zu können, ist noch die Referenzleistung  $\dot{Q}_{\text{ref}}$  zu bestimmen. Dazu wird wie in Abschnitt 3.4 ausgenutzt, daß die Berechnung der optimalen Entscheidung  $\mu_D^*$  über den Max-Min-Algorithmus bei genügend feiner Diskretisierung von LWR dem Schnittpunkt von  $\mu_{\text{öko}}(\text{LWR})$  und  $\mu_{\text{komf}}(\text{LWR})$  entspricht:

$$\mu_{\text{komf}}(\text{LWR}) = \mu_{\text{öko}}(\text{LWR}) \quad (3.5-32)$$

Es werden Referenzzustandsgrößen und Referenzstörrößen definiert und Gleichung (3.5-32) nach dem freien Parameter  $\dot{Q}_{\text{ref}}$  aufgelöst. Dazu ist es ausreichend, bei der Komfort-ZGF  $\mu_{\text{komf}}$  ausschließlich das Komfortkriterium bezüglich CO<sub>2</sub> ( $\mu_{\text{komf\_C}}$ ) zu berücksichtigen, da die Verschlechterung der Luftqualität in Wohn- und Büroräumen der typischste Grund für Lüftungsbedarf ist. Es wird also angesetzt:

$$\mu_{\text{komf\_C}}(\text{CO}_{2i}) = \mu_{\text{öko}}(\dot{Q}_{LWR}, \dot{Q}_{\text{ref}}) \quad (3.5-33)$$

Entsprechend den Abhängigkeiten von  $\mu_{\text{komf\_C}}$  und  $\mu_{\text{öko}}$  sind Referenzwerte des CO<sub>2</sub>-Gehaltes  $\text{CO}_{2i,\text{ref}}$ , der Innentemperatur  $T_{i,\text{ref}}$ , der Außentemperatur  $T_{a,\text{ref}}$  und der Luftwechselrate  $LWR_{\text{ref}}$  zu definieren. Aus  $\mu_{\text{öko}} = \exp(-\dot{Q}_{LWR} / \dot{Q}_{\text{ref}})$  und Gleichung (3.5-33) folgt:

$$\mu_{\text{komf\_C}}(\text{CO}_{2i,\text{ref}}) = \exp(-\dot{Q}_{LWR,\text{ref}} / \dot{Q}_{\text{ref}}) \quad (3.5-34)$$

Auflösen nach  $\dot{Q}_{\text{ref}}$  ergibt

$$\dot{Q}_{\text{ref}} = -\frac{\dot{Q}_{LWR,\text{ref}}}{\log(\mu_{\text{komf\_C}}(\text{CO}_{2i,\text{ref}}))}. \quad (3.5-35)$$

Dies ist der gesuchte Zusammenhang, doch zur Auswertung ist noch  $\dot{Q}_{LWR,\text{ref}}$  mit entsprechenden Referenzwerten  $T_{i,\text{ref}}$ ,  $T_{a,\text{ref}}$  und  $LWR_{\text{ref}}$  zu ermitteln. Einsetzen der Referenzwerte in Gleichung (3.5-30) ergibt

$$\dot{Q}_{LWR,ref} = LWR_{ref} \left( \rho_L c_L V_{Raum} (T_{i,ref} - T_{a,ref}) + \frac{P_{max}}{LWR_{max}} \right). \quad (3.5-36)$$

Zur Berechnung von  $LWR_{ref}$  wird der stationäre Fall ( $\dot{CO}_2_i = 0$ ) betrachtet. Dann gilt (vgl. Gleichung (2.3-25))

$$LWR_{ref} = \frac{\dot{CO}_2_{stör,ref}}{CO_{2,i,ref} - CO_{2,a}}. \quad (3.5-37)$$

Zur Ermittlung des Referenzwertes bezüglich der  $CO_2$ -Störgrößen ( $\dot{CO}_2_{stör,ref}$ ) wird eine typische Anzahl  $N$  von Personen im Raum und eine mittlere  $CO_2$ -Produktionsrate  $\dot{CO}_2_{prod}$  eines Menschen (z. B. 10 Liter/h) angenommen. Dann berechnet sich  $\dot{CO}_2_{stör,ref}$  zu

$$\dot{CO}_2_{stör,ref} = N \frac{\dot{CO}_2_{prod}}{V_{Raum}}. \quad (3.5-38)$$

Zahlenbeispiel:  $V_{Raum} = 30 \text{ m}^3$ ,  $N = 1$ ,  $CO_{2,i,ref} = 700 \text{ ppm}$ ,  $\mu_{komf\_C}(CO_{2,i,ref}) = 0.5$ ,  $CO_{2,a} = 300 \text{ ppm}$ ,  
 $T_{i,ref} = 20 \text{ °C}$ ,  $T_{a,ref} = 5 \text{ °C}$ ,  $P_{max}/LWR_{max} = 10 \text{ Wh}$   
 $\Rightarrow \dot{CO}_2_{stör,ref} = 330 \text{ ppm/h}$ ,  $LWR_{ref} = 0.83/\text{h}$ ,  $\dot{Q}_{LWR,ref} = 133 \text{ W}$ ,  $\dot{Q}_{ref} = 192 \text{ W}$

Zur Berechnung von  $\dot{Q}_{ref}$  gemäß den Gleichungen (3.5-35) - (3.5-38) sind also Parameter bezüglich des Raumes und der Aktorik ( $V_{Raum}$ ,  $N$ ,  $P_{max}/LWR_{max}$ ) sowie Referenzwerte der physikalischen Größen ( $CO_{2,i,ref}$ ,  $T_{i,ref}$ ,  $T_{a,ref}$ ) und des Komfortniveaus ( $\mu_{komf\_C}(CO_{2,i,ref})$ ) anzugeben.

Die resultierende Ökonomie-ZGF ist für die im Zahlenbeispiel gewählten Referenzwerte in Abb. 3.5-9 dargestellt. Die Außentemperatur  $T_a$  ist dabei Scharparameter, die aktuelle Innentemperatur wurde zu  $T_i = 20 \text{ °C}$  angenommen. Analog zur Ökonomie-ZGF in Abhängigkeit von  $T_{i,soll}$  (Abb. 3.4-4) sinkt der Zugehörigkeitsgrad mit steigendem  $LWR_{soll}$  und sinkenden Werten bezüglich  $T_a$ . Somit wird der menschliche Ökonomie-Begriff transparent nachgebildet.

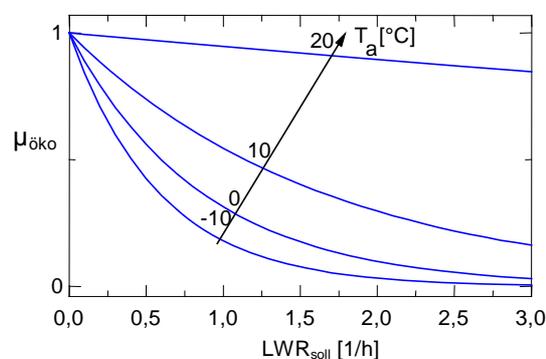


Abb. 3.5-9: Typische Ökonomie-Zugehörigkeitsfunktion in Abhängigkeit vom Lüftungssollwert  $LWR_{soll}$  und der Außentemperatur  $T_a$  ( $T_i = 20 \text{ °C}$ ,  $\dot{Q}_{ref} = 192 \text{ W}$ )

## 3.6 Heuristische Strategieelemente

Das bisher entwickelte Konzept bezieht sich auf einen belegten Raum, da nur dann die Komfortkriterien bezüglich Temperatur, Luftqualität und Zugerscheinungen überhaupt sinnvoll sind. Für verschiedene andere, in der Praxis auftretende Sonderfälle, wie z. B. den Fall des unbelegten Raumes sind ergänzende Strategieelemente, die sich in der Regel auf heuristischem Wege ermitteln lassen, zu finden. Allgemein läßt sich die Leitkomponente sinnvoll durch heuristische Strategieelemente ergänzen, indem ereignis- oder zeitabhängig bestimmte Parameter des Systems, z. B. der Komfortkriterien, verändert werden.

### 3.6.1 Abwesenheit

Für den Fall des unbelegten Raumes ist sicherzustellen, daß die Raumtemperatur  $T_i$  nicht zu stark absinkt, damit die Wände nicht zu sehr auskühlen. Auch hier könnten unscharfe Gütekriterien herangezogen werden, z. B. kann bei  $\mu_{\text{komf}}(T_{\text{op}})$  die Temperaturskala zu niedrigeren Werten hin verschoben werden. Bei der Implementierung des Konzeptes wurde ein pragmatischer Weg gewählt, der im Fall eines unbelegten Raumes eine Solltemperatur von  $T_{i,\text{soll}} = 15 \text{ °C}$  vorsieht. In gut gedämmten Häusern tritt der Fall jedoch fast nicht auf, daß  $T_i$  unter  $15 \text{ °C}$  absinkt, so daß bei Abwesenheit i. a. nicht geheizt wird.

Ein weiteres Strategieelement besteht darin, im Falle der Abwesenheit bei der Optimierung von  $LWR_{\text{soll}}$  das Komfortkriterium maximal zu gewichten. Dabei wird wegen der gleichzeitigen Absenkung von  $T_{i,\text{soll}}$  keine Heizleistung, sondern lediglich Ventilatorleistung benötigt. Da die Luftqualität nach einer bestimmten Zeit das definierte Komfortniveau (z. B.  $\text{CO}_2_i = \text{CO}_{2,\text{opt}} = 400 \text{ ppm}$ ) erreicht hat, ist der Lüftungsvorgang zeitlich begrenzt. So befindet sich der Raumluftzustand bei erneuter Belegung auf optimalem Komfortniveau, so daß erst nach längerer Anwesenheit von Personen im Raum wieder gelüftet werden muß.

Ein drittes Strategieelement bei Abwesenheit betrifft die Temperatur-Nachtabsenkung im Sommerfall. Da es besonders bei Räumen mit Südausrichtung tagsüber oft zu einer Überhitzung des Raumes kommt, ist es sinnvoll, in der Nacht die Raumtemperatur vorsorglich abzusenken. Dies wird dadurch realisiert, indem das Maximum der Komfort-ZGF  $\mu_{\text{komf}_T}$ , das bei  $T_{\text{opt}}$  liegt, nachts zu niedrigeren Temperaturen hin verschoben wird, z. B. von  $T_{\text{opt}} = 24 \text{ °C}$  zu  $T_{\text{opt}} = 20 \text{ °C}$ . LWR stellt sich dann so ein, daß der abgesenkte Temperaturwert  $T_{\text{opt}}$  eingehalten wird.

Allerdings hat sich bei den experimentellen Untersuchungen gezeigt, daß in warmen Nächten der Fall auftreten kann, daß  $T_{\text{opt}}$  trotz ständiger Lüftung nicht erreicht wird. Daher werden im Sommerfall bei Abwesenheit Komfort- und Ökonomiekriterien gleich gewichtet, so

daß die Ventilatorleistung berücksichtigt wird und ein Kompromiß zwischen Komfort- und Ökonomiekriterien eingestellt wird.

Ein viertes Strategieelement ist für den Fall der Fensterlüftung sinnvoll. Hier muß das Komfortkriterium bezüglich Zugscheinungen ( $\mu_{\text{komf}_Z}$ ) bei Abwesenheit nicht berücksichtigt werden, d.h. es wird in diesem Fall  $\mu_{\text{komf}_Z} \equiv 1$  gesetzt.

### **3.6.2 Umschaltung Winter/-Sommerfall**

Die meisten Heizungsanlagen stellen in Abhängigkeit der Außentemperatur  $T_a$  Heizenergie zur Verfügung. Die Information darüber, ob die Heizungsanlage aktiviert ist oder nicht, wird im Rahmen dieser Arbeit jedoch als nicht verfügbar angesehen, so daß innerhalb der Leitkomponente entschieden werden muß, ob Heizbedarf vorliegt. Als Kriterium wird dabei ein gleitender Mittelwert von  $T_a$  herangezogen. Sinkt der Mittelwert unter einen bestimmten Wert (z. B. 15 °C [Reck95]), so wird auf Winterfall, andernfalls auf Sommerfall erkannt.

## 4 Erprobung der Fuzzy-Leitkomponente

Funktion und Leistungsfähigkeit der Fuzzy-Leitkomponente wurden sowohl anhand von realitätsnahen Simulationen als auch experimentell in zwei Versuchsräumen des Test- und Demonstrationszentrums des IITB untersucht und erprobt. In Abschnitt 4.1 werden Simulationsergebnisse vorgestellt und diskutiert. Dabei wird das Verhalten der Leitkomponente zunächst ohne Regelstrecke anhand ausgewählter "Momentaufnahmen" bezüglich des Innen- und Außenklimas untersucht (s. 4.1.2). Das Verhalten der Leitkomponente mit Regelstrecke ist Gegenstand von Unterabschnitt 4.1.3. Hier werden realitätsnahe Tagessimulationen mit verschiedenen Außenklimaszenarien, wechselnder Raumbelastung und unterschiedlicher Lüftungsakustik (Ventilator/Schwenkfenster) vorgestellt. Dabei werden Energiebilanzen diskutiert, die Robustheit gegenüber Störungen der Luftwechselrate nachgewiesen sowie die Überlegenheit der Leitkomponente gegenüber manuellen Bedienstrategien diskutiert.

Abschnitt 4.2 ist der experimentellen Erprobung der Leitkomponente gewidmet. Nach der Beschreibung der zwei Versuchsräume und der jeweiligen Systemarchitektur (s. 4.2.1 - 4.2.3) wird in Unterabschnitt 4.2.4 anhand von fünf exemplarischen Meßergebnissen die Leistungsfähigkeit der Leitkomponente nachgewiesen. Ein Schwerpunkt liegt in der Untersuchung der Robustheit gegenüber extremen Störquellen sowie bei stark inhomogener Durchlüftung. Anhand eines Vergleiches eines Simulationsszenarios mit einem Meßergebnis wird die Realitätsnähe des Simulationsmodells diskutiert.

Eine Zusammenfassung der experimentellen und Simulationsergebnisse in Abschnitt 4.3 schließen das Kapitel ab.

### 4.1 Simulationsuntersuchungen

#### 4.1.1 Simulationsumgebung

Die Fuzzy-Leitkomponente wurde in Verbindung mit einem Raummodell in einer MATLAB/Simulink-Umgebung [Math99] implementiert [Ber97b, Ber98a, Ber98b, Ber98c]. Die Struktur des Simulationsmodells ist in Abb. 4.1-1 dargestellt.

Aus mehreren Gründen hat sich die Implementierung der Fuzzy-Leitkomponente in Verbindung mit einem Raummodell in einer Simulationsumgebung als sinnvoll erwiesen. Zum einen war es somit sehr einfach möglich, verschiedene Strategien (z. B.

unterschiedliche Wichtung der Komfort- und Ökonomiekriterien) bei gleichen Belegungs- und Außenklimaszenarien zu vergleichen. Weiter konnte so die Leitkomponente zunächst anhand des Simulationsmodells, später in realen Testbedingungen hinsichtlich Robustheit gegenüber Störeinflüssen und Sensorungenauigkeiten untersucht und die Parameter feinoptimiert werden. Schließlich besteht in der Simulation die Möglichkeit der exakten Energiebilanzierung hinsichtlich der einzelnen Wärmeströme (Lüftungs- und Transmissionsverluste, interne Wärmegewinne und Heizleistung), die im realen Experiment nur relativ grob abgeschätzt werden können.

Das Raummodell berücksichtigt als Einzonen-Mischkammermodell die Zustandsgrößen Temperatur, relative Feuchte und CO<sub>2</sub>-Gehalt. Dem Modell liegen die in Abschnitt 2.3 eingeführten Modellgleichungen zugrunde. Als Störgrößen werden die Außenklimagrößen bezüglich Temperatur, Feuchte, CO<sub>2</sub>-Gehalt und Solarstrahlung sowie die Raumbellegung zeitabhängig vorgegeben (vgl. Abb. 4.1-1). Für jede Person im Raum wird eine konstante Störgröße bezüglich Wärmeeintrag, CO<sub>2</sub>- und Wasserdampfproduktion berücksichtigt (vgl. Tabelle 4.1-1).

Als Temperaturregler wurde ein PI-Regler mit nichtlinearer Abhängigkeit der Integralzeitkonstante von der Regeldifferenz gewählt, welcher einen Sollwert der Heizleistung an den Heizkörper ausgibt. Der Heizkörper ist als ein PT<sub>1</sub>-Glied mit einer Zeitkonstante  $T = 10$  Minuten modelliert.

Bei der Lüftungssteuerung wurden zwei Varianten implementiert, die alternativ aktiviert werden können. Zum einen wurde ein idealer Ventilator angenommen, der den Lüftungssollwert  $LWR_{\text{soll}}$  exakt einstellt, zum anderen wurde die Lüftung über Fensterschwenker mit diskreter Luftwechselrate modelliert.

Die bauphysikalischen Parameter (Raumvolumen, Wand- und Fensterparameter) sind an Raum 1 des Test- und Demozentrums angelehnt (vgl. 4.2.2). Die wichtigsten Angaben zur Struktur und den Parametern des Raummodells sind in Tabelle 4.1-1 zusammengestellt. Das Simulationsmodell ist detailliert in Anhang B beschrieben.

Die Fuzzy-Leitkomponente wurde als MATLAB-S-Function implementiert. Da die Syntax einer S-Function sich an der Programmiersprache C orientiert, konnten die Algorithmen bei der echtzeitfähigen Implementierung im wesentlichen übernommen werden.

Im folgenden Unterabschnitt 4.1.2 wird das statische Verhalten der Leitkomponente ohne Regelstrecke untersucht. Untersuchungen des dynamischen Verhaltens der Leitkomponente mit Regelstrecke und realitätsnahen Störeinflüssen bezüglich Außenklima und Raumbellegung sind Gegenstand von Unterabschnitt 4.1.3.

Die Realitätsnähe des Modells wird besonders in Unterabschnitt 4.2.4.2 untersucht. Darin wird ein gemessenes Versuchsszenario mit einer Simulation verglichen. Auch Anhang A, in dem Ergebnisse des Systemverhaltens der Versuchsräume diskutiert werden, dient der Verifikation des Simulationsmodells.

Tabelle 4.1-1: Wichtige Daten zum Raummodell sowie den Heizungs- und Lüftungsregelkreisen

Temperaturregler	PI-Regler mit nichtlinearer $T_i$ -Kennlinie
Heizung	PT <sub>1</sub> -Glied mit Zeitkonstante $T = 10 \text{ min}$
Lüftungssteuerung	umschaltbar: - kontinuierliche Lüftung (Ventilator) - diskrete Lüftung (Fenster)
Außenwand	fünfschichtig diskretisiert, 20 cm Ziegel, 5 cm Isolierung $\Rightarrow k = 0.54 \text{ W/m}^2/\text{K}$
Raumvolumen	$50 \text{ m}^3$
Innenwände	fünfschichtig diskretisiert, 15 cm Ziegel $\Rightarrow k = 1.82 \text{ W/m}^2/\text{K}$
Fenster	$k = 2.0 \text{ W/m}^2/\text{K}$ , Durchlaßgrad $g = 0.7$
Störquellen pro Person	
Wärme	100 W
CO <sub>2</sub> -Produktion	10 Liter/h
Wasserdampf	40 g/h
Abtastzeit	$\Delta t = 3 \text{ min}$

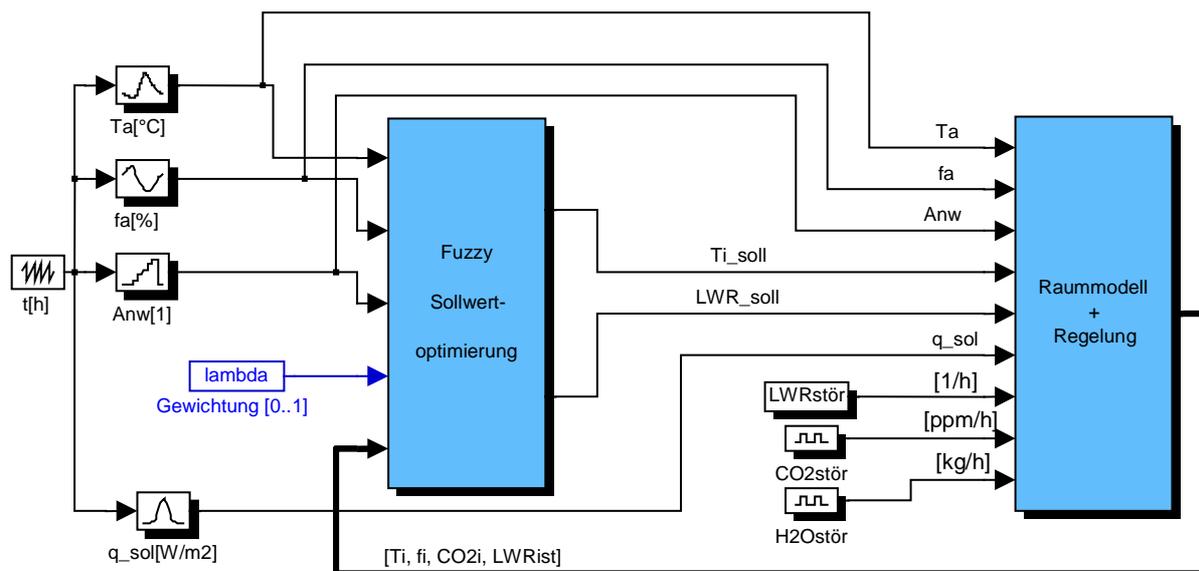


Abb. 4.1-1: Struktur des Simulationsmodells in einer MATLAB/Simulink-Umgebung  
( $f_i \equiv \varphi_i$ ,  $f_a \equiv \varphi_a$ )

#### 4.1.2 Untersuchung des Verhaltens der Leitkomponente ohne Regelstrecke

Zur besseren Transparenz der Funktionsweise wurde die Fuzzy-Leitkomponente zunächst ohne Regelstrecke bei Annahme unterschiedlicher Komfort-Kostenwichtungen  $\lambda$  sowie Außentemperaturen  $T_a$  untersucht. Da  $T_a$  sowohl auf das Ökonomie- als auch die Komfortkriterien einen wesentlichen Einfluß ausübt, wird sie in den folgenden Darstellungen als Scharparameter berücksichtigt. Bezüglich der Innenklimagrößen und der übrigen Störgrößen wurden repräsentative, konstante Werte angenommen.

Im folgenden wird die Sollwertoptimierung bezüglich Innentemperatur (s. 4.1.2.1) und bezüglich Luftwechselrate (s. 4.1.2.2) diskutiert.

##### 4.1.2.1 Optimierter Temperatursollwert

Da die wesentlichen Modellgleichungen (2.4-6) und (3.4-9) neben  $T_{i,soll}$  ausschließlich von  $T_a$  und Materialparametern abhängen, ist das Ergebnis der Optimierung bei Berücksichtigung von  $T_a$  sowie dem Parameter  $\lambda$  zur Wichtung der Gütekriterien  $\mu_{\text{komf}}$ ,  $\mu_{\text{öko}}$  vollständig beschrieben.

$$T_{\text{op,soll}} = (1 - \varepsilon)T_{i,soll} + \varepsilon T_a, \quad \varepsilon = \frac{kA}{2\alpha A_{\text{ges}}} \quad (3.4-7)$$

$$\dot{Q}_{\text{Heiz}} = kA(T_{i,soll} - T_a) \quad (3.4-11)$$

Es werden im folgenden zwei Extremfälle von Wandaufbauten betrachtet. Zum einen wird eine nahezu ideal isolierte Wand ( $k \approx 0 \Rightarrow \varepsilon \approx 0$ ), zum anderen eine schlecht isolierte Wand ( $\varepsilon \approx 0.05$ ) angenommen. Dies entspricht in etwa den Gegebenheiten in Raum 1 bzw. Raum 2 des Test- und Demo-Zentrums (vgl. Tabelle 4.2-1). Bezüglich der Komfort-ZGF  $\mu_{\text{komf}_T}$  werden die charakteristischen Parameter  $T_{\text{min}} = 18 \text{ °C}$  und  $T_{\text{opt}} = 24 \text{ °C}$  zugrunde gelegt (vgl. Abb. 4.1-2, links).

Die Ergebnisse für den Fall der nahezu ideal isolierten Wand sind in Abb. 4.1-2 dargestellt. Für  $\varepsilon = 0$  gilt nach Gleichung (3.4-7)  $T_{\text{op,soll}} = T_{i,soll}$ , d.h. die für die Behaglichkeit maßgebliche empfundene Temperatur  $T_{\text{op}}$  ist in diesem Fall nicht von  $T_a$  abhängig. Somit sind die Parameter  $T_{\text{min}}$  und  $T_{\text{opt}}$  in Abb. 4.1-2 bei den extremen Wichtungen  $\lambda \rightarrow 0$  und  $\lambda \rightarrow 1$  direkt ablesbar. Für  $\lambda \rightarrow 0$  ("max. Ökonomie") ist  $T_{i,soll}^* = T_{\text{min}} = 18 \text{ °C}$ , für  $\lambda \rightarrow 1$  ("max. Komfort") ergibt sich  $T_{i,soll}^* = T_{\text{opt}} = 24 \text{ °C}$ . Bei mittlerer Wichtung  $0 < \lambda < 1$  steigt  $T_{i,soll}^*$  jeweils mit  $\lambda$ , also stärkerer Komfortwichtung und mit  $T_a$ , dies bedeutet niedrigere Heizleistung, so daß das Ergebnis transparent ist.

Eine Sonderrolle spielt der Fall  $T_a = 20\text{ °C}$ . Nach Gleichung (3.4-11) ist für  $T_{i,\text{soll}} = T_a = 20\text{ °C}$   $\dot{Q}_{\text{Heiz}} = 0$  und somit  $\mu_{\text{öko}} = 1$ . Da also mit  $T_{i,\text{soll}} = 20\text{ °C}$  das Ökonomie-Kriterium voll erfüllt ist, wird bei  $\lambda \rightarrow 0$  ("max. Ökonomie") der Wert  $T_{i,\text{soll}}^* = T_a = 20\text{ °C}$  und nicht  $T_{\text{min}} = 18\text{ °C}$  berechnet. Obwohl dieser Fall in der Anwendung keine Rolle spielt, da bei  $T_a = 20\text{ °C}$  nicht geheizt wird, demonstriert er doch gut den transparenten Mechanismus der Bewertung der Gütekriterien.

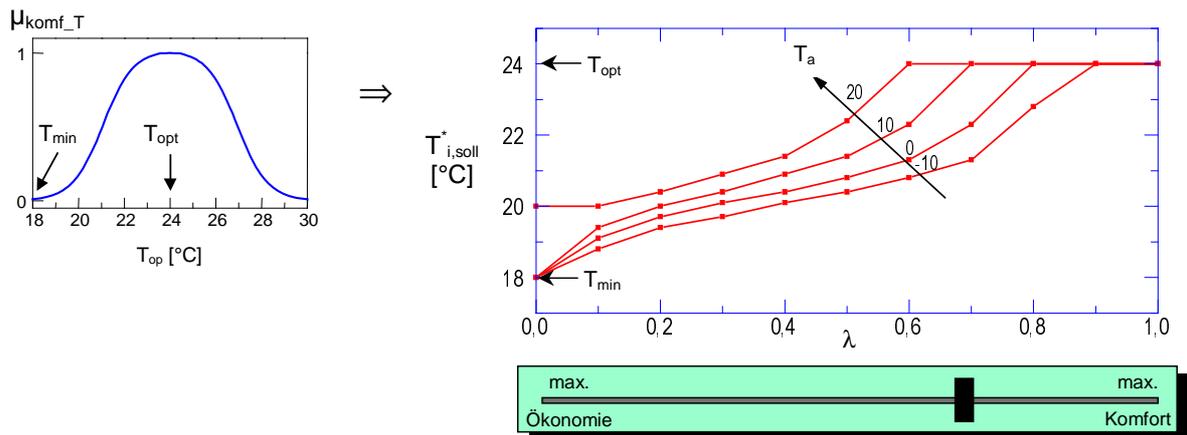


Abb. 4.1-2: Optimierter Sollwert der Innentemperatur  $T_{i,\text{soll}}^*$  bei ideal isolierter Wand ( $\epsilon = 0$ )

In Abb. 4.1-3 sind die Ergebnisse für den Fall der schlecht isolierten Wand ( $\epsilon = 0.05$ ) gezeigt. Dargestellt sind die optimierten Sollwerte der empfundenen Temperatur  $T_{\text{op},\text{soll}}^*$  (Bild oben) und der Raumtemperatur  $T_{i,\text{soll}}^*$  (Bild unten), die über Gleichung (2.4-6) miteinander verknüpft sind.

Da die Komfort-ZGF  $\mu_{\text{komf}_T}$  in Abhängigkeit von  $T_{\text{op}}$  definiert ist, sind die charakteristischen Parameter von  $\mu_{\text{komf}_T}$ ,  $T_{\text{min}}$  und  $T_{\text{opt}}$ , im oberen Bild bei den extremen Wichtungen  $\lambda \rightarrow 0$  und  $\lambda \rightarrow 1$  ablesbar. Somit ergeben sich für den optimierten Sollwert der Lufttemperatur  $T_{i,\text{soll}}^*$  (unteres Bild) abhängig von  $T_a$  abweichende Werte, da nach Gleichung (3.4-7)  $T_{i,\text{soll}}$  bei niedrigem  $T_a$  erhöht werden muß, um einen bestimmten Wert von  $T_{\text{op}}$  zu halten. Für  $\lambda \rightarrow 1$  ("max. Komfort") wird daher  $T_{i,\text{soll}}^*$  um so größer, je kleiner  $T_a$  ist, um den Wert  $T_{\text{opt}} = 24\text{ °C}$  zu erreichen. Ebenso muß für  $\lambda \rightarrow 0$  ("max. Ökonomie")  $T_{i,\text{soll}}^*$  um so mehr angehoben werden, je kleiner  $T_a$  ist, um den Wert  $T_{\text{min}} = 18\text{ °C}$  zu erhalten. Eine Sonderrolle spielt auch hier wieder das Ergebnis für  $T_a = 20\text{ °C}$ , bei der sich wie in Abb. 4.1-1  $T_{i,\text{soll}}^* = T_a = 20\text{ °C}$  ergibt.

Ein interessanter Effekt entsteht bei gleicher Wichtung der Gütekriterien ( $\lambda = 0.5$ ). Das Optimierungsergebnis hängt hier kaum von  $T_a$  ab. Dies hat folgenden Grund. Da  $T_{op}$  und  $\dot{Q}_{Heiz}$  linear von  $T_{i,soll}$  und  $T_a$  abhängen und da der Einfluß von  $T_a$  für  $\mu_{komf\_T}$  und  $\mu_{öko}$  gleichgerichtet ist (beide steigen mit  $T_a$ ), gibt es für  $\varepsilon > 0$  bei entsprechender Wichtung der Gütekriterien immer einen Schnittpunkt der Ergebnisse mit konstantem  $T_a$ . Dieser liegt hier etwa bei  $\lambda = 0.5$  und wandert mit größer werdendem  $\varepsilon$  zu größeren  $\lambda$ -Werten hin.

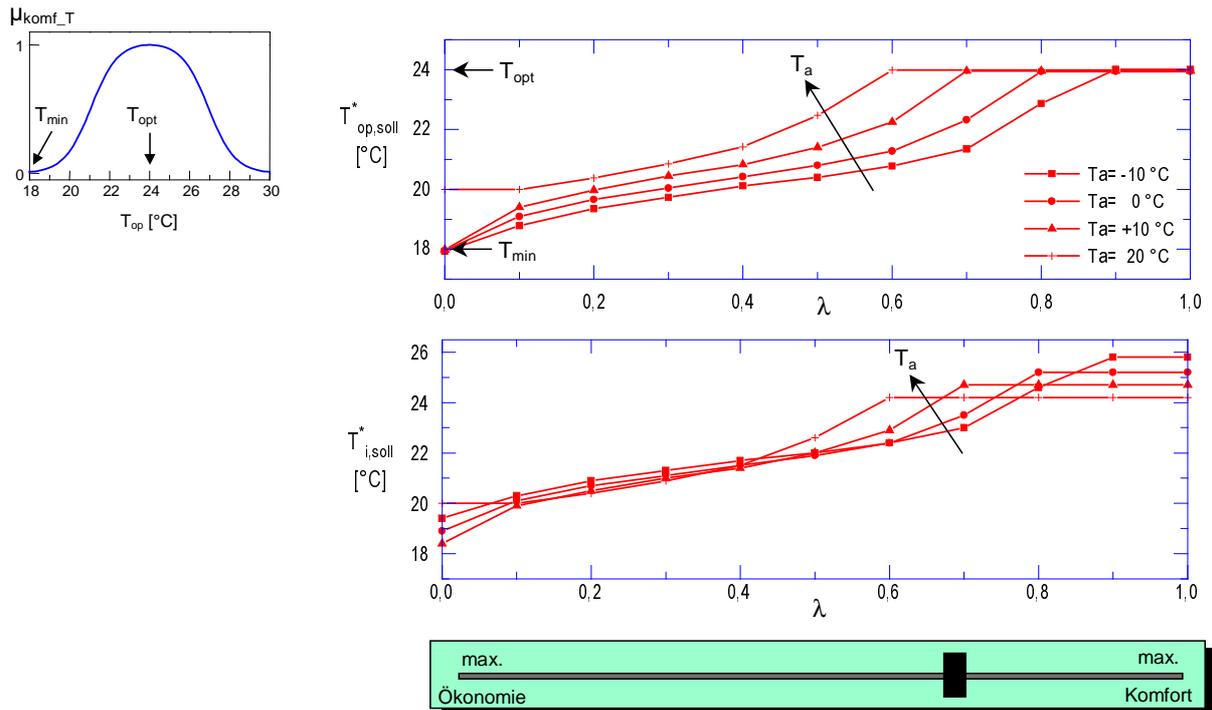


Abb. 4.1-3: Optimierter Sollwert der Innentemperatur  $T_{i,soll}^*$  (unten) und entsprechende Empfindungstemperatur  $T_{op,soll}^*$  (oben) bei schlecht isolierter Wand ( $\varepsilon = 0.05$ )

Die diskutierten Fallbeispiele zeigen zum einen, daß die Ergebnisse transparent sind, d.h. der Einfluß der charakteristischen Parameter der Komfort-ZGF sowie des Wichtungsfaktors und der Außentemperatur sind leicht interpretierbar. Zum anderen wird deutlich, daß das Zusammenspiel von bauphysikalischen Gegebenheiten (k-Wert, Wandfläche), physikalischen Wechselwirkungen (Transmissionsverluste, Strahlungseinfluß der Wände) und dem individuellen Komfort-Empfinden so komplex ist, daß es der Nutzer i. a. nur unzureichend überschaut und somit der Vorteil der entwickelten Leitkomponente unterstrichen wird. So wurde in den Fallbeispielen gezeigt, daß die Ergebnisse bei Veränderung der Bauphysik, hier zusammengefaßt im Parameter  $\varepsilon$ , sich bereits deutlich unterscheiden. Durch die Einbeziehung der Modellkomponenten (Gleichungen 3.4-7, 3.4-11) ist die Leitkomponente leicht an unterschiedliche Bauphysik anpaßbar.

#### 4.1.2.2 Optimierter Sollwert der Luftwechselrate

Bei der Optimierung des Sollwertes der Luftwechselrate  $LWR_{\text{soll}}$  gehen neben  $T_a$  die weiteren Außenklimagrößen  $\varphi_a$  und  $CO_{2a}$ , die Zustandsgrößen  $T_i$ ,  $\varphi_i$ ,  $CO_{2i}$ , sowie die internen Störgrößen  $\dot{C}O_{2\text{stör}}$ ,  $\dot{\varphi}_{\text{stör}}$  und  $\dot{T}_{\text{stör}}$  ein (vgl. 3.5.2). Wegen dieser großen Zahl von Einflußgrößen gestaltet sich die übersichtliche Darstellung der Ergebnisse etwas schwieriger. Es werden daher im folgenden nicht alle Komfort-ZGF gleichzeitig berücksichtigt, sondern ausgewählte Kombinationen:

- **Fallbeispiel 1:** Komfort-ZGF bezüglich  $CO_2$  und relativer Feuchte
- **Fallbeispiel 2:** Komfort-ZGF bezüglich  $CO_2$ , relativer Feuchte und Temperatur
- **Fallbeispiel 3:** Komfort-ZGF bezüglich  $CO_2$  und Zugerscheinungen

Diese Kombinationen entsprechen den Gegebenheiten der experimentellen Realisierung. Da in Raum 1 die relative Feuchte  $\varphi_i$  gemessen wird und die Lüftung über einen Ventilator realisiert wird, sind die Fallbeispiele 1 und 2 für Raum 1 relevant. Fallbeispiel 1 entspricht dabei dem Winterfall, Fallbeispiel 2 dem Sommerfall, da hierbei das Komfortkriterium bezüglich der Temperatur berücksichtigt werden muß.

In Raum 2 ist  $\varphi_i$  nicht verfügbar und die Lüftung wird über Schwenkfenster realisiert, weswegen hier die Zugerscheinungen mit berücksichtigt werden müssen. Somit ist Fallbeispiel 3 repräsentativ für die Verhältnisse in Raum 2.

##### Fallbeispiel 1

Es werden Komfort-ZGF bezüglich  $CO_2$ -Gehalt und relativer Feuchte ( $\mu_{\text{komf}_C}$ ,  $\mu_{\text{komf}_\varphi}$ ) berücksichtigt. Die folgenden momentanen Werte werden angenommen:

Innenklima:  $T_i = 20 \text{ °C}$ ,  $\varphi_i = 60 \text{ %}$ ,  $CO_{2i} = 1000 \text{ ppm}$

Außenklima:  $T_a = \{-10, 0, 10, 20\} \text{ °C}$ ,  $\varphi_a = 70 \text{ %}$ ,  $CO_{2a} = 300 \text{ ppm}$

Störquellen:  $\dot{\varphi}_{\text{stör}} = 5 \text{ %/h}$ ,  $\dot{C}O_{2\text{stör}} = 200 \text{ ppm/h}$

In Abb. 4.1-4 ist die Berechnung von  $LWR_{\text{soll}}^*$  nachgezeichnet. In den Bildern der ersten Zeile sind die angenommenen statischen Komfort-ZGF dargestellt. Das Bild in der zweiten Zeile links zeigt die Berechnung der Komfort-ZGF in Abhängigkeit von  $LWR_{\text{soll}}$  bei  $T_a = 0 \text{ °C}$ . Dabei nimmt  $\mu_{\text{komf}_C}$  für  $LWR = 0$  den Wert Null an, da  $CO_{2i}$  zu  $CO_{2\text{max}} = 1000 \text{ ppm}$  angenommen wurde und wegen  $\dot{C}O_{2\text{stör}} > 0$  ein weiteres Ansteigen von  $CO_{2i}$  zu erwarten ist. Mit  $LWR_{\text{soll}} \approx 0.5/\text{h}$  kann  $CO_{2i}$  gerade auf  $CO_{2\text{max}} = 1000 \text{ ppm}$  gehalten werden, so daß ab

diesem Wert  $\mu_{\text{komf}_C}$  größer Null wird.  $\text{LWR}_{\text{soll}} \approx 3/\text{h}$  entspricht dem internen Sollwert  $\text{CO2}_{\text{opt}} = 400 \text{ ppm}$ , so daß  $\mu_{\text{komf}_C}$  für  $\text{LWR}_{\text{soll}} > 3/\text{h}$  gleich Eins ist.

Die relative Feuchte  $\varphi_i$  hat mit 60% einen unkritischen Wert, somit ist  $\mu_{\text{komf}_\varphi}$  für niedrige  $\text{LWR}_{\text{soll}}$ -Werte ( $\leq 2/\text{h}$ ) gleich Eins. Da in diesem Fallbeispiel  $T_a$  mit  $0^\circ\text{C}$  als relativ niedrig angenommen wurde und somit starkes Lüften zu niedrigem  $\varphi_i$  führt, fällt  $\mu_{\text{komf}_\varphi}$  für  $\text{LWR}_{\text{soll}} > 2/\text{h}$  ab. Durch Verknüpfung von  $\mu_{\text{komf}_C}$  und  $\mu_{\text{komf}_\varphi}$  durch den MIN-Operator entsteht die resultierende Komfort-ZGF  $\mu_{\text{komf}}$ , die einem Kompromiß der Komfortforderungen bezüglich  $\text{CO2}_i$  und  $\varphi_i$  darstellt. Da das Maximum von  $\mu_{\text{komf}}$  bei  $\text{LWR}_{\text{soll}} \approx 2.5/\text{h}$  liegt und somit kleiner als der für  $\text{CO2}_{\text{opt}}$  notwendige Wert von  $3/\text{h}$  ist, kann  $\text{CO2}_{\text{opt}}$  nicht erreicht werden.

Im rechten Bild der zweiten Zeile sind exemplarisch für  $T_a = 0^\circ\text{C}$   $\mu_{\text{komf}}$  und  $\mu_{\text{öko}}$  sowie die Berechnung von  $\text{LWR}_{\text{soll}}^*$ , markiert durch den Kreis, bei gleicher Wichtung der Gütekriterien ( $\lambda = 0.5$ ) dargestellt.

In der dritten Zeile ist  $\text{LWR}_{\text{soll}}^*$  in Abhängigkeit des Wichtungsfaktors  $\lambda$  mit  $T_a$  als Scharparameter aufgetragen. Für  $\lambda \rightarrow 0$  ("max. Ökonomie") ist  $\text{LWR}_{\text{soll}}^* \approx 0.5/\text{h}$ , dies entspricht dem internen Sollwert  $\text{CO2}_{i,\text{soll}} = \text{CO2}_{\text{max}} = 1000 \text{ ppm}$ . Mit zunehmendem  $\lambda$  und  $T_a$ , d.h. stärkerer Wichtung der Komfortkriterien und wachsendem Zugehörigkeitsgrad zu  $\mu_{\text{öko}}$ , steigt  $\text{LWR}_{\text{soll}}^*$  an. Für  $\lambda \rightarrow 1$  ("max. Komfort") versucht das System den internen Sollwert  $\text{CO2}_{i,\text{soll}} = \text{CO2}_{\text{opt}} = 400 \text{ ppm}$  anzusteuern. Bei niedrigen  $T_a$ -Werten wirkt  $\varphi_i$  wegen zu erwartenden  $\varphi_i$ -Werten als Restriktion, so daß  $\text{LWR}_{\text{soll}}^*$  zu niedrigeren Werten absinkt. Dies entspricht einem Kompromiß der Komfortforderungen bezüglich  $\text{CO2}_i$  und  $\varphi_i$ .

Das betrachtete Fallbeispiel zeigt bereits auf, wie komplex das Zusammenspiel der internen und externen Einflußgrößen sein kann und wie sinnvoll daher die Unterstützung des Nutzers durch eine anwenderfreundliche Leitkomponente ist. Dies wurde besonders im Fall niedriger  $T_a$ -Werte anhand der gegensätzlichen Forderungen der Komfortkriterien bezüglich  $\text{CO2}_i$  und  $\varphi_i$  deutlich. Durch die Abbildung der physikalischen Vorgänge in den Modellgleichungen und den prädiktiven Ansatz wird der Einfluß der internen und externen Störgrößen abgeschätzt. Die gewichtete Kompromißbildung zwischen den einzelnen Komfortkriterien einerseits und dem Ökonomiekriterium ist transparent, da die jeweils definierten charakteristischen Parameter der Komfort- und Ökonomiekriterien eingehalten werden.

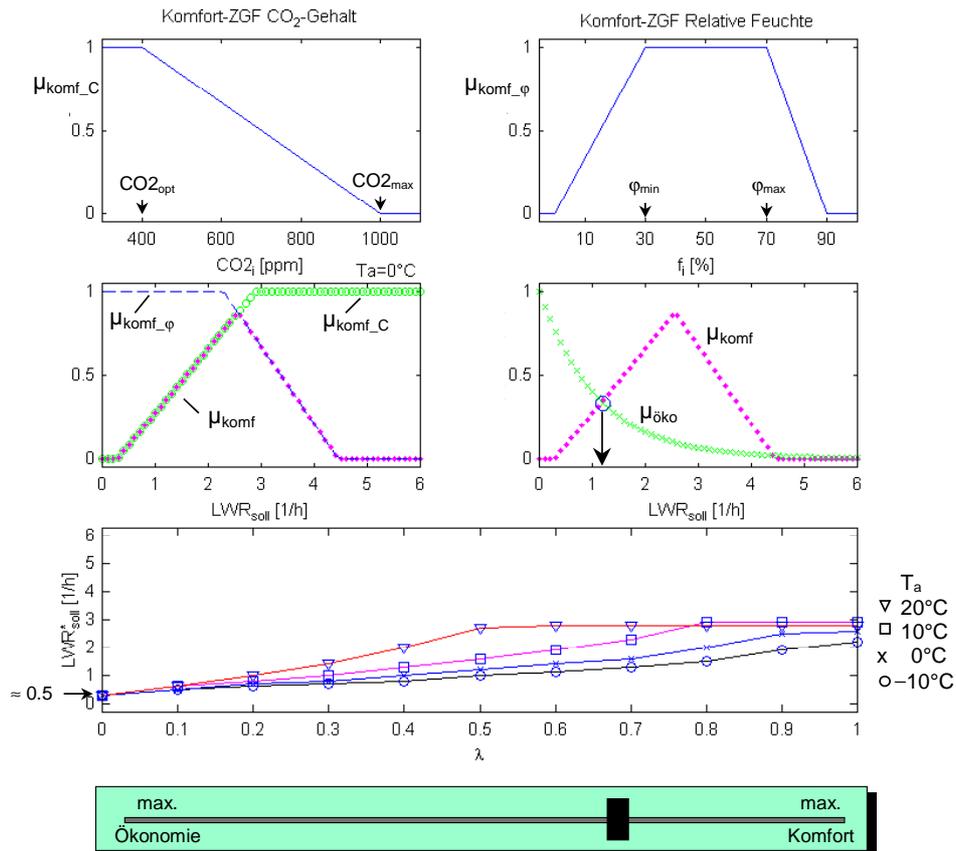


Abb. 4.1-4: Fallbeispiel 1: Bestimmung der optimalen Luftwechselrate im Winterfall unter Berücksichtigung der Komfortkriterien bezüglich  $\text{CO}_2$ -Gehalt und rel. Feuchte (angenommene aktuelle Werte:  $T_i = 20^\circ\text{C}$ ,  $\varphi_i = 60\%$ ,  $\text{CO}_{2i} = 1000\text{ppm}$ )

### Fallbeispiel 2

Im zweiten Fallbeispiel werden Komfort-ZGF bezüglich  $\text{CO}_2$ -Gehalt, relativer Feuchte und Temperatur ( $\mu_{\text{komf}_C}$ ,  $\mu_{\text{komf}_\varphi}$ ,  $\mu_{\text{komf}_T}$ ) berücksichtigt. Die zusätzliche Berücksichtigung von  $\mu_{\text{komf}_T}$  neben  $\mu_{\text{komf}_C}$ ,  $\mu_{\text{komf}_\varphi}$  erfolgt im Sommerfall, da es keine Aktorik zum Heizen oder Kühlen gibt (vgl. 3.5.1). Es werden folgende momentane Werte angenommen:

Innenklima:  $T_i = 26^\circ\text{C}$ ,  $\varphi_i = 80\%$ ,  $\text{CO}_{2i} = 1000\text{ppm}$

Außenklima:  $T_a = \{10, 20, 30\}^\circ\text{C}$ ,  $\varphi_a = 70\%$ ,  $\text{CO}_{2a} = 300\text{ppm}$

Störquellen:  $\dot{T}_{\text{stör}} = 1\text{K/h}$ ,  $\dot{\varphi}_{\text{stör}} = 5\%/h$ ,  $\dot{\text{CO}}_{2\text{stör}} = 200\text{ppm/h}$

Das Innenklima wurde also als sehr warm und feucht sowie mit schlechter Luftqualität angenommen. Es wird der Sommerfall betrachtet, d.h.  $T_a$  ist relativ hoch.

In Abb. 4.1-5 wird die Berechnung von  $LWR_{\text{soll}}^*$  diskutiert. Die Bilder der ersten Zeile zeigen die angenommenen statischen Komfort-ZGF bezüglich  $\text{CO}_{2i}$ ,  $\varphi_i$  und  $T_{\text{op}}$ . In den Zeilen zwei

bis vier sind jeweils in der linken Spalte die Komfort-ZGF für einen  $T_a$ -Wert dargestellt. In der rechten Spalte ist für den gleichen  $T_a$ -Wert die Berechnung von  $LWR_{soll}^*$  bei gleicher Wichtung der Gütekriterien ( $\lambda = 0.5$ ) gezeigt.

Da  $CO_{2i}$  beim Lüftungsprozeß von  $T_a$  unabhängig ist, ist die Komfort-ZGF bezüglich  $CO_{2i}$  ( $\mu_{komf\_C}$ ) in allen drei Zeilen identisch. Wie in Fallbeispiel 1 nimmt  $\mu_{komf\_C}$  für  $LWR = 0$  den Wert Null an, da  $CO_{2i}$  zu  $CO_{2max} = 1000$  ppm angenommen wurde und  $\dot{CO}_{2stör} > 0$  ist. Da  $T_i$  und  $\varphi_i$  im Lüftungsprozeß von  $T_a$  beeinflußt werden, sind auch die entsprechenden ZGF  $\mu_{komf\_T}$  und  $\mu_{komf\_φ}$  von  $T_a$  abhängig.

Da  $\varphi_i = 80\% > \varphi_{max}$  und wegen  $\dot{\varphi}_{stör} > 0$  ein weiterer Anstieg zu erwarten ist, nimmt  $\mu_{komf\_φ}$  für  $LWR_{soll} = 0$  einen Wert kleiner als Eins an ( $\mu_{komf\_φ} \approx 0.4$ ). In Abhängigkeit von  $T_a$  variiert der Bereich von  $LWR_{soll}$ , mit dem interne Sollwerte von  $\varphi_i$  im Intervall  $[\varphi_{min}, \varphi_{max}] = [30\%, 70\%]$  und damit  $\mu_{komf\_φ} = 1$  erreicht werden. Da die effektive Außenfeuchte  $\tilde{\varphi}_a = \varphi_a x_{max}(T_a) / x_{max}(T_i)$  (Gleichung 2.3-29) mit  $T_a$  abnimmt und damit zum Erreichen eines bestimmten Wertes von  $\varphi_i$  eine geringere Luftwechselrate notwendig ist, ist dieser Bereich bei  $T_a = 10^\circ C$  kleiner als bei  $T_a = 20^\circ C$ . So erstreckt sich der Bereich für  $T_a = 10^\circ C$  von  $LWR_{soll} \approx 0.7/h$  bis  $LWR_{soll} \approx 3.0/h$ , für  $T_a = 20^\circ C$  hingegen von  $LWR_{soll} \approx 1.0$  bis  $LWR_{soll} \approx 5.0/h$ . Da  $\varphi_i$  für sehr große Werte von  $LWR_{soll}$  unter  $\varphi_{min}$  absinken wird, fällt  $\mu_{komf\_φ}$  in diesen Bereichen wieder ab.

Für den Fall  $T_a = 30^\circ C$  liegen völlig andere Verhältnisse vor, da nun  $T_a > T_i$  ist. Die effektive Außenfeuchte  $\tilde{\varphi}_a$  wird nun größer als  $\varphi_i$ , somit wird durch den Lüftungsprozeß  $\varphi_i$  erhöht. Das hat zur Konsequenz, daß  $\mu_{komf\_φ}$  mit  $LWR_{soll}$  sinkt und für  $LWR_{soll} > 3/h$  sogar gleich Null ist.

Insgesamt bedeutet dies, daß  $\mu_{komf\_φ}$  für  $T_a = 10^\circ C$  und  $T_a = 30^\circ C$  für hohe Werte von  $LWR_{soll}$  gleich Null wird und somit den zur Verfügung stehenden Wertebereich von  $LWR_{soll}$  einschränkt.

Eine ähnliche Situation liegt bei der Komfort-ZGF  $\mu_{komf\_T}$  vor. Für den Fall  $T_a = 10^\circ C$  kann bereits mit geringer Luftwechselrate der momentane Wert  $T_i = 26^\circ C$  auf den optimalen Wert  $T_{opt} = 24^\circ C$  gebracht werden. Für  $LWR_{soll} > 1.5/h$  wird der minimal zulässige Wert  $T_{min} = 18^\circ C$  unterschritten, weswegen  $\mu_{komf\_T}$  in diesem Bereich gleich Null wird. Für den Fall  $T_a = 20^\circ C$  ergibt sich ein ähnlicher Verlauf von  $\mu_{komf\_T}$ , allerdings werden  $T_{opt}$  und  $T_{min}$  erst mit größeren  $LWR_{soll}$ -Werten erreicht. Für  $T_a = 30^\circ C$  wird  $T_i = 26^\circ C$  weiter erhöht werden. Daher ist  $\mu_{komf\_T}$  monoton fallend mit  $LWR_{soll}$  und wird für  $LWR_{soll} > 3/h$  sogar gleich Null.

In den Bildern der rechten Spalte ist die Berechnung von  $LWR_{soll}^*$  bei gleicher Wichtung der Gütekriterien dargestellt. Die resultierende Komfort-ZGF  $\mu_{komf}$  ergibt sich wieder durch

Verknüpfung von  $\mu_{\text{komf}_C}$ ,  $\mu_{\text{komf}_\varphi}$  und  $\mu_{\text{komf}_T}$  durch den MIN-Operator. Die Ökonomie-ZGF  $\mu_{\text{öko}}$  spielt hier wegen der hohen Außentemperaturen nur eine geringe Rolle. Allerdings hat  $\mu_{\text{öko}}$  auch für  $T_a > T_i$  (dritte Zeile, rechtes Bild) einen monoton fallenden Verlauf. Dies entspricht der aufzuwendenden Ventilatorleistung.

In der fünften Zeile ist  $LWR_{\text{soll}}^*$  in Abhängigkeit des Wichtungsfaktors  $\lambda$  mit  $T_a$  als Scharparameter aufgetragen. Für  $\lambda \rightarrow 0$  ("max. Ökonomie") ergibt sich wie in Fallbeispiel 1  $LWR_{\text{soll}}^* \approx 0.5/h$ , dies entspricht dem internen Sollwert  $CO_{2,i,\text{soll}} = CO_{2,\text{max}} = 1000$  ppm. Mit zunehmendem  $\lambda$ , d.h. stärkerer Wichtung der Komfortkriterien, steigt  $LWR_{\text{soll}}^*$  an. Für  $\lambda \rightarrow 1$  ("max. Komfort") ist  $LWR_{\text{soll}}^*$  von  $T_a$  abhängig. Für  $T_a = 10^\circ\text{C}$  und  $T_a = 30^\circ\text{C}$  wirkt  $\mu_{\text{komf}_T}$  wegen zu erwartender starker Abkühlung von  $T_i$  im Falle  $T_a = 10^\circ\text{C}$  bzw. starker Erwärmung bei  $T_a = 30^\circ\text{C}$  als stärkere Restriktion als bei  $T_a = 20^\circ\text{C}$ , so daß  $LWR_{\text{soll}}^*$  bei  $T_a = 20^\circ\text{C}$  den höchsten Wert annimmt.

Das betrachtete Fallbeispiel läßt deutlich erkennen, daß bei der Berücksichtigung mehrerer Komfortkriterien im Sommerfall durch den Einfluß von  $T_a$  und dem Vorzeichenwechsel der Terme  $(T_i - T_a)$  und  $(\varphi_i - \bar{\varphi}_a)$  komplexe Situationen entstehen, die der Nutzer in der Regel nicht überschauen kann. Während im Winterfall der Kompromiß zwischen Komfort- und Ökonomiekriterien im Vordergrund steht, bestehen im Sommerfall eher gegenläufige Anforderungen zwischen den einzelnen Komfortkriterien.

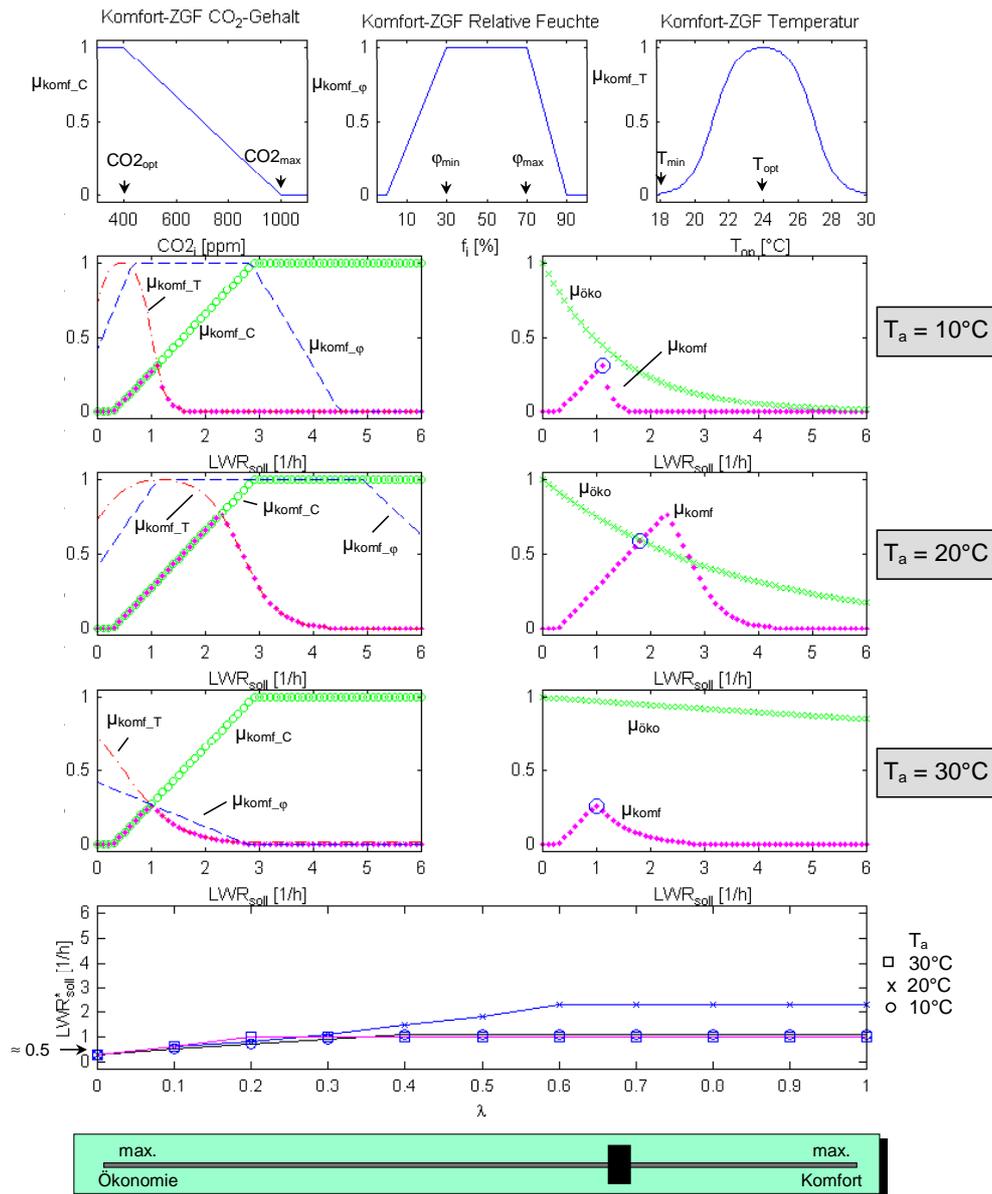


Abb. 4.1-5: Fallbeispiel2: Bestimmung der optimalen Luftwechselrate im Sommerfall unter Berücksichtigung der Komfortkriterien bezüglich  $CO_2$ -Gehalt, rel. Feuchte und Temperatur (angenommene aktuelle Werte:  $T_i = 26^\circ C$ ,  $\varphi_i = 80\%$ ,  $CO_{2i} = 1000\text{ppm}$ )

### Fallbeispiel 3

Im dritten und letzten Fallbeispiel werden Komfort-ZGF bezüglich  $CO_2$ -Gehalt und Zugserscheinungen ( $\mu_{komf\_C}$ ,  $\mu_{komf\_Z}$ ) berücksichtigt. Zugserscheinungen werden als Komfort-Kriterium berücksichtigt, wenn als Lüftungsaktorik ein Schwenkfenster zur Verfügung steht.

Es werden folgende momentane Werte angenommen:

Innenklima:  $T_i = 20^\circ C$ ,  $CO_{2i} = 1000\text{ppm}$

Außenklima:  $T_a = \{-10, 0, 10, 20\} \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $\text{CO}_2_a = 300 \text{ ppm}$

Störquellen:  $\dot{\text{CO}}_{2\text{stör}} = 200 \text{ ppm/h}$

In den Bildern der ersten Zeile von Abb. 4.1-6 sind die angenommenen statischen Komfort-ZGF dargestellt.

Das Bild in der zweiten Zeile links zeigt die Berechnung der Komfort-ZGF in Abhängigkeit von  $\text{LWR}_{\text{soll}}$  bei  $T_a = 0^\circ\text{C}$ . Die Komfort-ZGF bezüglich  $\text{CO}_2_i$ ,  $\mu_{\text{komf}_C}$ , zeigt den gleichen Verlauf wie in den vorangegangenen Fallbeispielen. Die Komfort-ZGF bezüglich Zegerscheinungen,  $\mu_{\text{komf}_Z}$ , wirkt sich wegen des hier angenommenen niedrigen Wertes von  $T_a$  als relativ starke Restriktion aus. Da das Maximum der resultierenden Komfort-ZGF  $\mu_{\text{komf}}$  bei  $\text{LWR}_{\text{soll}} \approx 0.8/\text{h}$  liegt und somit kleiner als der für  $\text{CO}_{2\text{opt}}$  notwendige Wert von etwa  $3/\text{h}$  ist, kann  $\text{CO}_{2\text{opt}}$  nicht erreicht werden.

Im rechten Bild der zweiten Zeile sind exemplarisch für  $T_a = 0^\circ\text{C}$   $\mu_{\text{komf}}$  und  $\mu_{\text{öko}}$  sowie die Berechnung von  $\text{LWR}_{\text{soll}}^*$  bei gleicher Wichtung der Gütekriterien dargestellt. Da der maximale Zugehörigkeitsgrad von  $\mu_{\text{komf}}$  nur etwa  $0.3$  beträgt, wird die optimale Entscheidung hier von  $\mu_{\text{öko}}$  gar nicht beeinflusst.

In der dritten Zeile ist  $\text{LWR}_{\text{soll}}^*$  in Abhängigkeit des Wichtungsfaktors  $\lambda$  mit  $T_a$  als Scharparameter aufgetragen. Für  $\lambda \rightarrow 0$  ("max. Ökonomie") nimmt  $\text{LWR}_{\text{soll}}^*$  wie in den vorangegangenen Fallbeispielen etwa den Wert  $0.5/\text{h}$  an, was dem internen Sollwert  $\text{CO}_{2_i, \text{soll}} = \text{CO}_{2_{\text{max}}} = 1000 \text{ ppm}$  entspricht. Nur für  $T_a = 20^\circ\text{C}$  ist eine ausgeprägte Abhängigkeit von  $\lambda$  zu verzeichnen, da hier  $\mu_{\text{komf}_Z}$  nicht mehr als Restriktion wirkt. Schon für  $\lambda = 0.6$  wird das Plateau erreicht, weil auch  $\mu_{\text{öko}}$  bei  $T_a = 20^\circ\text{C}$  keine starke Restriktion darstellt.

Für  $T_a \leq 10^\circ\text{C}$  ist fast keine  $\lambda$ -Abhängigkeit gegeben, da sich dann, wie im Bild links der zweiten Zeile gezeigt,  $\mu_{\text{komf}_Z}$  als starke Restriktion auswirkt und somit  $\mu_{\text{öko}}$  nur bei kleinen  $\lambda$ -Werten von Bedeutung ist.

Das Fallbeispiel zeigt, daß bei der Berücksichtigung von Zegerscheinungen der Einfluß des Wichtungsfaktors  $\lambda$  eher gering ist. Dies ist einfach dadurch zu begründen, daß sowohl  $\mu_{\text{komf}_Z}$  als auch  $\mu_{\text{öko}}$  um so stärker als Restriktion wirken, je niedriger  $T_a$  ist. Es bestehen dann also keine gegenläufigen Anforderungen hinsichtlich Komfort- und Ökonomiekriterien, so daß auch die Wichtung keinen großen Einfluß hat.

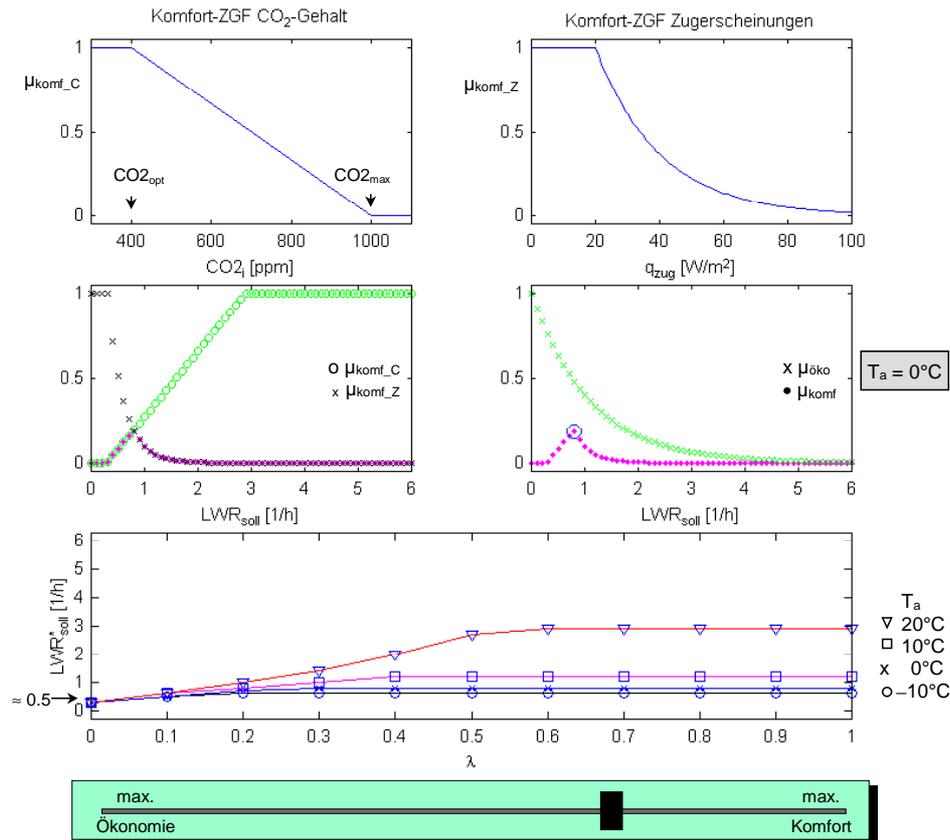


Abb. 4.1-6: Fallbeispiel3: Bestimmung der optimalen Luftwechselrate unter Berücksichtigung der Komfortkriterien bezüglich  $\text{CO}_2$ -Gehalt und Zugerscheinungen (angenommene aktuelle Werte:  $T_i = 20^\circ\text{C}$ ,  $\text{CO}_{2i} = 1000$  ppm)

#### 4.1.3 Untersuchung des Verhaltens der Leitkomponente mit Regelstrecke

Das Verhalten und die Wirkung der Fuzzy-Leitkomponente wurde in zahlreichen dynamischen Simulationen unter Annahme praxisnaher Umgebungsbedingungen und Bedienszenarien untersucht. Dabei standen insbesondere folgende Aspekte im Vordergrund:

- Einfluß des Außenklimas
- Einfluß von unterschiedlicher Raumbelagung
- Einfluß der Kosten-Komfortwichtung (Schieberstellung) auf das dynamische Verhalten sowie die verbrauchte Heizenergie
- Vorteil der Leitkomponente gegenüber manueller Sollwertvorgabe
- Robustheit der Leitkomponente gegenüber Parameterschwankungen

Aus der Vielzahl von Simulationsergebnissen werden im folgenden einige charakteristische Fälle näher beleuchtet, die auf die genannten Punkte eingehen.

Zuerst wird ein Raubelegungsszenario gewählt, bei dem die Personenzahl von Eins bis fünf steigt, so daß der Einfluß von unterschiedlicher Raubelegung besonders deutlich wird (s. 4.1.3.1). Dabei wird je ein Tag mit typischen Außenklimaszenarien zu den vier Jahreszeiten untersucht.

Danach wird die Leitkomponente mit manuellen Bedienstrategien bei gleichem Raubelegungsszenario wie in Unterabschnitt 4.1.3.1 verglichen (s. 4.1.3.2).

Bilanzen der Heizenergie, Lüftungs- und Transmissionsverluste des simulierten Tages in Abhängigkeit der Kosten-Komfortwichtung werden diskutiert und mit den Energiebilanzen bei manueller Sollwertvorgabe verglichen (s. 4.1.3.3).

Anschließend wird die Robustheit der Leitkomponente gegenüber Störungen der Luftwechselrate diskutiert (s. 4.1.3.4). Dabei werden die zwei Fälle von Störungen betrachtet, die in Unterabschnitt 3.5.4 bereits theoretisch untersucht wurden.

Schließlich wird der für die praktische Realisierung wichtige Fall der Fensterlüftung untersucht (s. 4.1.3.5).

#### **4.1.3.1 Verhalten bei unterschiedlicher Raubelegung**

In Abb. 4.1-7 bis Abb. 4.1-10 sind die Simulationsergebnisse der Fälle Winter, Herbst, Frühling und Sommer dargestellt. Es wurde für den Fall "Herbst" angenommen, daß die Heizung aktiviert ist, für den Fall "Frühling", daß sie nicht aktiviert ist. Diese Annahme, die hier willkürlich getroffen wurde, entspricht der Tatsache, daß in diesen Übergangsjahreszeiten beide Fälle bei ähnlichem Außenklima vorkommen können.

Aufgetragen sind die Ist- und Sollwerte der Innentemperatur ( $T_{i,ist}$ ,  $T_{i,soll}$ ), die Anzahl der Personen im Raum (Personen), die Ist- und Sollwerte der Luftwechselrate ( $LWR_{ist}$ ,  $LWR_{soll}$ ), der  $CO_2$ -Gehalt innen und außen ( $CO_{2,i}$ ,  $CO_{2,a}$ ), die relative Feuchte innen und außen ( $\varphi_i$ ,  $\varphi_a$ ) und die Temperatur außen ( $T_a$ ). Der Raum wurde als gut isoliert angenommen ( $k \approx 0 \Rightarrow \varepsilon \approx 0$ ), so daß die empfundene Temperatur  $T_{op}$  etwa gleich  $T_i$  ist.

Die Simulation wurde für die Kosten-Komfortwichtung  $\lambda \rightarrow 0$  ("max. Ökonomie"),  $\lambda = 0.5$  ("mittel") und  $\lambda \rightarrow 1$  ("max. Komfort") durchgeführt und in jeweils einem Bild dargestellt. Die Parameter der Komfort-ZGF bezüglich Temperatur,  $CO_2$ -Gehalt und relative Feuchte ( $T_{min}$ ,  $T_{opt}$ ,  $CO_{2,opt}$ ,  $CO_{2,max}$ ,  $\varphi_{min}$ ,  $\varphi_{max}$ ) sind durch Hilfslinien gekennzeichnet.

### Fallbeispiel Winter

In Abb. 4.1-7 ist der Zeitverlauf eines typischen Wintertages dargestellt. Mit der Anwesenheit der ersten Person um 8:00 h wird  $T_{i,soll}$  vom konstanten Abwesenheits-Sollwert 15 °C auf einen Wert in Abhängigkeit von  $\lambda$  und  $T_a$  gesetzt. Für das Szenario  $\lambda \rightarrow 0$  ("max. Ökonomie") bedeutet dies  $T_{i,soll} = T_{min} = 18$  °C, für  $\lambda \rightarrow 1$  ("max. Komfort") ergibt sich  $T_{i,soll} = T_{opt} = 24$  °C. Für  $\lambda = 0.5$  ("mittel") liegt  $T_{i,soll}$  bei 21 °C und steigt leicht mit  $T_a$ .

Die Luftwechselrate LWR wird in den Szenarien zu unterschiedlichen Zeitpunkten aktiviert. Im Szenario  $\lambda \rightarrow 0$  wird LWR bereits um ca. 8:45 h, für  $\lambda \rightarrow 1$  hingegen erst um ca. 10:30 h eingeschaltet. Dies ist für  $\lambda \rightarrow 1$  dadurch bedingt, daß  $CO_{2i}$  den Wert  $CO_{2opt} = 400$  ppm überschreitet, im Szenario  $\lambda \rightarrow 0$  wird LWR bei Annäherung von  $CO_{2i}$  an  $CO_{2max} = 1000$  ppm aktiviert.

Im Szenario  $\lambda \rightarrow 1$  ("max. Komfort") ist die Leitkomponente bestrebt,  $CO_{2i}$  auf  $CO_{2opt}$  zu bringen. Wegen der sehr niedrigen Außentemperatur führt starkes Lüften zur Absenkung von  $\varphi_i$ . Daher bewirkt das Erreichen der unteren Schwelle  $\varphi_{min}$ , daß LWR nicht zu stark erhöht wird. Dadurch steigt  $CO_{2i}$  auf bis zu 500 ppm an. Dies entspricht einem Kompromiß zwischen den hier gegenläufigen Komfortforderungen bezüglich  $CO_{2i}$  und  $\varphi_i$ .

Für  $\lambda \rightarrow 0$  ("max. Ökonomie") führt die Leitkomponente den Prozeß bei minimalem Energieverbrauch, ohne jedoch die definierten Komfortgrenzen zu überschreiten. Daher wird LWR gerade so eingestellt, daß  $CO_{2i}$  bei  $CO_{2max} = 1000$  ppm gehalten wird. Die relative Feuchte  $\varphi_i$  steigt dabei auf ca. 70 % an und liegt somit noch im optimalen Bereich ( $\varphi_{min} < \varphi_i < \varphi_{max}$ ).

Im Szenario  $\lambda = 0.5$  ("mittel") stellt sich LWR so ein, daß  $CO_{2i}$  zwischen 700 ppm und 850 ppm gehalten wird. Da mit steigender Personenzahl die  $CO_2$ -Störquellen anwachsen, wächst auch der Lüftungsbedarf. Somit entspricht der leichte Anstieg von  $CO_{2i}$  bei ebenfalls leicht steigender LWR einem Kompromiß zwischen den gegenläufigen Forderungen bezüglich Komfort und Ökonomie.  $\varphi_i$  variiert zwischen 40 % und 50 % und bleibt damit im optimalen Bereich.

Nachdem um 18:00 h alle Personen den Raum verlassen haben, schaltet die Leitkomponente auf den Abwesenheitsmode um (vgl. Abschnitt 3.6). Dabei wird  $T_{i,soll} = 15$  °C und  $\lambda$  intern auf 0.01 gesetzt ("max. Komfort"). Dies bewirkt, daß bei deaktivierter Heizung und somit ohne Heizenergieverbrauch  $CO_{2i}$  auf  $CO_{2opt}$  und damit die Luftqualität auf Komfortniveau gebracht wird. Bei erneuter Raumbesetzung muß erst nach längerer Anwesenheitsphase wieder gelüftet werden.

Interessant ist der nichtlineare Effekt, daß die Werte von LWR für  $\lambda \rightarrow 0$  und  $\lambda = 0.5$  sich nur um ca. 0.5/h unterscheiden und damit  $\text{CO}_2_i \approx 1000$  ppm bzw.  $\text{CO}_2_i \approx 800$  ppm erzielt werden, hingegen für  $\lambda \rightarrow 1$  wesentlich höhere Werte für LWR erforderlich sind ( $\text{LWR} \approx 4/h$ ), um  $\text{CO}_2_i \approx 500$  ppm einzuhalten. Dies ist in der DGL bezüglich  $\text{CO}_2_i$

$$\dot{\text{CO}}_2_i = -\text{LWR}(\text{CO}_2_i - \text{CO}_2_a) + \dot{\text{CO}}_{2_{\text{stör}}} \quad (2.3-23)$$

begründet, da der "Verstärkungsfaktor"  $(\text{CO}_2_i - \text{CO}_2_a)$  von LWR für  $\text{CO}_2_i \rightarrow \text{CO}_2_a$  gegen Null tendiert.

Die Trajektorien von  $\text{CO}_2_i$ ,  $\varphi_i$  zeigen weitgehend schwingungsfreies und somit gutes Verhalten. So wird im Szenario  $\lambda \rightarrow 0$  die obere Grenze  $\text{CO}_{2_{\text{max}}} = 1000$  ppm, im Szenario  $\lambda \rightarrow 1$  der optimale Wert  $\text{CO}_{2_{\text{opt}}} = 400$  ppm ohne Über- bzw. Unterschwinger eingestellt. Dies zeigt zum einen, daß der Störquellenschätzalgorithmus (s. 3.5.3) schwingungsfrei ist, und zum anderen, daß das Systemverhalten der geforderten Referenztrajektorie zum jeweiligen internen Sollwert folgt. Ebenso ist die Trajektorie von LWR charakterisiert durch einen glatten Verlauf mit wenig Stellbewegung.

### Fallbeispiel Herbst

Abb. 4.1-8 zeigt die Simulation eines Herbsttages. Die Heizung wurde als aktiviert angenommen. Die Außentemperatur  $T_a$  ist gegenüber dem Fallbeispiel Winter um 10 °C angehoben, so daß  $T_a$  zwischen 5 °C und 15 °C variiert. Die relative Feuchte außen  $\varphi_a$  schwankt nun zwischen 50 % und 90 %, während sie im Fallbeispiel Winter zwischen 65 % und 90 % variierte.

Bezüglich  $T_i$  ergibt sich für das Szenario  $\lambda \rightarrow 1$  ("max. Komfort") keine gravierende Änderung gegenüber dem Fallbeispiel Winter. Für  $\lambda \rightarrow 0$  ("max. Ökonomie") übersteigt der Istwert  $T_{i,\text{ist}}$  den Sollwert  $T_{i,\text{soll}} = T_{\text{min}} = 18$  °C, ohne daß geheizt wird. Dies ist auf die starken internen Wärmequellen sowie die wegen der niedrigeren Außentemperatur reduzierten Lüftungs- und Transmissionswärmeverluste zurückzuführen. Im Szenario  $\lambda = 0.5$  ("mittel") variiert  $T_{i,\text{soll}}$  in Abhängigkeit von  $T_a$  zwischen 21 °C und 22 °C.

Die Trajektorie von LWR ist im Szenario  $\lambda \rightarrow 0$  ("max. Ökonomie") fast identisch mit der des Winter-Fallbeispiels, d.h. die Leitkomponente ist bestrebt,  $\text{CO}_2_i$  bei  $\text{CO}_{2_{\text{max}}} = 1000$  ppm zu halten. Da  $\mu_{\text{kompf}_C} = 0$  für  $\text{CO}_2_i > \text{CO}_{2_{\text{max}}}$  wird diese Grenze unabhängig von  $T_a$  eingehalten.

Für  $\lambda \rightarrow 1$  ("max. Komfort") stellt sich LWR nun so ein, daß  $\text{CO}_2_i$  auf  $\text{CO}_{2_{\text{opt}}} = 400$  ppm gebracht wird. Im Gegensatz zum Fallbeispiel Winter ist dies nun möglich, da wegen der erhöhten Außentemperatur durch starkes Lüften die relative Feuchte  $\varphi_i$  nicht unter

$\varphi_{\min} = 30\%$  abgesenkt wird und somit  $\varphi_i$  nicht als Restriktion wirkt. Ab etwa 14:00 h erreicht LWR den maximalen Wert  $LWR_{\max} = 6/h$ , so daß  $CO_2_i$  auf ca. 450 ppm ansteigt.

Da wegen der erhöhten Außentemperatur die zu erwartenden Lüftungsverluste kleiner sind, wird LWR im Szenario  $\lambda = 0.5$  ("mittel") im Vergleich zum Fallbeispiel Winter etwas erhöht, so daß  $CO_2_i$  hier zu niedrigeren Werten gelangt. Während  $CO_2_i$  im Fallbeispiel Winter zwischen 700 ppm und 850 ppm variierte, liegt  $CO_2_i$  nun zwischen 650 ppm und 800 ppm.

### Fallbeispiel Frühling

In Abb. 4.1-9 ist der Zeitverlauf eines Frühlingstages dargestellt. Die Außentemperatur  $T_a$  variiert nun zwischen 10 °C und 20 °C. Die relative Feuchte  $\varphi_a$  ist unverändert gegenüber dem Herbstszenario. Da angenommen wird, daß die Heizung als Aktorik nicht zur Verfügung steht, ist  $T_{i,\text{soll}}$  in Abb. 4.1-9 nicht aufgetragen. Für die Leitkomponente bedeutet dies, daß nun das Komfortkriterium bezüglich  $T_i$ ,  $\mu_{\text{komf}_T}$ , als weiteres Kriterium bei der Optimierung von  $LWR_{\text{soll}}$  berücksichtigt wird.

Die Trajektorie von LWR ist im Szenario  $\lambda \rightarrow 0$  ("max. Ökonomie") identisch mit der des Herbst- und Winter-Fallbeispiels, d.h.  $CO_2_i$  wird bei  $CO_{2,\max} = 1000$  ppm gehalten.

In den Szenarien  $\lambda = 0.5$  ("mittel") und  $\lambda \rightarrow 1$  ("max. Komfort") wird LWR nun erst gegen 10:00 h und somit über eine Stunde später als im Fallbeispiel Herbst aktiviert, da  $T_i$  zu diesem Zeitpunkt nur bei etwa 20 °C liegt und somit einen geringen Komfort-Zugehörigkeitsgrad  $\mu_{\text{komf}_T} \approx 0.2$  hat. Somit steigt  $CO_2_i$  kurzzeitig auf 800 ppm an. Wegen der zunehmenden internen Wärmequellen und der sich erhöhenden Außentemperatur wird LWR nun erhöht, so daß  $CO_2_i$  etwa auf  $CO_{2,\text{opt}} = 400$  ppm gebracht wird. Für  $\lambda \rightarrow 1$  erreicht LWR ab 13:00 h den maximalen Wert  $LWR_{\max} = 6/h$ , so daß  $CO_2_i$  geringfügig ansteigt. Im Szenario  $\lambda = 0.5$  stellt sich LWR auf etwa 2.5/h ein, wodurch  $CO_2_i$  unter 700 ppm bleibt. Der Vergleich mit dem Fallbeispiel Herbst zeigt eine Erhöhung von LWR um ca. 0.5/h und eine entsprechende Absenkung von  $CO_2_i$  um etwa 100 ppm.

Die relative Feuchte  $\varphi_i$  liegt bei allen Szenarien zwischen 50 % und 70 % und somit im optimalen Bereich.

### Fallbeispiel Sommer

Abb. 4.1-10 zeigt die Simulation eines warmen Sommertages. Die Außentemperatur  $T_a$  variiert zwischen 17 °C und 27 °C, die relative Feuchte  $\varphi_a$  ist unverändert gegenüber dem Frühlings- und Herbst-Fallbeispiel.

Da nun  $T_a$  etwa gleich  $T_i$  ist, wurde die Differenz  $(T_i - T_a)$ , deren Vorzeichen darüber entscheidet, ob durch Lüften Kühlung oder Erwärmung erfolgt, zusätzlich aufgetragen.

Obwohl nun keine Lüftungswärmeverluste mehr anfallen, ist das Ökonomiekriterium trotzdem kleiner als Eins, da die aufzuwendende Ventilatorleistung zu berücksichtigen ist. Somit ergibt sich im Szenario  $\lambda \rightarrow 0$  ("max. Ökonomie") etwa die gleiche Trajektorie bezüglich LWR wie in den vorangegangenen Szenarien.

In den Szenarien  $\lambda = 0.5$  ("mittel") und  $\lambda \rightarrow 1$  ("max. Komfort") wird LWR bis etwa 10:00 h nicht aktiviert, da  $T_a$  bis zu diesem Zeitpunkt kleiner ist als  $T_i$  und der Komfort-Zugehörigkeitsgrad von  $T_i \approx 20$  °C gering ist. Ab etwa 10:00 h hat  $(T_i - T_a)$  die Hysteresegrenze von  $-1$  °C unterschritten, d.h.  $(T_i - T_a)$  wird als negativ erkannt, so daß durch Lüften eine Erwärmung erfolgt. Da der Betrag von  $(T_i - T_a)$  mit etwa  $1$  °C klein ist, gibt die Leitkomponente den maximalen Wert  $LWR = LWR_{\max} = 6/h$  aus. Gegen 14:00 h hat  $T_i$  den optimalen Wert  $T_{\text{opt}} = 24$  °C überschritten, so daß nun das Komfortkriterium bezüglich  $T_i$  als Restriktion wirkt und zu niedrigeren LWR-Werten führt. Daher steigt  $CO_{2i}$  bis 17:00 h auf etwa 800 ppm an. Ab diesem Zeitpunkt wird die obere Hysteresegrenze von  $+1$  °C überschritten, d.h.  $(T_i - T_a)$  wird als positiv erkannt, so daß durch Lüften eine Abkühlung erfolgt. LWR steigt daher sprunghaft auf  $LWR_{\max}$  an, wodurch  $CO_{2i}$  rasch abfällt.

Wie im Fallbeispiel Frühling liegt die relative Feuchte  $\varphi_i$  bei allen Verläufen zwischen 50 % und 70 % und somit im optimalen Bereich.

### Zusammenfassung der Ergebnisse

Es wurde gezeigt, daß über den Wichtungsfaktor  $\lambda$  die Optimierung von  $T_{i,\text{soll}}$  und  $LWR_{\text{soll}}$  entsprechend der gewünschten Kosten-Komfortwichtung auf sehr einfache und transparente Weise möglich ist. Dies bedeutet, daß die in den Komfortkriterien definierten optimalen und minimalen Komfortwerte ( $T_{\min}$ ,  $T_{\text{opt}}$ ;  $\varphi_{\min}$ ,  $\varphi_{\max}$ ;  $CO_{2\text{opt}}$ ,  $CO_{2\max}$ ) entsprechend der gewählten Kosten-Komfortwichtung eingehalten werden.

Die Simulationen verdeutlichen, daß die Leitkomponente sich entsprechend dem jeweiligen Außenklima und den Störgrößen im Raum optimal anpaßt. Dies ist besonders bemerkenswert, da sich in Abhängigkeit des Außenklimas sehr unterschiedliche, z. T. gegensätzliche Anforderungen in den Komfortforderungen ergeben, z. B. im Winterfall Komfort bezüglich  $CO_2$  versus Komfort bezüglich relative Feuchte und im Sommerfall Komfort bezüglich  $CO_2$  versus Komfort bezüglich Temperatur.

Ebenso kann sich in Abhängigkeit der Innen- und Außenklimagrößen die Wirkungsrichtung von LWR umkehren, z. B. Kühlung/Erwärmung der Luft; Erhöhung/Absenkung der relativen Feuchte im Raum. Die Simulationen zeigen, daß die Leitkomponente aufgrund der internen Modellkomponenten diesen Zusammenhängen gerecht wird.

Anhand des gewählten Raumbesetzungsszenarios wurde demonstriert, daß der Störgrößenschätzalgorithmus eine Anpassung auch an eine sehr unterschiedliche Anzahl

von Personen und den damit verbundenen Störquellen im Raum ermöglicht. Die Trajektorien von  $T_i$ ,  $\varphi_i$ ,  $\text{CO}_2_i$  besonders in den Szenarien  $\lambda \rightarrow 0$  und  $\lambda \rightarrow 1$  zeigen, daß sich das Systemverhalten gemäß der definierten Referenztrajektorien überschwingungsfrei verhält. Somit ist das interne Modell der Leitkomponente in guter Übereinstimmung mit der tatsächlichen Strecke. Die Trajektorie von LWR ist im wesentlichen charakterisiert durch einen glatten Verlauf mit wenig Stellbewegung.

Die Simulationen des Frühlings- und Sommerfalls, bei denen die Lüftung die alleinige Aktorik darstellt und daher Komfort bezüglich Temperatur bei der Optimierung von  $\text{LWR}_{\text{soll}}$  berücksichtigt wird, zeigen, daß die Leitkomponente flexibel ist gegenüber den verwendeten Komfortkriterien.

Durch die Einbeziehung heuristischer Strategieelemente im Falle von Abwesenheit (Absenkung von  $T_{i,\text{soll}}$  auf 15 °C und Komfort-Wichtung bezüglich LWR auf  $\lambda \rightarrow 1$  gesetzt) wird eine zusätzliche Energieeinsparung erreicht.

## Winter

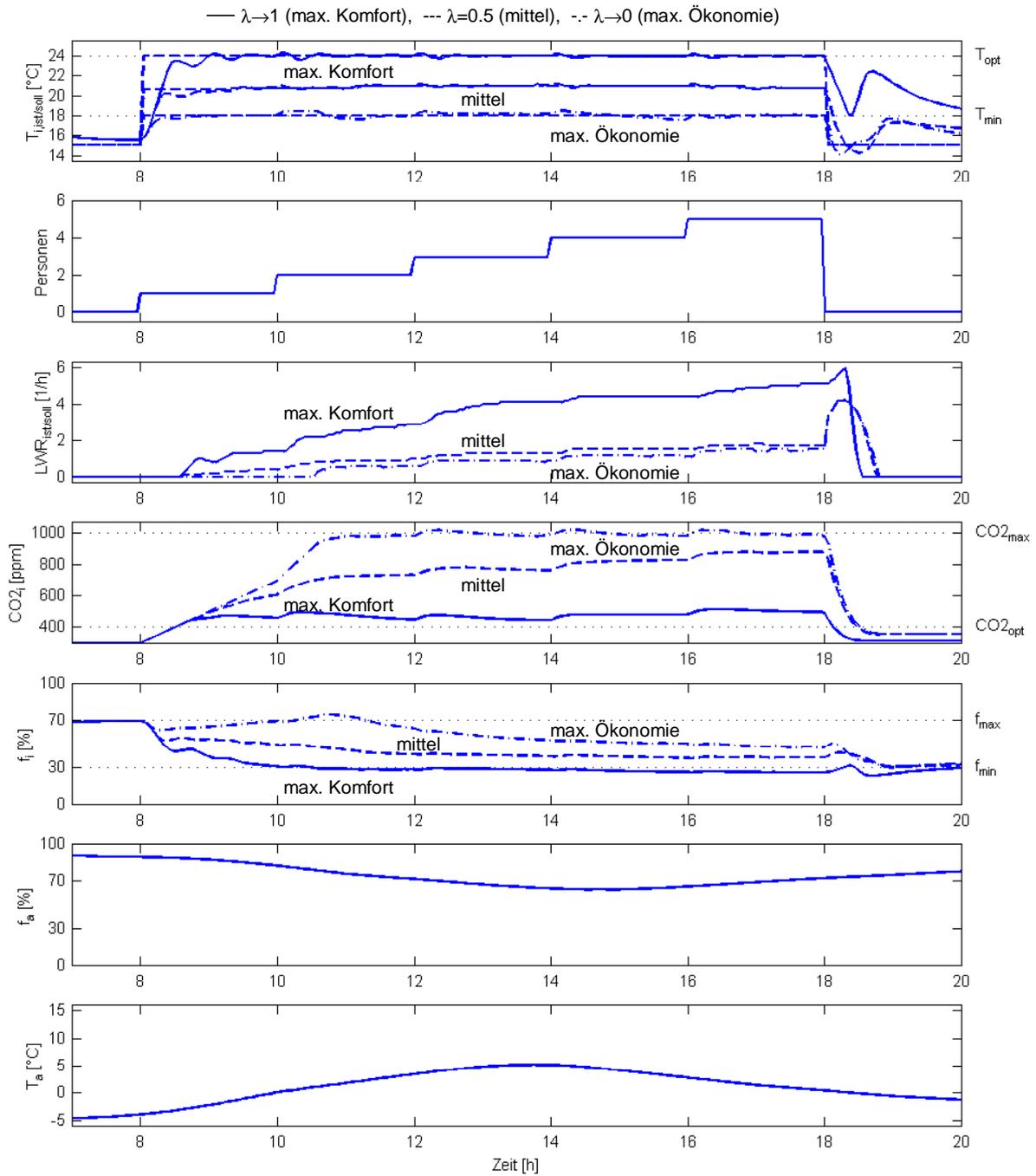


Abb. 4.1-7: Simulation eines Wintertages

## Herbst (mit Heizung)

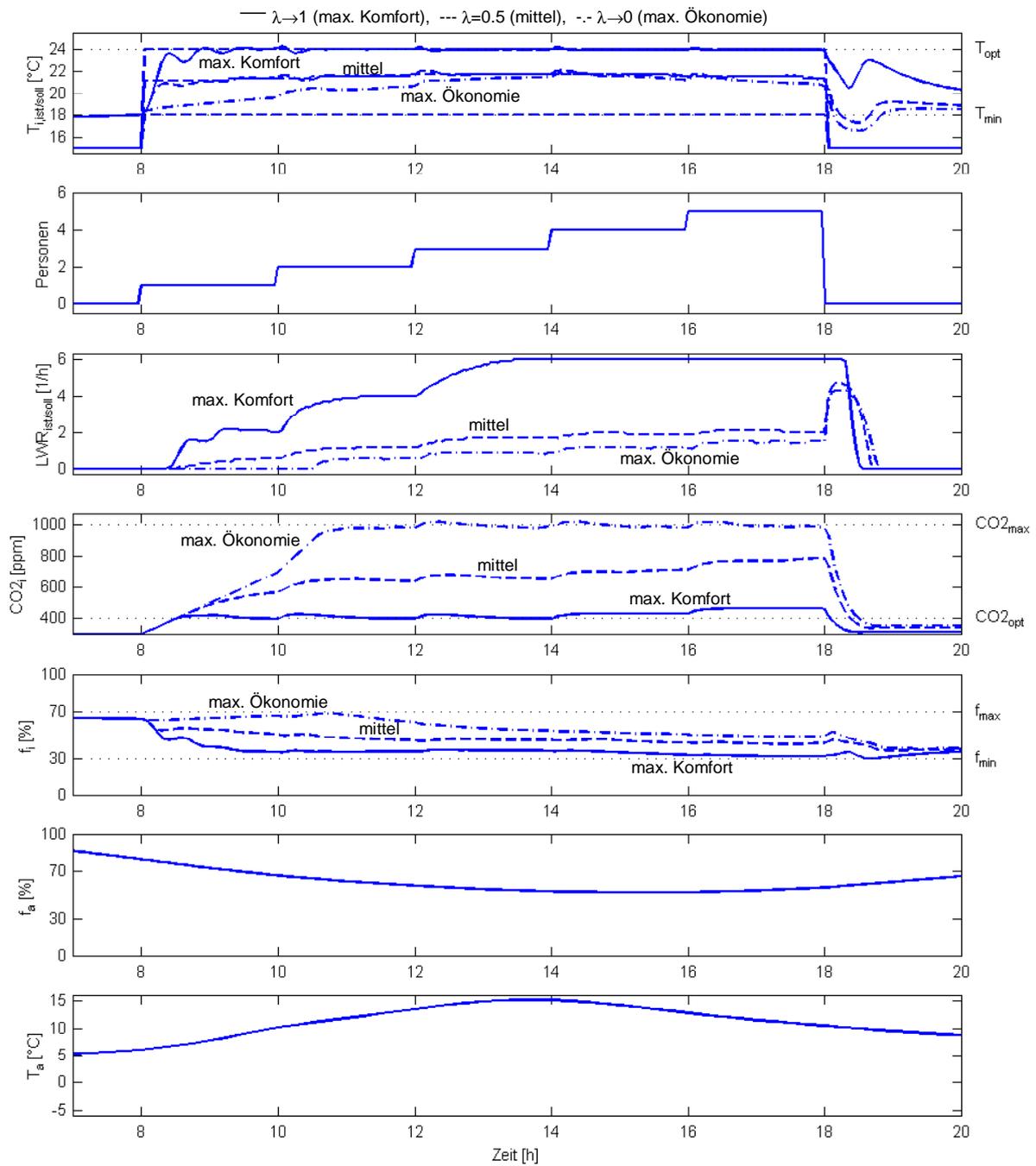


Abb. 4.1-8: Simulation eines Herbsttages (mit Heizung)

## Frühling (ohne Heizung)

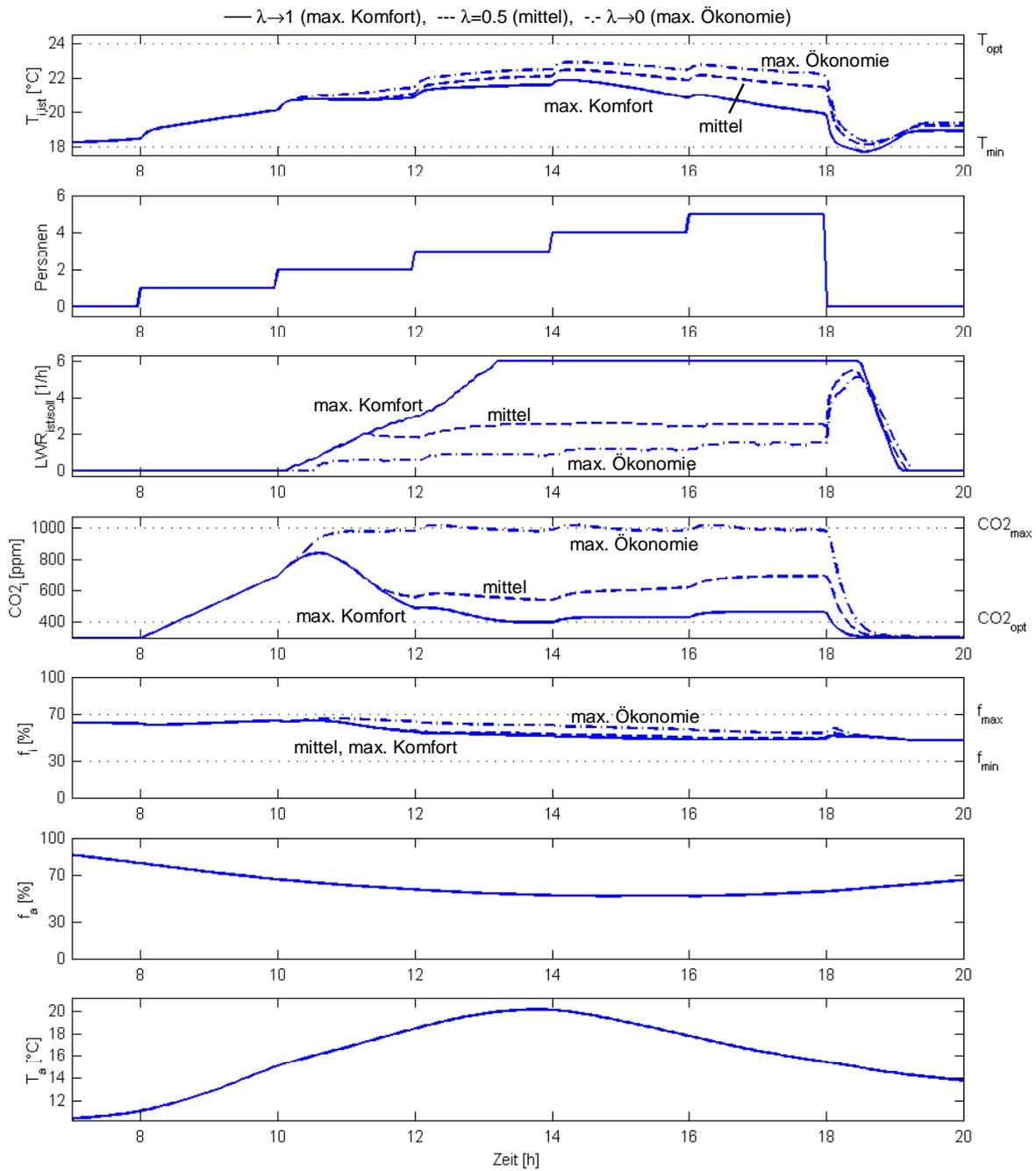


Abb. 4.1-9: Simulation eines Frühlingstages (ohne Heizung)

## Sommer

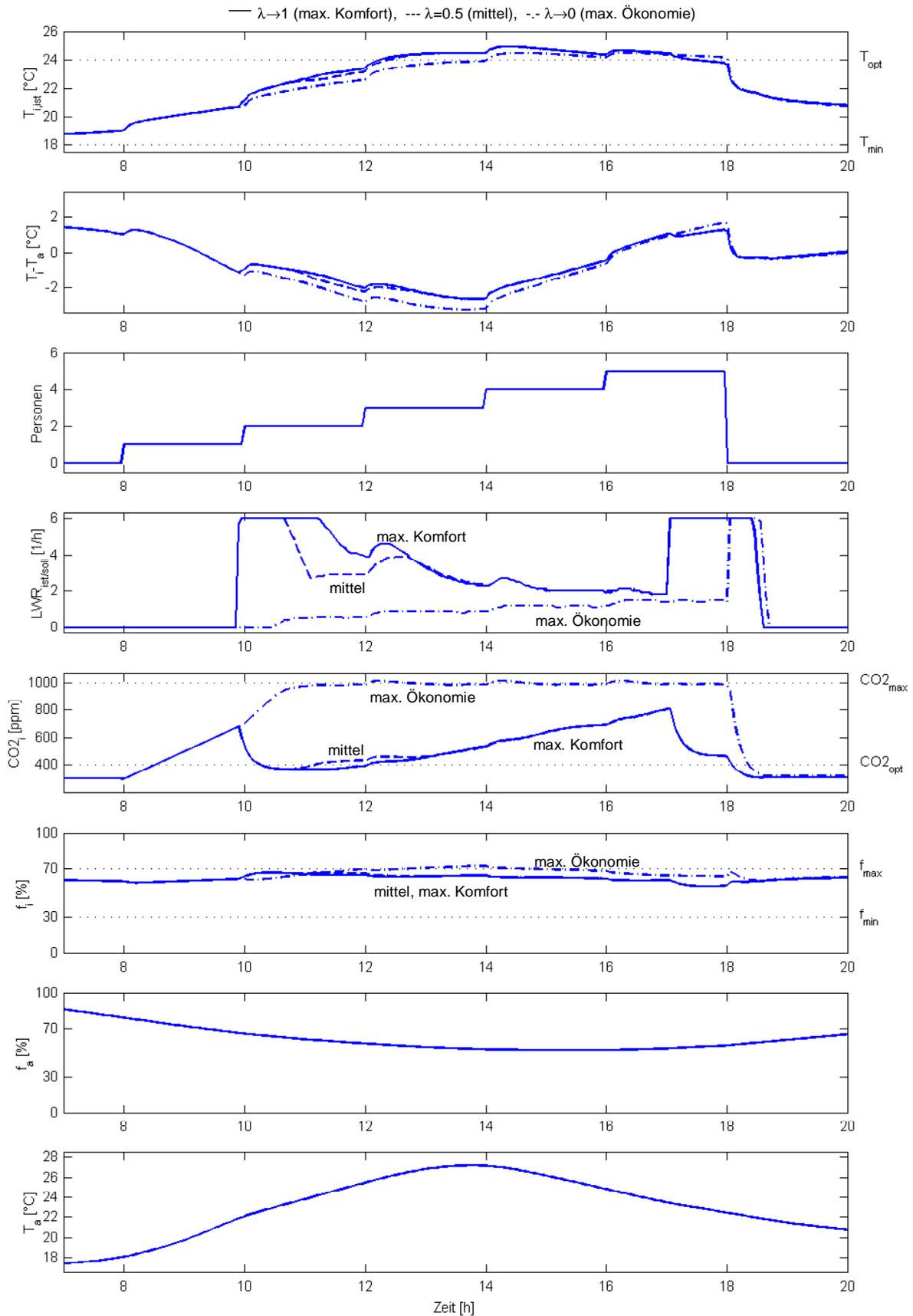


Abb. 4.1-10: Simulation eines Sommertages

#### 4.1.3.2 Verhalten ohne Fuzzy-Leitkomponente mit manueller Bedienung

Die Gütebewertung der Fuzzy-Leitkomponente erfordert einen Vergleich mit manueller Bedienweise. Bisher sind jedoch keine Modelle veröffentlicht, die das klimaabhängige Bedienverhalten des Menschen repräsentativ beschreiben. Daher werden hier zwei sehr einfache, aber trotzdem praxisnahe Fallbeispiele für die manuelle Bedienung von Heizung und Lüftung im Winterfall gewählt.

In Fallbeispiel 1 wird mit einer Luftwechselrate  $LWR = 0.2/h$  gelüftet und nicht geheizt ( $\dot{Q}_{\text{Heiz}} = 0 \text{ W}$ ).  $LWR = 0.2/h$  entspricht in etwa dem natürlichen Luftwechsel bei nicht sehr dichter Umfassungskonstruktion [Reck95]. Nach Fallbeispiel 2 wird bei Raumbelagung mit  $LWR = 2/h$ , dies entspricht beispielsweise einem gekippten Fenster, gelüftet. Die Einstellung des Heizkörperventils durch den Nutzer wird über einen Sollwert der Heizleistung  $\dot{Q}_{\text{Heiz,soll}} = 1200 \text{ W}$  modelliert. Die tatsächliche Heizleistung  $\dot{Q}_{\text{Heiz,ist}}$  folgt dem Sollwert mit einem Tiefpass erster Ordnung (Zeitkonstante 20 min).

**Fallbeispiel 1:**  $LWR = 0.2/h$ ,  $\dot{Q}_{\text{Heiz}} = 0 \text{ W}$

In Fallbeispiel 1, dargestellt in Abb. 4.1-11, variiert  $T_i$  zwischen  $18 \text{ °C}$  und  $20 \text{ °C}$  und liegt damit in einem nicht sehr komfortablen, aber akzeptablen Bereich.  $\text{CO}_2_i$  und  $\varphi_i$  hingegen steigen auf sehr hohe Werte an.  $\text{CO}_2_i$  liegt um 18:00 h bei 3500 ppm und  $\varphi_i$  bei über 90 %. Da auch nicht gelüftet wird, nachdem alle Personen den Raum verlassen haben, steigt wegen der Abkühlung der Raumluft  $\varphi_i$  sogar zunächst noch weiter an. Der Raumluftzustand ist daher sowohl unter hygienischen als auch aus bauphysikalischen Gesichtspunkten als völlig inakzeptabel zu bewerten.

**Fallbeispiel 2:**  $LWR = 2/h$ ,  $\dot{Q}_{\text{Heiz,soll}} = 1200 \text{ W}$

In diesem Fallbeispiel mit konstantem Heizleistungssollwert steigt  $T_i$  bis 14:00 h langsam auf  $25 \text{ °C}$  an, so daß die Raumluft ab 14:00 h i. a. als etwas zu warm und nicht mehr ganz behaglich empfunden wird (Abb. 4.1-12). Durch das Einstellen von  $LWR = 2/h$  wird  $\text{CO}_2_i$  zwar in einem akzeptablen, aber nicht sehr behaglichen Bereich gehalten. Die relative Feuchte  $\varphi_i$  sinkt wegen der niedrigen Außentemperatur auf ca. 30 % ab und liegt damit noch im optimalen Bereich.

In diesem Fallbeispiel wird also kein sehr behaglicher Raumluftzustand erreicht. Die verbrauchte Heizenergie ist trotzdem etwa genauso groß wie im Szenario  $\lambda \rightarrow 1$  ("max. Komfort") bei Anwendung der Leitkomponente (zur Energiebilanzierung vgl. den folgenden Unterabschnitt 4.1.3.3). Bei der hier dargestellten manuellen Strategie wird die Energie jedoch ungünstig verteilt, da durch die Überhitzung des Raumes Heizenergie verschwendet wird, die mit einer höheren Luftwechselrate besser hätte eingesetzt werden können.

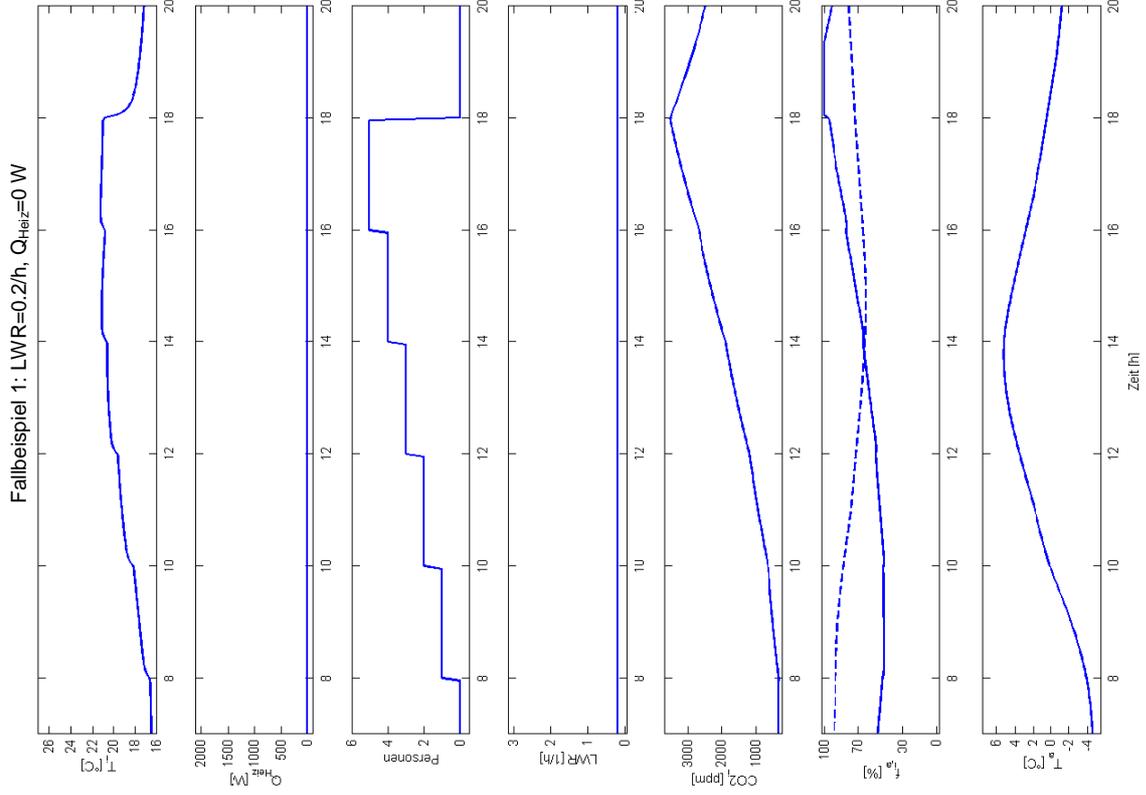


Abb. 4.1-11: Simulation eines Wintertages mit manueller Sollwertvorgabe (1)

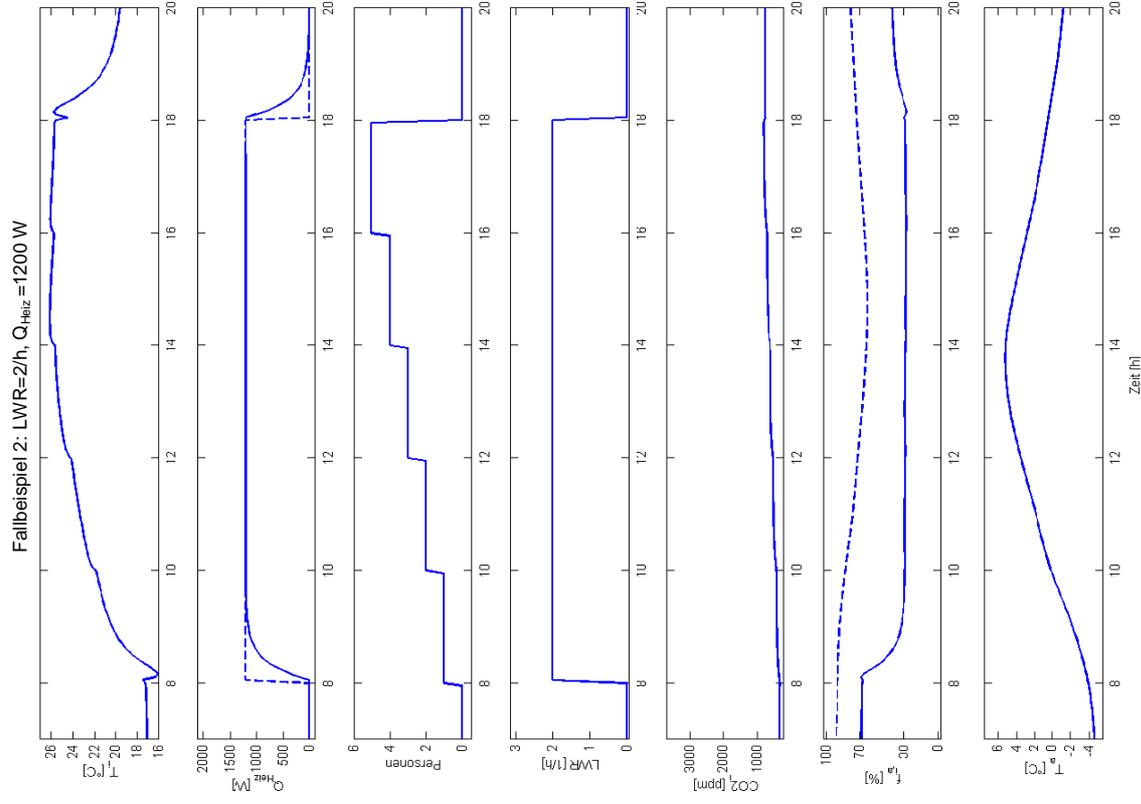


Abb. 4.1-12: Simulation eines Wintertages mit manueller Sollwertvorgabe (2)

Die beiden oben diskutierten Fallbeispiele lassen erkennen, daß mit einfachen manuellen Bedienstrategien der Raumklimaprozeß nicht ganzheitlich unter Komfort- und Ökonomiekriterien geführt wird. So ist in Fallbeispiel 1 das Ökonomiekriterium voll erfüllt, da keine Heizleistung verbraucht wird, dafür werden Komfortkriterien weit überschritten. In Fallbeispiel 2 hingegen wird die eingesetzte Energie ungünstig verteilt, so daß das Komfort-Kostenverhältnis weit ungünstiger ist als mit Anwendung der Fuzzy-Leitkomponente.

#### 4.1.3.3 Energiebilanzen

Nachfolgend werden die Energiebilanzen der simulierten Tagesverläufe mit Anwendung der Fuzzy-Leitkomponente (s. 4.1.3.1) sowie bei manueller Bedienung (s. 4.1.3.2) dargestellt. Dabei werden insbesondere die Abhängigkeit der verbrauchten Heizenergie  $Q_{\text{Heiz}}$ , der Lüftungsverluste  $Q_{\text{LWR}}$  und der Transmissionsverluste  $Q_{\text{Trans}}$  vom Wichtungsfaktor  $\lambda$  sowie dem Außenklima untersucht. Grundlage der Energiebilanzierung ist Gleichung (2.3-8) zur Berechnung des Netto-Wärmeeintrages  $\dot{Q}$  in den Raum.

$$\dot{Q} = (\dot{Q}_{\text{Heiz}} + \dot{Q}_{\text{sol}} + \dot{Q}_{\text{int}}) - (\dot{Q}_{\text{LWR}} + \dot{Q}_{\text{Trans}}), \quad (2.3-8)$$

Integrieren von Gleichung (2.3-8) führt auf die hier gesuchten Bilanzgrößen  $Q_{\text{Heiz}}$ ,  $Q_{\text{solar}}$ ,  $Q_{\text{int}}$ ,  $Q_{\text{LWR}}$  und  $Q_{\text{Trans}}$ . In  $Q_{\text{LWR}}$  ist die verbrauchte Ventilatorenergie mit berücksichtigt. Nicht aufgetragen sind die internen und solaren Gewinne  $Q_{\text{int}}$  und  $Q_{\text{sol}}$ . Da für jede Person eine Wärmeabgabe von 100 W angenommen wurde, ergibt sich für alle Simulationen  $Q_{\text{int}} = 3$  kWh. Die solaren Gewinne betragen in allen Simulationen  $Q_{\text{sol}} = 1.5$  kWh.

In Abb. 4.1-13 ist die Bilanz des simulierten Wintertages dargestellt. Es ist eine starke Abhängigkeit der Energien vom Wichtungsfaktor  $\lambda$  zu beobachten. Da die Wand als gut gedämmt angenommen wurde (effektiver k-Wert von Wand und Fenster:  $1.5 \text{ W/m}^2/\text{K}$ ), liegen  $Q_{\text{Lüft}}$  und  $Q_{\text{Trans}}$  bei konstantem  $\lambda$  in der gleichen Größenordnung. Bemerkenswert ist die Tatsache, daß  $Q_{\text{Heiz}}$  für  $\lambda \rightarrow 0$  mit 1.7 kWh nur etwa 10 % des Wertes für  $\lambda \rightarrow 1$  beträgt ( $Q_{\text{Heiz}} = 18.4$  kWh). Dieser hohe Energieverbrauch für  $\lambda \rightarrow 1$  ist durch die Wahl der Parameter  $T_{\text{opt}} = 24 \text{ °C}$  und  $\text{CO}_{2\text{opt}} = 400 \text{ ppm}$  der Komfort-ZGF bezüglich  $T_i$  und  $\text{CO}_{2i}$  mit begründet. Da somit gleichzeitig eine hohe Temperatur bei sehr niedrigem  $\text{CO}_2$ -Gehalt gefordert wird, wird eine große Heizleistung und große Luftwechselrate benötigt.

In Abb. 4.1-13 sind zusätzlich die Energien bei Anwendung der manuellen Bedienung dargestellt. Für die in Unterabschnitt 4.1.3.2 diskutierten Fallbeispiele ergeben sich die Heizleistungen  $Q_{\text{Heiz}} = 0$  bzw.  $Q_{\text{Heiz}} = 12$  kWh. Diese Ergebnisse sind zwar günstiger als die Werte für  $\lambda \rightarrow 0$  ("max. Ökonomie") bzw.  $\lambda \rightarrow 1$  ("max. Komfort"), doch muß hier berücksichtigt werden, daß bei den manuellen Strategien die unteren und oberen Komfortgrenzen nicht eingehalten wurden.

Die Bilanz des Herbsttages (Abb. 4.1-14) zeigt qualitativ eine ähnliche Abhängigkeit vom Wichtungsfaktor  $\lambda$  wie die Bilanz des Wintertages. Die Energien liegen wegen der im Vergleich zum Wintertag 10 °C höheren Außentemperatur jedoch deutlich unter den Werten des Wintertages. Für  $\lambda \rightarrow 0$  ("max. Ökonomie") wird gar keine Heizleistung benötigt.

Da in der Simulation des Frühlingstages die Heizung als nicht aktiviert angenommen wurde (vgl. 4.1.3.1), ist  $Q_{\text{Heiz}}$  in der Bilanz des Frühlingstages für alle  $\lambda$ -Werte gleich Null (Abb. 4.1-15). Die Lüftungsverluste  $Q_{\text{LWR}}$  liegen zwischen 0.9 kWh und 2.1 kWh und sind damit deutlich kleiner als die entsprechenden Werte des Herbsttages, die zwischen 1.3 kWh und 8.5 kWh variieren. Die Transmissionsverluste  $Q_{\text{Trans}}$  sind für  $\lambda \rightarrow 0$  ("max. Ökonomie") größer als für  $\lambda \rightarrow 1$  ("max. Komfort"). Dieser zunächst paradox erscheinende Effekt erklärt sich dadurch, daß wegen der niedrigeren Luftwechselrate für  $\lambda \rightarrow 0$  die Innentemperatur  $T_i$  und somit auch  $Q_{\text{Trans}}$  größer ist als für  $\lambda \rightarrow 1$ .

Die Bilanz des Sommertages (Abb. 4.1-16) ergibt leicht negative Werte für  $Q_{\text{LWR}}$ , d.h. es wurde insgesamt Energie in den Raum transportiert. Dies ist darin begründet, daß  $T_a$  im Mittel größer als  $T_i$  war (vgl. Abb. 4.1-10). Da die Zeitverläufe bezüglich  $T_i$  sich für  $\lambda \rightarrow 0$ ,  $\lambda = 0.5$  und  $\lambda \rightarrow 1$  nur geringfügig unterscheiden (vgl. Abb. 4.1-10), liegt  $Q_{\text{Trans}}$  in etwa unabhängig von  $\lambda$  bei 5 kWh.  $Q_{\text{Trans}}$  ist größer als in der Simulation des Frühlingstages, da der Mittelwert von  $T_i$  größer ist als beim Frühlingstag.

Zusammenfassend ist festzustellen, daß in der Wichtung der Komfort- und Ökonomiekriterien über den Parameter  $\lambda$  eine einfache und transparente Möglichkeit zur Steuerung des Heizenergieverbrauchs liegt, da  $Q_{\text{Heiz}}$  in etwa linear von  $\lambda$  abhängt. Dabei ist garantiert, daß auch für  $\lambda \rightarrow 0$  ("max. Ökonomie") die in den Komfort-ZGF definierten unteren Komfortgrenzen nicht unterschritten werden.

Die Bilanzen des Frühlings- und Sommertages zeigen erwartungsgemäß nur eine schwache Abhängigkeit von  $Q_{\text{LWR}}$  und  $Q_{\text{Trans}}$  vom Wichtungsfaktor  $\lambda$ , da bei hohen Außentemperaturen das Ökonomiekriterium kaum in Erscheinung tritt.

Fallbeispiel Winter

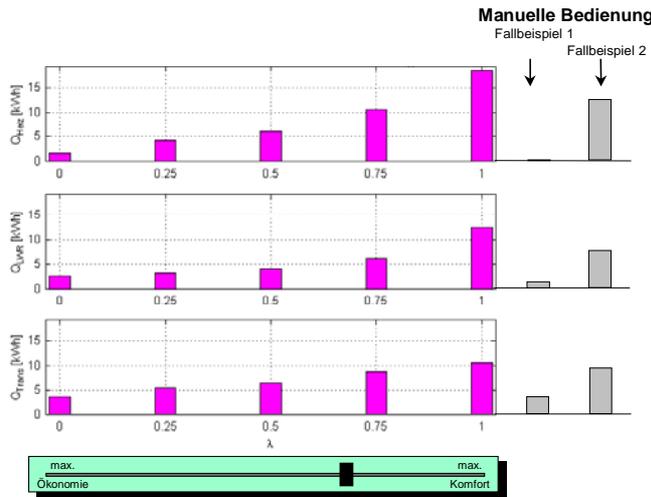


Abb. 4.1-13: Bilanz der verbrauchten Heizenergie  $Q_{Heiz}$ , der Lüftungswärmeverluste  $Q_{LWV}$  und der Transmissionsverluste  $Q_{Trans}$  des simulierten Wintertages

Fallbeispiel Herbst (mit Heizung)

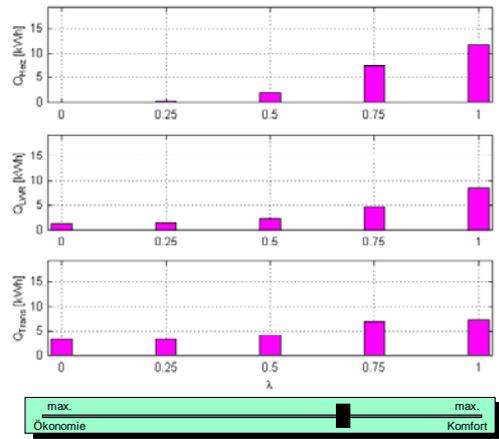


Abb. 4.1-14: Bilanz des simulierten Herbsttages

Fallbeispiel Frühling (ohne Heizung)

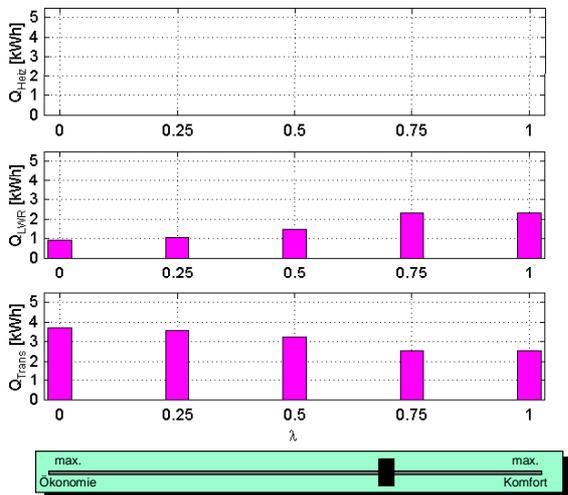


Abb. 4.1-15: Bilanz der Lüftungswärmeverluste  $Q_{LWV}$  und der Ventilatorenergie  $Q_{Vent}$  des simulierten Frühlingstages

Fallbeispiel Sommer

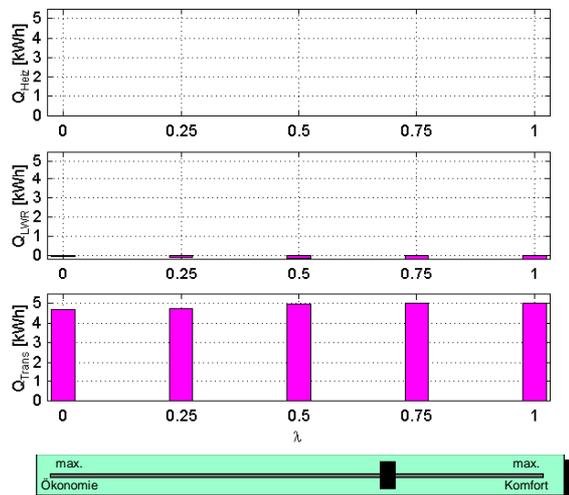


Abb. 4.1-16: Bilanz des simulierten Sommertages

#### 4.1.3.4 Robustheit gegenüber Störungen der Luftwechselrate

In den bisher gezeigten Simulationsergebnissen wurde der von der Leitkomponente ausgegebene Sollwert der Luftwechselrate  $LWR_{\text{soll}}$  exakt eingestellt. Ziel dieses Unterabschnittes ist es zu zeigen, daß die Leitkomponente robust ist gegen Störungen der Luftwechselrate. Dabei werden wie in Unterabschnitt 3.5.4 folgende wichtige Klassen von Störungen betrachtet:

**Fallbeispiel 1:** konstante LWR-Störquelle:

$$LWR_{\text{ist}} = LWR_{\text{soll}} + LWR_{\text{stör}} \quad (4.1-1)$$

**Fallbeispiel 2:** Fehler von LWR um konstanten Faktor  $\varepsilon$ :

$$LWR_{\text{ist}} = (1 + \varepsilon)LWR_{\text{soll}} \quad (4.1-2)$$

Fallbeispiel 1 entspricht einer manuellen, zusätzlichen Lüftung wie beispielsweise Fensterlüftung. Fallbeispiel 2 repräsentiert den Fehler, der entsteht, wenn das freie Raumvolumen  $V_{\text{Raum}}$  nicht genau bekannt ist und somit  $LWR = \dot{V} / V_{\text{Raum}}$  fehlerbehaftet ist. Diese Fälle wurden in Unterabschnitt 3.5.4 für den stationären Fall theoretisch untersucht. Hier wird nun die Dynamik bei Störeinflüssen anhand eines Beispiels beleuchtet.

Für die Fallbeispiele 1 und 2 wurde jeweils das Außenklima des Herbsttages angenommen (vgl. Abb. 4.1-8) sowie der Wichtungsfaktor  $\lambda \rightarrow 1$  gewählt ("max. Komfort").

**Fallbeispiel 1:** konstante LWR-Störquelle

Bei dem in Abb. 4.1-17 dargestellten Zeitverlauf wird von 8:00 h bis 18:00 h eine konstante Raumbelastung durch 2 Personen angenommen. Um 10:00 h und um 15:00 h wird eine zusätzliche Luftwechselrate  $LWR_{\text{stör}} = 1/h$  für eine Dauer von 2 Stunden zugeschaltet.

Die Leitkomponente senkt bei Zuschaltung der Störung mit einer Zeitkonstante von etwa 20 min  $LWR_{\text{soll}}$  um  $LWR_{\text{stör}}$  ab, so daß der tatsächliche Wert  $LWR_{\text{ist}}$  nach etwa einer Stunde wieder bei dem ursprünglichen Niveau von 4/h liegt. Die Übergangszeitkonstante ist durch die Tiefpaß-Zeitkonstante des Störgrößenschätzalgorithmus gegeben (vgl. 3.5.3).

Entsprechend wird nach Abschaltung der Störung um 12:00 h bzw. 17:00 h  $LWR_{\text{soll}}$  wieder erhöht. Insgesamt wird das theoretische Ergebnis aus Unterabschnitt 3.5.2 bestätigt, daß im stationären Fall die "Regeldifferenz" verschwindet.

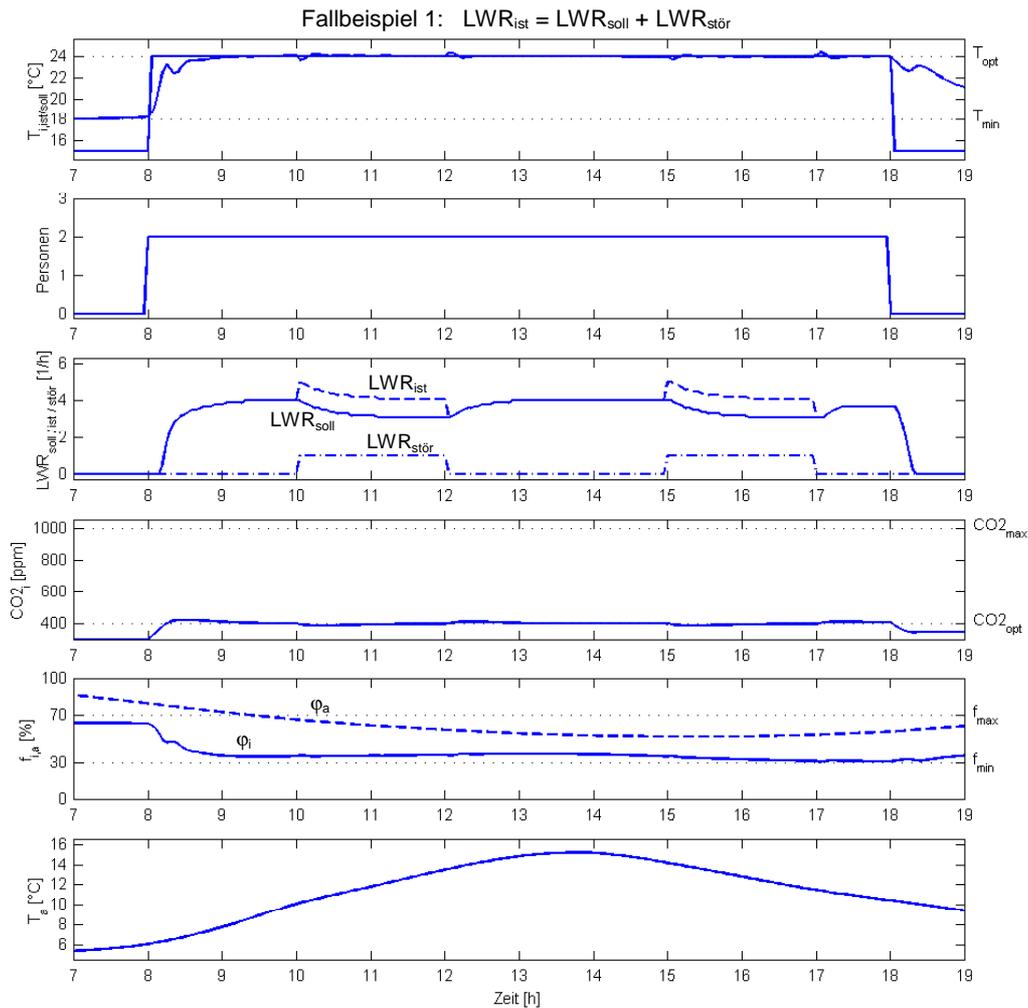


Abb. 4.1-17: Zur Robustheit gegenüber konstanter Störluftwechselrate  $LWR_{stör}$

### Fallbeispiel 2: Fehler von LWR um konstanten Faktor $\varepsilon$

In Abb. 4.1-18 wurde das kontinuierlich steigende Belegungsszenario aus Unterabschnitt 4.1.3.1 gewählt, um den Einfluß des Fehlers in LWR auf die Zustandsgrößen bei unterschiedlicher Belegung zu untersuchen. Es sind drei Szenarien mit den Parametern  $\varepsilon = \pm 0.5$  und  $\varepsilon = 0$  dargestellt. Nach Gleichung (4.1-2) gilt:

$$\varepsilon = -0.5 \quad \Rightarrow \quad LWR_{ist} = 0.5LWR_{soll}$$

$$\varepsilon = 0 \quad \Rightarrow \quad LWR_{ist} = LWR_{soll}$$

$$\varepsilon = +0.5 \quad \Rightarrow \quad LWR_{ist} = 1.5LWR_{soll}$$

Wie aus Abb. 4.1-18 ersichtlich ist, gibt die Leitkomponente im Szenario  $\varepsilon = -0.5$  einen höheren, für  $\varepsilon = +0.5$  einen niedrigeren Wert  $LWR_{soll}$  als im Szenario  $\varepsilon = 0$  (keine Fehlerbehaftung) aus. Dies ist "vernünftig", da im Fall  $\varepsilon = -0.5$  gilt  $LWR_{ist} < LWR_{soll}$  und

umgekehrt im Fall  $\varepsilon = +0.5$   $LWR_{ist} > LWR_{soll}$ . Die Leitkomponente versucht also, die Fehlerbehaftung zu kompensieren.

Für den Fall  $\varepsilon = -0.5$  ist daher allerdings auch unvermeidlich, daß der maximal mögliche, durch die Ventilatorleistung festgelegte Wert der Luftwechselrate  $LWR_{max}$  bei zunehmender Raumbelugung bereits frühzeitig erreicht wird (ca. 10:30 h), für den Fall  $\varepsilon = +0.5$  hingegen überhaupt nicht. Für den Fall  $\varepsilon = -0.5$  hat dies eine Erhöhung von  $CO_2_i$  auf etwa 800 ppm zur Folge, während bei dem Verläufen  $\varepsilon = +0.5$  keine Konsequenz der Fehlerbehaftung zu verzeichnen ist.

Die aufgeführten Beispiele zeigen, daß die Leitkomponente sich äußerst robust verhält auch gegenüber groben Störungen der Luftwechselrate, die in der praktischen Realisierung immer auftreten können.

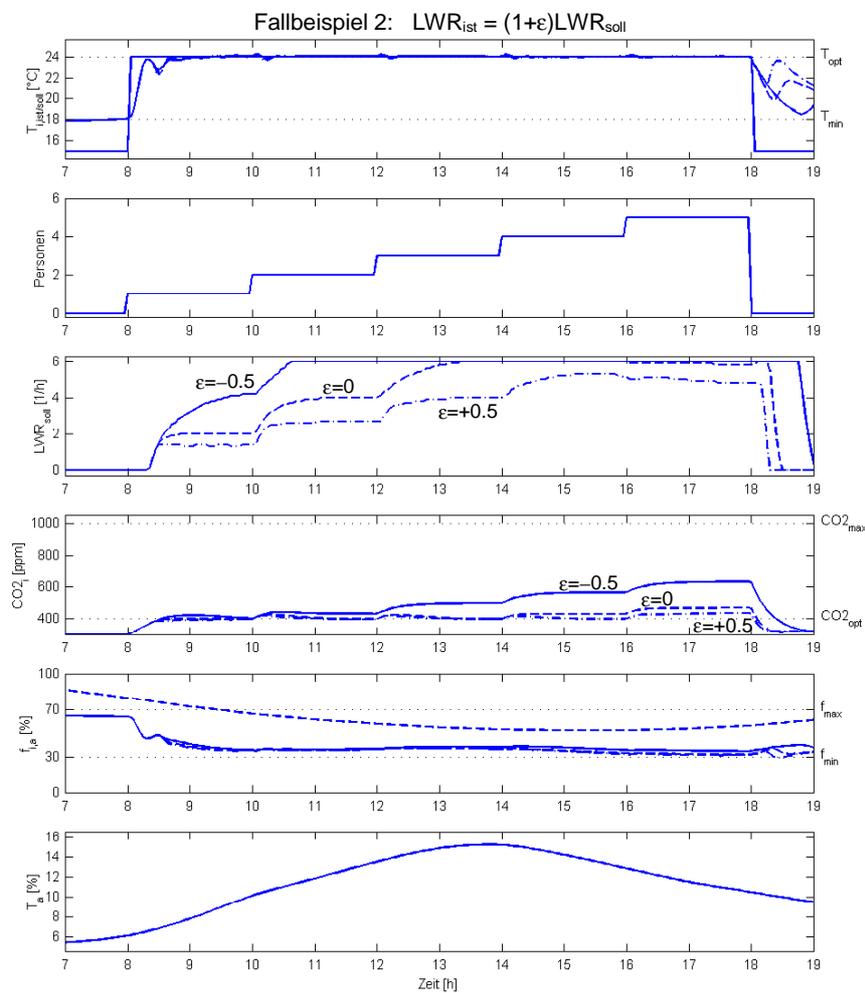


Abb. 4.1-18: Zur Robustheit gegenüber der Fehlerbehaftung von LWR durch einen Faktor  $\varepsilon$

#### 4.1.3.5 Lüftungssteuerung mit Schwenkfenster

Bei vielen Altbauten ist eine kontrollierte Wohnungslüftung mit Ventilatoren nachträglich nicht integrierbar oder zu aufwendig. Hier bietet sich an, vorhandene Schwenkfenster steuerbar zu gestalten, ähnlich wie dies in Gewächshäusern seit langem Anwendung findet.

Erfolgt die Lüftung nicht über einen Ventilator sondern über ansteuerbare Schwenkfenster, so sind die Vermeidung von Zugerscheinungen über  $\mu_{\text{komf}_Z}$  als weiteres Komfortkriterium zu berücksichtigen. Um den Einfluß von  $\mu_{\text{komf}_Z}$  zu verdeutlichen, wurde in der in Abb. 4.1-19 dargestellten Simulation der Wichtungsfaktor  $\lambda \rightarrow 1$  ("max. Komfort") gewählt und die Außentemperatur  $T_a$ , die wesentlichen Einfluß auf die Zugerscheinungen hat, variiert. Die Simulation wurde jeweils mit dem Außentemperaturverlauf des Winter-, Herbst- und Sommerszenarios von Unterabschnitt 4.1.3.1 durchgeführt. Der Raum ist von 8:00 h bis 13:00 h sowie von 14:00 h bis 18:00 h mit 2 Personen belegt.

In Abb. 4.1-19 sind zusätzlich zu den üblichen Größen die Komfortzugehörigkeit bezüglich Zugerscheinungen  $\mu_{\text{komf}_Z}$  sowie der Zustand der Fensteröffnung aufgetragen.

Bei geöffnetem Fenster wurde  $LWR_{\text{ist}} = 0.8/\text{h}$  angenommen. Die Lüftungssteuerung wurde über den Schwellwertalgorithmus

$$\begin{aligned} LWR_{\text{soll}} > 0.9/\text{h} &\Rightarrow \text{Fenster auf} \hat{=} LWR_{\text{ist}} = 0.8/\text{h} \\ LWR_{\text{soll}} < 0.7/\text{h} &\Rightarrow \text{Fenster zu} \hat{=} LWR_{\text{ist}} = 0 \end{aligned} \quad (4.1-3)$$

realisiert. Die Werte von  $\mu_{\text{komf}_Z}$  beziehen sich auf  $LWR_{\text{soll}}$  und nicht auf  $LWR_{\text{ist}}$ . Durch diese Darstellung kann die Entscheidungsfindung der Leitkomponente besser nachvollzogen werden, da bei der Berechnung  $LWR_{\text{soll}}$  relevant ist.

Bezüglich  $T_i$  ergibt sich nichts prinzipiell Neues gegenüber den Simulationen aus Unterabschnitt 4.1.3.1. Die Leitkomponente gibt bei Anwesenheit wegen  $\lambda \rightarrow 1$  ("max. Komfort") den Sollwert  $T_{i,\text{soll}} = T_{\text{opt}} = 24 \text{ }^\circ\text{C}$  aus. Bei nicht belegtem Raum wird  $T_{i,\text{soll}} = 15 \text{ }^\circ\text{C}$  gesetzt.

Mit der Anwesenheit der zwei Personen ab 8:00 h steigt  $\text{CO}_2_i$  bis um 9:30 h auf über 800 ppm an.  $LWR_{\text{soll}}$  nimmt daher bereits kurz nach 8:00 h Werte größer Null an. Je niedriger  $T_a$ , desto größer sind die zu erwartenden Zugerscheinungen und desto kleiner ist folglich der Zugehörigkeitsgrad zu  $\mu_{\text{komf}_Z}$ . Damit wirkt sich  $\mu_{\text{komf}_Z}$  als Restriktion aus, die dazu führt, daß  $LWR_{\text{soll}}$  abgesenkt wird.

Die zum Öffnen des Fensters notwendige Schwelle von 0.9/h wird somit um so später erreicht, je niedriger  $T_a$  ist. Im Sommerszenario wird das Fenster gegen 9:30 h und im Winterszenario erst um kurz vor 10:00 h geöffnet. Zu diesem Zeitpunkt ist  $\text{CO}_2_i$  auf  $\text{CO}_{2,\text{max}} = 1000 \text{ ppm}$  angestiegen, so daß der Zugehörigkeitsgrad bezüglich  $\text{CO}_2_i$ ,  $\mu_{\text{komf}_C}$

gleich Null ist und deswegen keine weitere Erhöhung akzeptiert wird. Im Winterszenario schließt das Fenster nach etwa 45 Minuten wieder und öffnet sich gegen 11:00 h erneut. Diese Prozedur wiederholt sich nach 12:00 h.

$\mu_{\text{komf\_Z}}$  wirkt sich im Winterfall als starke Restriktion aus, so daß relativ hohe Werte von  $\text{CO}_2_i$  akzeptiert werden. Der Mechanismus entspricht einem Kompromiß zwischen den hier gegenläufigen Komfortforderungen bezüglich niedrigem  $\text{CO}_2$ -Gehalt, d.h. Bedarf nach starker Lüftung, und Zugfreiheit, dies fordert wenig Lüftung.

Während der Raum in der Mittagspause zwischen 13:00 h und 14:00 h nicht belegt ist, spielt  $\mu_{\text{komf\_Z}}$  als Gütekriterium keine Rolle und wird daher gleich Eins gesetzt. Da  $\mu_{\text{komf\_Z}}$  bisher als Restriktion bezüglich  $\text{LWR}_{\text{soll}}$  gewirkt hat, steigt  $\text{LWR}_{\text{soll}}$  nun sprunghaft an. Daher bleibt zwischen 13:00 h und 14:00 h in allen drei Szenarien das Fenster geöffnet und  $\text{CO}_2_i$  ist am Ende der Mittagspause um 14:00 h auf etwa 600 ppm gesunken. Mit der erneuten Raumbelugung ab 14:00 wird  $\mu_{\text{komf\_Z}}$  wieder berücksichtigt, so daß  $\text{LWR}_{\text{soll}}$  sprunghaft abfällt. Dies hat im Herbst- und Winterszenario das Schließen des Fensters zur Folge. Im Sommerszenario wirkt  $\mu_{\text{komf\_Z}}$  nur als geringe Restriktion, so daß das Fenster die ganze Zeit über geöffnet bleibt.

Nachdem um 18:00 h die Personen den Raum verlassen haben, bleibt das Fenster in allen drei Szenarien solange geöffnet, bis  $\text{CO}_2_i$  auf  $\text{CO}_{2,\text{opt}} = 400$  ppm abgefallen ist. Da im Sommerszenario um 18:00 h  $\text{CO}_2_i$  am niedrigsten war, schließt das Fenster in diesem Szenario bereits gegen 19:30, im Winterszenario hingegen erst nach 20:00 h.

Die relative Feuchte  $\varphi_i$  bewegte sich in allen drei Szenarien im optimalen Bereich ( $\varphi_{\text{min}} < \varphi_i < \varphi_{\text{max}}$ ). Prinzipiell ist wegen der relativ niedrigen Luftwechselrate bei Lüftung mit Schwenkfenster die Gefahr, daß  $\varphi_i$  bei Fensterlüftung unterhalb  $\varphi_{\text{min}} = 30$  % sinkt, gering.

Hinsichtlich des Einsatzes von steuerbaren Fensteröffnern läßt sich zusammenfassend feststellen, daß das Komfortkriterium bezüglich Zugfreiheit die Leitkomponente sinnvoll ergänzt. Im diskutierten Beispiel wird ein optimaler Kompromiß in den Komfortkriterien bezüglich Luftqualität ( $\text{CO}_2$ -Gehalt) und Zugserscheinungen erzielt. Obwohl mit Gleichung (3.3-5) nur ein einfaches Modell zur Prädiktion des Wärmestroms verwendet wird, erfaßt es doch die wesentlichen Elemente, so daß die Leitkomponente, zusammen mit dem heuristischen Strategieelement im Falle von Abwesenheit, insgesamt gut die menschliche Beurteilung nachbildet.

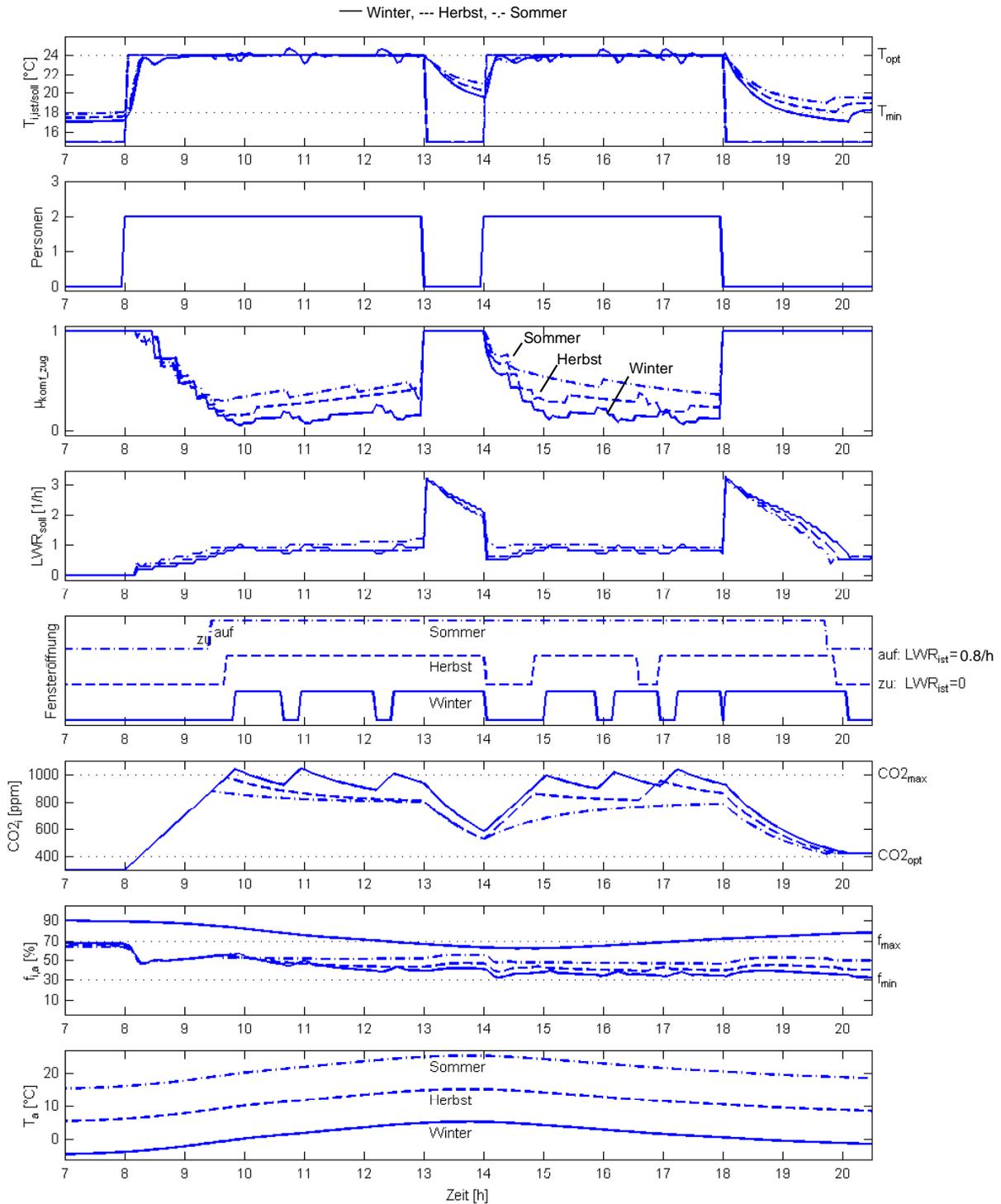


Abb. 4.1-19: Simulation eines Tages bei unterschiedlichen Außentemperaturen  $T_a$  mit Fensterlüftung ( $\lambda \rightarrow 1$ , "max. Komfort")

#### 4.1.4 Zusammenfassung der Simulationsuntersuchungen

Es wurden realitätsnahe statische und dynamische Simulationen vorgestellt. Bei den dynamischen Simulationen wurde ein realitätsnahes Raummodell als Regelstrecke verwendet. Anhand der vier exemplarischen Fälle eines Frühlings-, Sommer-, Herbst- und Wintertages wurde die Leistungsfähigkeit der Leitkomponente bei sehr unterschiedlichem Außenklima und wechselnder Raumbelastung nachgewiesen.

Dabei wurde gezeigt, daß die Leitkomponente je nach gewählter Kosten-Komfortwichtung einen optimalen Kompromiß bezüglich der definierten Komfort- und Ökonomiekriterien einstellt. Somit wird für Wichtung  $\lambda \rightarrow 1$  ("max. Komfort") ein optimaler Kompromiß innerhalb der Komfortkriterien erzielt,  $\lambda \rightarrow 0$  ("max. Ökonomie") wird Heizung und Lüftung so sparsam wie möglich betrieben, ohne jedoch die in den Komfort-ZGF definierten unteren Komfortgrenzen zu unterschreiten. Anhand der Simulationen wurde deutlich, daß es über die Einstellung des Wichtungsfaktors  $\lambda$  in einfacher und für den Nutzer transparenter Weise möglich ist, den Raumklima-prozeß zu führen.

Energiebilanzen der Tagessimulationen zeigen eine deutliche, annähernd lineare Abhängigkeit des Energieverbrauchs von der eingestellten Kosten-Komfortwichtung.

Ein Vergleich mit einfachen Bedienstrategien demonstriert, daß mit der Leitkomponente ein wesentlich besseres Kosten-Komfortverhältnis erzielt wird, d.h. die verwendete Energie wird optimal verteilt. Darüber hinaus wurde deutlich, daß bei manuellen Strategien der Innenklimazustand Werte annehmen kann, die aus hygienischer oder bauphysikalischer Sicht völlig inakzeptabel sind.

Anhand von Fallbeispielen wurde die Robustheit der Leitkomponente gegenüber Ungenauigkeiten in LWR nachgewiesen. Dies ist ein für die praktische Realisierung sehr wichtiger Aspekt.

Schließlich wurde gezeigt, daß die Leitkomponente auch dann wirkungsvoll einsetzbar ist, wenn die Lüftungsaktorik nicht über einen kontinuierlich ansteuerbaren Ventilator, sondern ein Schwenkfenster realisiert wird. Das dabei zusätzlich zu berücksichtigende Komfortkriterium bezüglich Zugfreiheit zeigt darüber hinaus, daß die Leitkomponente flexibel ist gegenüber den zu berücksichtigenden Komfortkriterien.

## 4.2 Experimentelle Erprobung

### 4.2.1 Vorbemerkungen

Um die Realisierbarkeit der Leitkomponente nachzuweisen und deren Funktion und Leistungsfähigkeit unter realen Echtzeit- und Klimabedingungen zu erproben, wurde sie im Rahmen des Projektes "Integrierte Haussysteme für Ressourcenschonendes Wohnen (IHS-ReWo)" der Fraunhofer-Gesellschaft in zwei unterschiedlichen Räumen des Test- und Demozentrums für Integrierte Haussysteme am IITB implementiert [Ber98d, Ber98e, Ber99a, Ber99b].

Bei der experimentellen Erprobung standen neben dem Nachweis der Funktions- und Leistungsfähigkeit folgende Aspekte im Vordergrund:

- Nachweis der Leistungsfähigkeit in Räumen mit unterschiedlicher Bauphysik
- Nachweis der Unabhängigkeit von den unterlagerten Heizungs- und Lüftungsregelkreisen
- Nachweis der Unabhängigkeit von der verwendeten Aktorik und Sensorik (z. B. Lüftung über Ventilator oder Schwenkfenster, Messung der Luftqualität über CO<sub>2</sub> oder Mischgas)
- Realisierung auf unterschiedlichen, auch weniger leistungsstarken Hardwareplattformen (z. B. Mikrocontroller)

Diesen Forderungen wurde mit der Wahl der Versuchsräume, der Auswahl der Sensor- und Aktorkomponenten und der Hardwareplattformen Rechnung getragen (vgl. Tabelle 4.2-1).

### 4.2.2 Versuchsräume

In Raum 1 des Test- und Demozentrums wurden hauptsächlich die Entwicklungen des IITB in den Bereichen Kommunikation, Feldbustechnologie, Leit- und Regelungstechnik sowie Bedienoberflächen getestet und weiterentwickelt. Alle Aktoren und Sensoren sind LON-Knoten, die am IITB entwickelt und zu einem Netzwerk gekoppelt wurden. Als Aktoren werden hier ein steuerbarer Abluftventilator, motorisch stellbare Heizkörperventile, Jalousien mit Lamellensteuerung und ein Deckenventilator eingesetzt. Zudem wurden Sensornester für die Erfassung von Temperatur, Feuchte und Helligkeit jeweils innen und außen sowie Sensorik für die Belegung des Raumes und CO<sub>2</sub>-Gehalt als Referenzgas für die Luftqualität realisiert.

Im Raum 2 des Test- und Demozentrums wurden primär Elektronik- und Sensorkomponenten der anderen am IHS-ReWo-Projekt beteiligten Fraunhofer-Institute IMS (Duisburg), IBMT (St. Ingbert), IFT (München), IIS-A und IIS-B (Erlangen) in Verbindung mit

den am IITB entwickelten Systemkomponenten integriert. Zudem finden auch am Markt erhältliche Sensor- und Aktorkomponenten Verwendung. Für Raum 2 wurden bewußt andere Aktoren und Sensoren als in Raum 1 vorgesehen, um die Flexibilität der unterschiedlichen Regelungs- und Leitfunktionen zu testen.

Eine Übersicht zur Ausstattung und Bauphysik der Versuchsräume ist in Tabelle 4.2-1 gegeben. Detaillierte Angaben zu der verwendeten Sensorik und Aktorik in den Versuchsräumen findet sich in Anhang D. Die Fotos in Abb. 4.2-1 und Abb. 4.2-2 vermitteln einen Eindruck von den Versuchsräumen.

	<b>Raum 1</b>	<b>Raum 2</b>
<b>Sensorik innen</b>	Temp. Luft, Wand CO <sub>2</sub> -Gehalt relative Feuchte Anwesenheit Helligkeit Temp. Vor-/Rücklauf Volumenstrom Heizung	Temp. Luft Mischgas  Anwesenheit  Temp. Heizkörperoberfläche
<b>Sensorik außen</b>	Temp. Luft relative Feuchte Helligkeit	Temp. Luft
<b>Aktorik</b>	Stellmotor Heizkörperventil Ventilator ( $\dot{V} = 0 \dots 300 \text{ m}^3/\text{h}$ ) Jalousie Deckenventilator	Stellmotor Heizkörperventil Fensteröffner Jalousie
<b>Feldbussystem</b>	LON	EIB + LON
<b>Plattform</b>	PC	Mikrocontroller (68332 CPU)
<b>Betriebssystem</b>	Windows NT 4.0	VxWorks
<b>Bauphysik</b>		
Raumvolumen	50 m <sup>3</sup>	30 m <sup>3</sup>
k-Wert der Außenwand (inklusive Fenster)	1.5 W/m <sup>2</sup> /K	1.5 W/m <sup>2</sup> /K
Fläche der Außenwand	12.5 m <sup>2</sup>	10 m <sup>2</sup>
davon Fensterfläche	5 m <sup>2</sup>	3 m <sup>2</sup>
Ausrichtung der Fenster	Süden	Norden
Parameter $\varepsilon = \frac{kA}{2A_{\text{ges}}\alpha}$	1/60	1/20

Tabelle 4.2-1: Ausstattung und Bauphysik der Versuchsräume des Test- und Demozentrums für Integrierte Haussysteme am IITB



Abb. 4.2-1: Raum 1 des Test- und Demozentrums für Integrierte Haussysteme am IITB

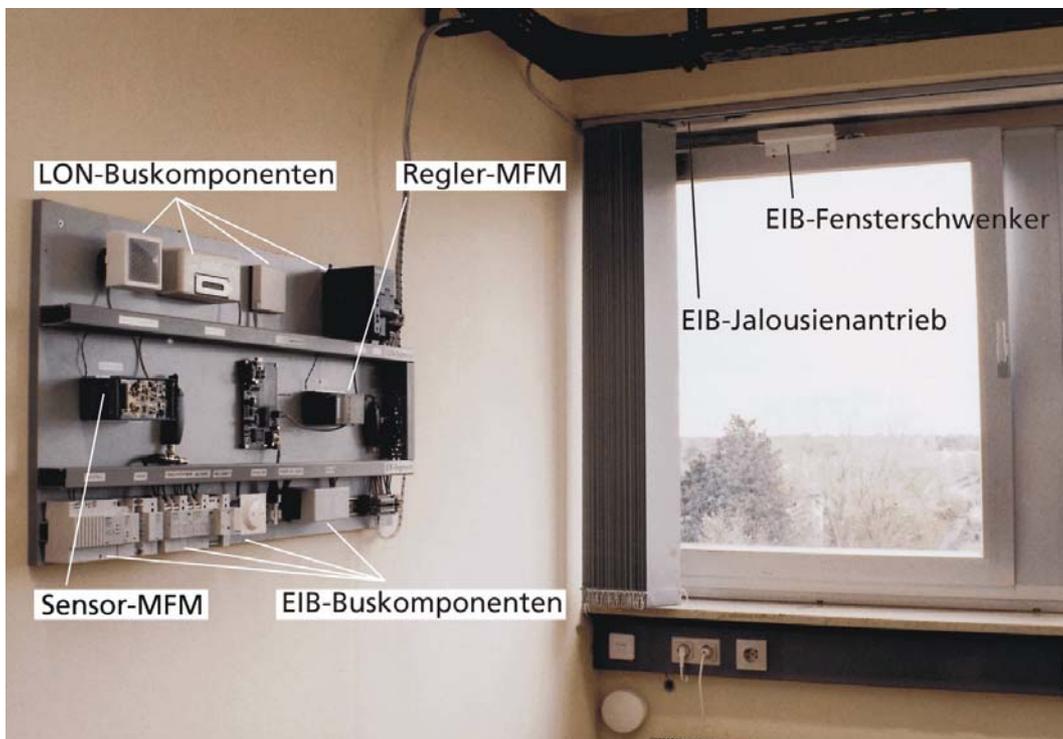


Abb. 4.2-2: Raum 2 des Test- und Demozentrums für Integrierte Haussysteme am IITB

### 4.2.3 Systemarchitektur und Implementierung

Um die Integrationsfähigkeit der Aktor- und Sensorkomponenten nachzuweisen, erfolgt eine Vernetzung mit Hilfe der zwei unterschiedlichen Hausbussysteme LON und EIB, die in der Praxis am häufigsten Anwendung finden (vgl. 1.2.2). Sämtliche Meß-, Steuer-, Regelungs- und Kommunikationsfunktionen werden von einem hochintegrierten sog. Multifunktionsmodul (MFM) übernommen, das vom Fraunhofer-Institut IMS in Duisburg entwickelt wurde [Ber99a]. Das MFM ist ein intelligenter Knoten, der für verschiedene Feldbussysteme und Kommunikationsnetzwerke offen ist. Über Gateways wird ein Zugang zu LON- und EIB-Bussystemen sowie zum Internet ermöglicht.

Eine Überblicksdarstellung zur Systemarchitektur in den zwei Versuchsräumen vermitteln Abb. 4.2-3 und Abb. 4.2-4. Die Oberfläche zur Visualisierung der Innen- und Außenklimagrößen und zur Bedienung der Fuzzy-Leitkomponente über einen "Kosten-Komfort-Schieber" ist in Abb. 4.2-5 dargestellt.

Die Fuzzy-Leitkomponente wurde in der Hochsprache ANSI-C programmiert und auf einem PC (Raum 1) bzw. Regelungs-MFM (Raum 2) implementiert und kann leicht auf andere Plattformen portiert werden. Eine Darstellung der Programmstruktur sowie der internen Parameter des Programms ist in Anhang D gegeben.

Die Parametrierung der Software für die beiden unterschiedlichen Räume 1 und 2 wurde mit Hilfe des in Unterabschnitt 4.1.1 vorgestellten Simulationswerkzeuges vorgenommen. Die Inbetriebnahme aller Meß-, Regelungs- und Leitfunktionen erfolgte im November 1997 in Raum 1 bzw. im Februar 1998 in Raum 2. Seit der Inbetriebnahme wurden in beiden Räumen sowohl Dauerversuche zur Untersuchung des saisonalen Systemverhaltens als auch Kurzzeitversuche zur Feinoptimierung der Leit- und Reglerparameter durchgeführt.

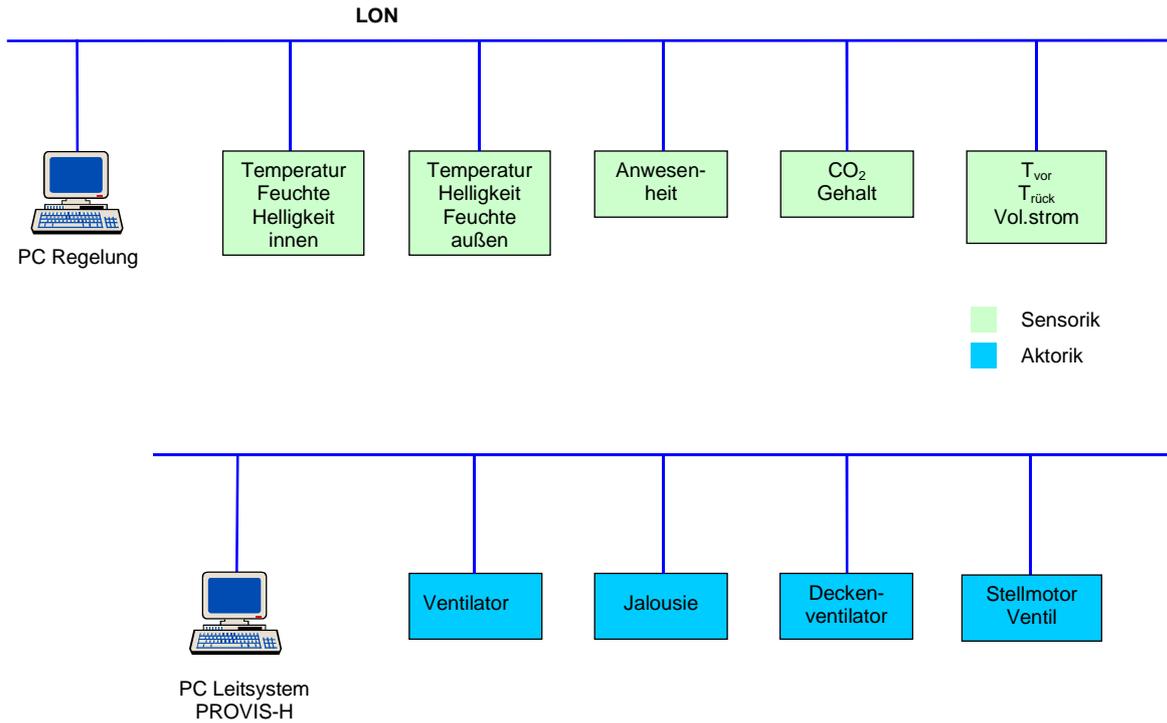


Abb. 4.2-3: Systemarchitektur von Raum 1

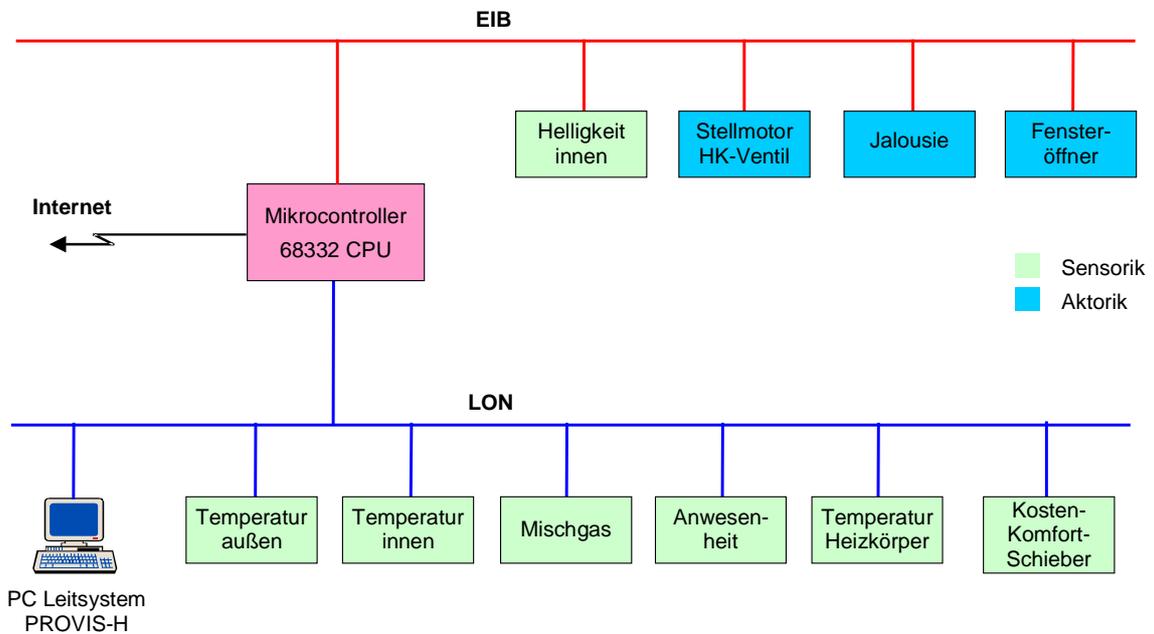


Abb. 4.2-4: Systemarchitektur von Raum 2

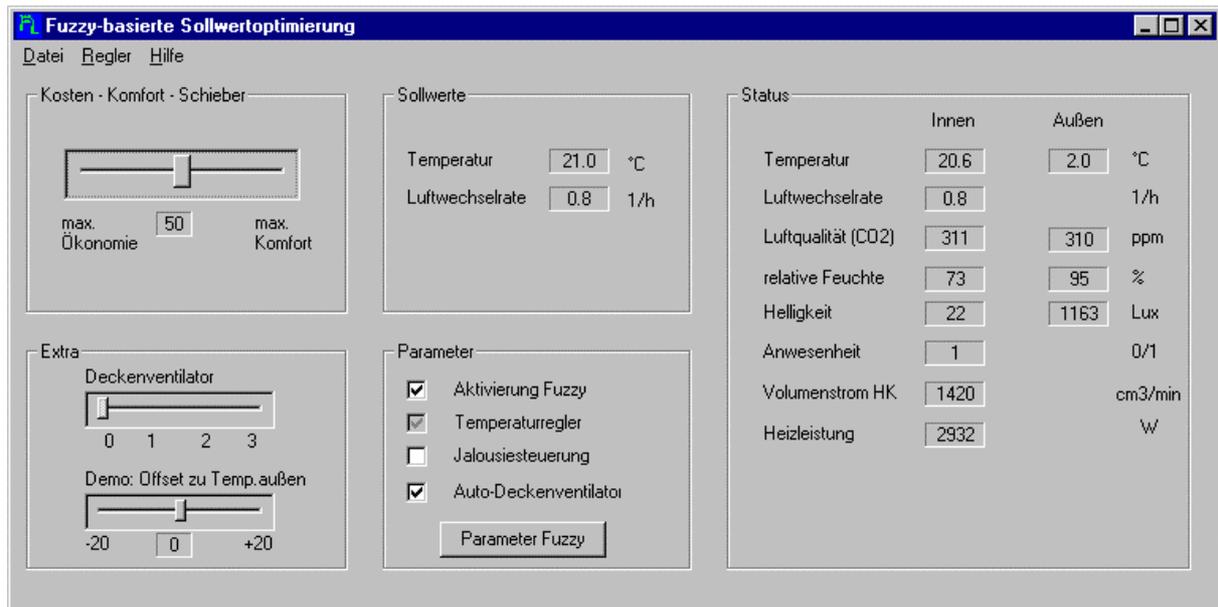


Abb. 4.2-5: Bedienoberfläche zur Visualisierung und Bedienung der Fuzzy-Leitkomponente in Raum 1

## 4.2.4 Experimentelle Ergebnisse

### 4.2.4.1 Versuchsbedingungen

Die Mehrzahl der hier dargestellten Ergebnisse wurden in Raum 1 des Test- und Demozentrums für Integrierte Haussysteme im IITB durchgeführt, da hier - im Gegensatz zu Raum 2 - die Lüftung über einen kontinuierlich einstellbaren Ventilator erfolgt und die Messung der relativen Feuchte innen und außen möglich ist. Der Ventilator befördert die Abluft aus dem Raum und Außenluft strömt über in die Wand eingebrachte Zuluftöffnungen nach. Da der Raum jedoch wegen verschiedener Kabelschächte nicht ganz abgedichtet werden konnte, strömt auch Luft aus den Nachbarräumen nach. Dies hat insbesondere Konsequenzen hinsichtlich des Einflusses der Lüftung auf Temperatur und Feuchte. So ist der zu erwartende Effekt des Absinkens der relativen Feuchte bei niedrigen Außentemperaturen nur schwach ausgeprägt. Auch das Absinken der Innentemperatur ist verglichen mit dem Modell zu gering (vgl. dazu die Ergebnisse in Anhang A). Bezüglich des CO<sub>2</sub>-Gehaltes ist der Einfluß der Lüftung jedoch nahezu ideal dem Modell entsprechend, da die Nachbarräume, aus denen teilweise Luft zuströmt, i. a. nur wenig genutzt werden und der CO<sub>2</sub>-Gehalt somit fast Außenluftniveau hat.

Diese Unzulänglichkeit der Lüftungsanlage ist jedoch ein weiteres Mittel, um die Robustheit der Leitkomponente gegenüber Modellungenauigkeiten nachzuweisen.

Da Raum 1 Südausrichtung und eine große Fensterfläche von ca. 10 m<sup>2</sup> aufweist und dort außerdem tagsüber mehrere PCs mit einer Wärmeabgabe von bis zu 1000 W in Betrieb sind, liegt die Raumtemperatur auch ohne Heizung i. a. bei ca. 21 °C. Somit ist die Bilanzierung der Heizleistung in diesem Raum nicht sehr aussagekräftig. Daher wird hier auf die Darstellung von Bilanzen verzichtet.

Die hier vorgestellten experimentellen Untersuchungen wurden mit folgenden Zielstellungen ausgewählt:

- Nachweis der guten Übereinstimmung des Modells mit dem realen Systemverhalten sowie dem Verhalten der Leitkomponente in der Simulation und im Experiment
- Nachweis der Leistungsfähigkeit der Leitkomponente bei verschiedenen Außenklimaszenarien (z. B. Winter-/Sommerfall)
- Nachweis der transparenten Führung der Raumklimaregelkreise entsprechend der eingestellten Kosten-Komfortwichtung  $\lambda$
- Robustheit der Leitkomponente gegenüber starken CO<sub>2</sub>- und Wasserdampfstörcquellen
- Robustheit der Leitkomponente gegenüber stark inhomogener Durchlüftung der Raumluft, da die homogene Durchmischung eine wesentliche Voraussetzung der entwickelten Lüftungsmodellgleichungen war (vgl. Abschnitt 2.3)

Der Diskussion dieser Zielstellungen Rechnung tragend werden in den Unterabschnitten 4.2.4.2 - 4.2.4.6 folgende experimentellen Ergebnisse vorgestellt:

Abschnitt	Inhalt
4.2.4.2	- Vergleich eines Meßergebnisses mit der entsprechenden Simulation zur Untersuchung der Übereinstimmung des Modells mit dem realen Systemverhalten - Diskussion des Systemverhaltens ohne/mit Leitkomponente sowie der Einfluß des Wichtungsfaktors $\lambda$
4.2.4.3	- Verhalten der Leitkomponente in Abhängigkeit des Wichtungsfaktors $\lambda$ bei konstanter Wasserdampfstörcquelle
4.2.4.4	- Untersuchung der Robustheit der Leitkomponente bei stark inhomogener Durchlüftung, indem Störcquellen, z. B. Wasserdampf und CO <sub>2</sub> -Störcquellen, in unmittelbarer Nähe des jeweiligen Sensors angebracht werden
4.2.4.5	- Verhalten der Leitkomponente im Sommerfall
4.2.4.6	- Meßergebnisse bei Lüftung über einen ansteuerbaren Fensterschwenker - Verhalten der Leitkomponente bei starken, kurzzeitigen Störcquellen (Zigaretten)

Tabelle 4.2-2: Experimentelle Ergebnisse der Unterabschnitte 4.2.4.2 - 4.2.4.6

#### 4.2.4.2 Vergleich experimentelle und Simulationsergebnisse

Um die Praxishöhe, aber auch die Grenzen des Simulationsmodells bewerten zu können, wurden für ein repräsentatives Fallbeispiel experimentelle und Simulationsergebnisse verglichen.

Die Messung, die in Abb. 4.2-6 dargestellt ist, wurde in der Nacht vom 31. März zum 01. April 1998 erhoben. Betrachtet wird der Fall, daß die Leitkomponente zunächst deaktiviert ist und später mit wechselndem Wichtungsfaktor  $\lambda$  zugeschaltet wird.

Dargestellt ist in Abb. 4.2-6 der Zeitverlauf der Innentemperatur  $T_i$  (Soll- und Istverlauf), der Außentemperatur  $T_a$ , der An- bzw. Abwesenheit von Personen (Anw), der vom Ventilator gesteuerten Luftwechselrate LWR, des  $\text{CO}_2$ -Gehaltes innen und außen ( $\text{CO}_{2i}$ ,  $\text{CO}_{2a}$ ) sowie der relativen Feuchte innen und außen ( $\varphi_i$ ,  $\varphi_a$ ). Der zunächst leere Raum wird gegen 20:00 h von 3 Personen betreten, die ihn erst gegen 2:00 h wieder verlassen. Zunächst ist die Leitkomponente nicht aktiviert, so daß sich mit der Anwesenheit der Personen im Raum die Luftqualität bis zu einem  $\text{CO}_2$ -Gehalt von 1500 ppm gegen 22:00 h stark verschlechtert.

Gegen 22:00 h wird die Leitkomponente aktiviert und der Wichtungsfaktor  $\lambda \rightarrow 0$  ("max. Ökonomie") eingestellt. Die Leitkomponente stellt LWR mit ca. 2/h so ein, daß  $\text{CO}_{2i}$  auf den oberen Grenzwert  $\text{CO}_{2\text{max}} = 1000$  ppm der Komfort-ZGF bezüglich  $\text{CO}_{2i}$  absinkt. Die gegen 23:00:h bzw. 24:00 h vollzogenen Veränderungen der Schieberstellungen auf  $\lambda = 0.5$  ("mittel") bzw.  $\lambda \rightarrow 1$  ("max. Komfort") haben eine weitere Verringerung von  $\text{CO}_{2i}$  auf etwa 750 ppm bzw. 500 ppm zur Folge. Der für  $\lambda \rightarrow 1$  eigentlich einzustellende Wert  $\text{CO}_{2\text{opt}} = 400$  ppm kann hier mit der maximal möglichen Luftwechselrate  $\text{LWR}_{\text{max}} = 6/\text{h}$  wegen der starken  $\text{CO}_2$ -Störquellen nicht erreicht werden.

Die Zeitkonstante des in etwa exponentiellen Abklingens von  $\text{CO}_{2i}$  nach Aktivierung der Leitkomponente (22:00 h) bzw. bei Veränderung des Wichtungsfaktors  $\lambda$  um 23:00 h und 23:00 h liegt bei 20 Minuten und entspricht damit der definierten Zeitkonstante der Referenztrajektorie (vgl. Tabelle C.2-3).

Der Temperatur-Sollwert  $T_{i,\text{soll}}$  stellt sich für  $\lambda \rightarrow 0$  auf  $T_{\text{min}} = 18$  °C, für  $\lambda = 0.5$  auf etwa 21 °C und für  $\lambda \rightarrow 1$  auf  $T_{\text{opt}} = 24$  °C ein. Der Istwert folgt mit einer Zeitverzögerung von etwa 20 Minuten. Dies entspricht der Zeitkonstante  $\tau$  des Raumes, die sich über die Wärmekapazität  $C$  der Luft, den  $k$ -Wert und die Wandfläche  $A$  der Außenwand abschätzen läßt zu  $\tau = C/kA$  [Kna92].

Nachdem gegen 2:00 Uhr alle Personen den Raum verlassen haben, wird der energiesparende Abwesenheitsmode der Leitkomponente aktiviert. Daher wird  $T_{i,\text{soll}}$  auf 15 °C reduziert und der Wichtungsfaktor  $\lambda$  bezüglich der Optimierung von  $\text{LWR}_{\text{soll}}$  auf  $\lambda \rightarrow 1$

("max. Komfort") gesetzt, so daß der Raum solange belüftet wird, bis  $\text{CO}_2_i$  den optimalen Wert  $\text{CO}_{2_{\text{opt}}} = 400$  ppm erreicht hat.

Die relative Feuchte  $\varphi_i$  ist in diesem Fallbeispiel ohne Einfluß auf die Optimierung, da sie mit einem Wert von etwa 65 % im optimalen Bereich liegt.

Die Simulation des experimentell gemessenen Zeitverlaufs, dargestellt in Abb. 4.2-7, wurde mit ähnlichem Außenklima, Belegungsszenario und Einstellungen des Wichtungsfaktors  $\lambda$  durchgeführt. Da insgesamt die Simulation gut mit dem Meßergebnis übereinstimmt, werden im folgenden nur die wichtigsten Unterschiede diskutiert.

Da im Modell die Raumluft ideal durchmischt ist, bewirkt die Anwesenheit der drei Personen ab 20:00 h einen exakt linearen Anstieg von  $\text{CO}_2_i$  bis um 22:00 h auf 1500 ppm, während der Anstieg im Experiment nur annähernd linear ist. Mit der Aktivierung der Leitkomponente um 22:00 h mit  $\lambda \rightarrow 0$  und ab 23:00 h mit  $\lambda = 0.5$  ist der Verlauf von LWR und  $\text{CO}_2_i$  in Experiment und Simulation fast identisch.

Ab 24:00 wird im Experiment mit der Einstellung von  $\lambda \rightarrow 1$  die Luftwechselrate LWR fast unmittelbar auf  $\text{LWR}_{\text{max}} = 6/\text{h}$  gesetzt, während in der Simulation erst ab 1:00 h  $\text{LWR}_{\text{max}}$  erreicht wird. Eine mögliche Ursache dafür kann darin liegen, daß die Störquellen, die in Experiment und Simulation von 20:00 h bis 22:00 h wegen des gleichen Anstiegs von  $\text{CO}_2_i$  in etwa identisch sind, im Experiment im Laufe des Abends etwas größer geworden sind. Für diese These spricht, daß in der Simulation mit der maximalen Luftwechselrate  $\text{LWR}_{\text{max}}$  der angestrebte Wert  $\text{CO}_2_i = \text{CO}_{2_{\text{opt}}}$  erreicht wird, im Experiment jedoch nicht.

In der Simulation ist im Gegensatz zum Experiment ein deutlicher Einfluß von LWR auf  $\varphi_i$  und  $T_i$  festzustellen. Dies ist mit der weiter oben diskutierten Eigenschaft der Lüftungsanlage in Raum 1 zu begründen, daß die ausgetauschte Luft nicht, wie in der Simulation angenommen, nur von außen kommt, sondern zum Teil auch aus Nachbarräumen und somit wesentlich höhere Temperatur als die Außenluft hat.

Zusammenfassend läßt sich feststellen, daß die experimentellen und Simulationsergebnisse im Zeitverhalten von  $\text{CO}_2_i$  und  $T_i$  sowie dem Einfluß der Raumbelugung sehr gut übereinstimmen. Weniger gut ist die Übereinstimmung bei  $\varphi_i$ , die in der Unzulänglichkeit der nachträglich installierten Lüftung begründet ist. Die Ergebnisse verdeutlichen, daß ohne Leitkomponente sich wegen der Stärke der  $\text{CO}_2$ -Störquellen bereits nach relativ kurzer Raumbelugung ein unakzeptabler Raumluftzustand einstellt. Es wurde gezeigt, daß bei aktivierter Leitkomponente durch den Wichtungsfaktor  $\lambda$  eine transparente Führung der Raumklimaregelkreise erfolgt, da sich  $T_{i,\text{soll}}$  und  $\text{LWR}_{\text{soll}}$  entsprechend der gewählten Komfort-Kostenwichtung und den definierten Komfortgrenzen einstellen.

**Experiment:**

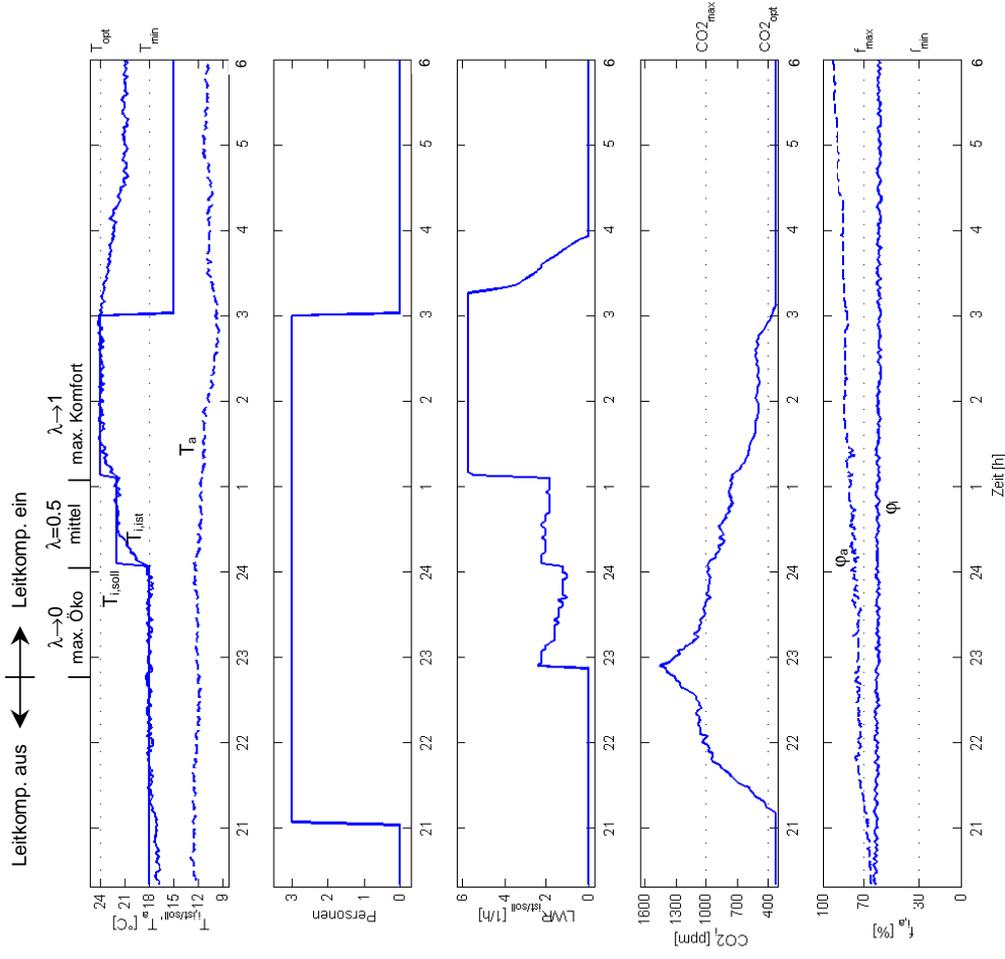


Abb. 4.2-6: Gemessenes Systemverhalten im Test- und Demozentrum (Raum 1) mit und ohne Fuzzy-Leitkomponente in der Übergangszeit (31.03.98)

**Simulation:**

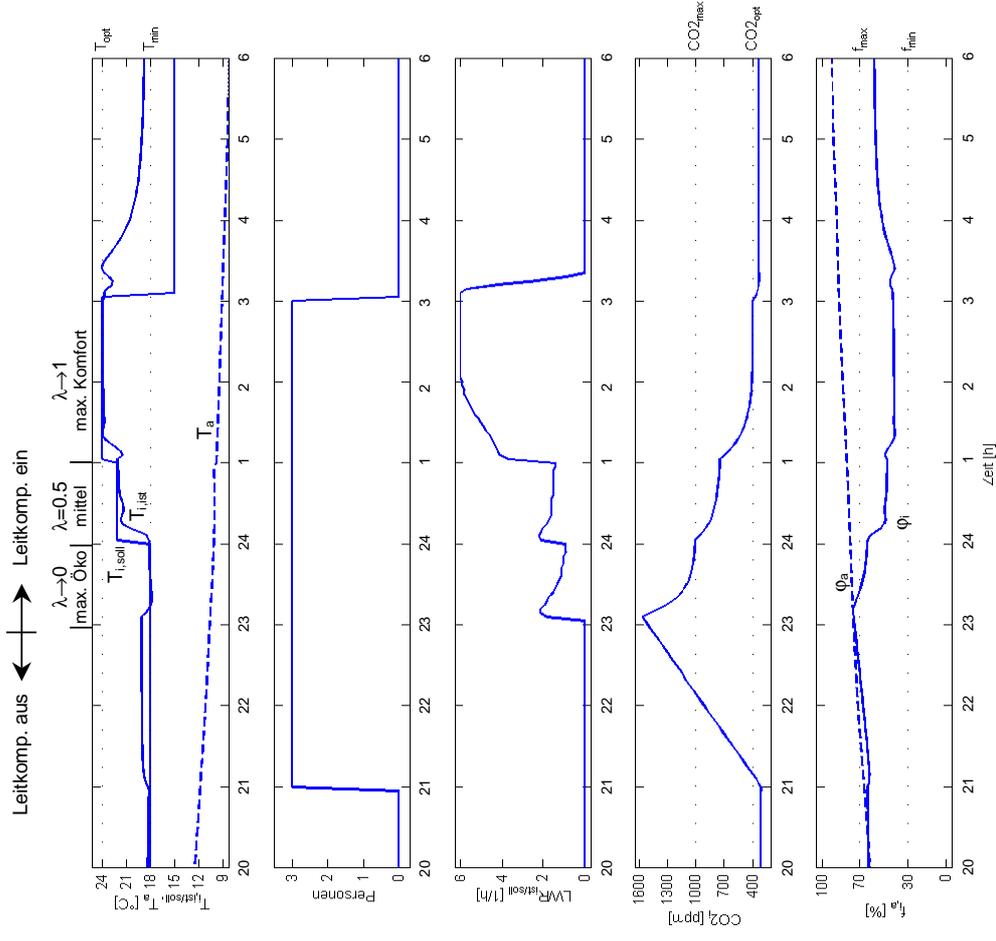


Abb. 4.2-7: Simulation des experimentell gemessenen Szenarios aus Abb. 4.2-6

#### 4.2.4.3 Systemverhalten bei konstanter Wasserdampfstörquelle

Mit der Anwesenheit von Personen im Raum sind neben CO<sub>2</sub>-Störquellen vor allem der Eintrag von Wasserdampf in den Raum verbunden. So werden pro Tag in einer durchschnittlichen Wohnung 8 - 15 Liter Wasserdampf eingebracht [VDI99b]. Zu hohe relative Feuchte im Raum kann jedoch zu hygienischen Problemen und Bauwerksschäden z. B. durch Schimmelbildung führen.

Ziel der im folgenden diskutierten Messung ist es daher, das Systemverhalten mit und ohne Fuzzy-Leitkomponente sowie den Einfluß des Wichtungsfaktors  $\lambda$  bei Eintrag von Wasserdampfstörquellen zu untersuchen.

Der in Abb. 4.2-8 dargestellte Zeitverlauf wurde in der Nacht vom 04.03.99 zum 05.03.99 erhoben. Dargestellt ist neben den üblichen Meßgrößen der Wichtungsfaktor  $\lambda$  sowie im Bild der letzten Zeile der Parameter  $\varphi_{\text{tau}}$ , der als Funktion der aktuellen Innen- und Außentemperatur den kritischen Wert der relativen Feuchte angibt, oberhalb dessen mit Wasserniederschlag an den Wänden zu rechnen ist (vgl. 3.3.1.1). Für  $\varphi_i > \varphi_{\text{tau}}$  nimmt die Komfort-ZGF bezüglich  $\varphi_i$  ( $\mu_{\text{komf}_\varphi}$ ) den Wert Null an, so daß diese Grenze auch für  $\lambda \rightarrow 0$  ("max. Ökonomie") eingehalten werden muß.

Von 23:00 h bis 7:00 h ist eine Wasserdampfquelle aktiviert, die etwa 200 Gramm Wasserdampf pro Stunde produziert. Zum Vergleich: Der Mensch produziert je nach Aktivität zwischen 30 g/h und 200 g/h Wasserdampf; bei Koch- und Arbeitsvorgängen fallen zwischen 600 g/h und 1500 g/h Wasserdampf an [Reck95, Erh86]. Der Raum war in diesem Zeitraum nicht belegt, die angezeigte Belegung des Raumes bis 7:00 h wurde künstlich gesetzt. Da also keine CO<sub>2</sub>-Störquelle vorhanden ist, verändert sich CO<sub>2,i</sub> nicht und spielt daher bei diesem Zeitverlauf keine Rolle.

Die Leitkomponente ist bis 1:00 h deaktiviert, so daß  $\varphi_i$  aufgrund der starken Wasserdampfstörquelle bis zu diesem Zeitpunkt auf ca. 95 % ansteigt und somit weit größer als der Grenzwert  $\varphi_{\text{tau}} \approx 80$  % ist. Um 1:00 h wird die Leitkomponente aktiviert und  $\lambda \rightarrow 0$  gesetzt. LWR stellt sich auf etwa 1/h ein, so daß  $\varphi_{\text{tau}} \approx 80$  % genau eingehalten wird. Mit der Einstellung von  $\lambda = 0.5$  um 3:00 h und  $\lambda \rightarrow 1$  um 5:00 h wird LWR jeweils etwas erhöht, so daß  $\varphi_i$  schließlich auf  $\varphi_{\text{max}} = 70$  %, das die obere Grenze des optimalen Bereiches von  $\mu_{\text{komf}_\varphi}$  definiert, absinkt.

Mit Abschalten der Störquelle um 7:00 h wird auch LWR reduziert und erreicht gegen 7:45 h den Wert Null.

Die relative Feuchte außen  $\varphi_a$  lag während der gesamten Nacht bei 95 % (obere Meßbereichsgrenze). Wegen der niedrigen Außentemperatur von  $T_a \approx 5$  °C betrug die

effektive Außenfeuchte  $\bar{\varphi}_a = \varphi_a x_{\max}(T_a) / x_{\max}(T_i)$  jedoch etwa 35 %, so daß durch den Lüftungsvorgang trotz des hohen Wertes von  $\varphi_a$  eine Reduzierung von  $\varphi_i$  erzielt werden konnte.

Das Experiment läßt also zum einen erkennen, daß bei starken Wasserdampfstörungen ohne Leitkomponente bereits nach relativ kurzer Zeit die aus hygienischen und bauphysikalischen Gründen einzuhaltende obere Grenze  $\varphi_{\text{tau}}$  der relative Feuchte  $\varphi_i$  überschritten wird.

Mit aktivierter Leitkomponente wird der Raumklimaprozeß so geführt, daß je nach eingestellter Kosten-Komfortwichtung die definierten Komfortkriterien eingehalten werden. Dies bedeutet, daß für  $\lambda \rightarrow 0$  ("max. Ökonomie") gerade die obere Grenze  $\varphi_i = \varphi_{\text{tau}}$  eingehalten wird, während für  $\lambda \rightarrow 1$  ("max. Komfort") sich LWR so einstellt, daß  $\varphi_i = \varphi_{\text{max}}$  ist und somit  $\varphi_i$  im optimalen Bereich liegt.

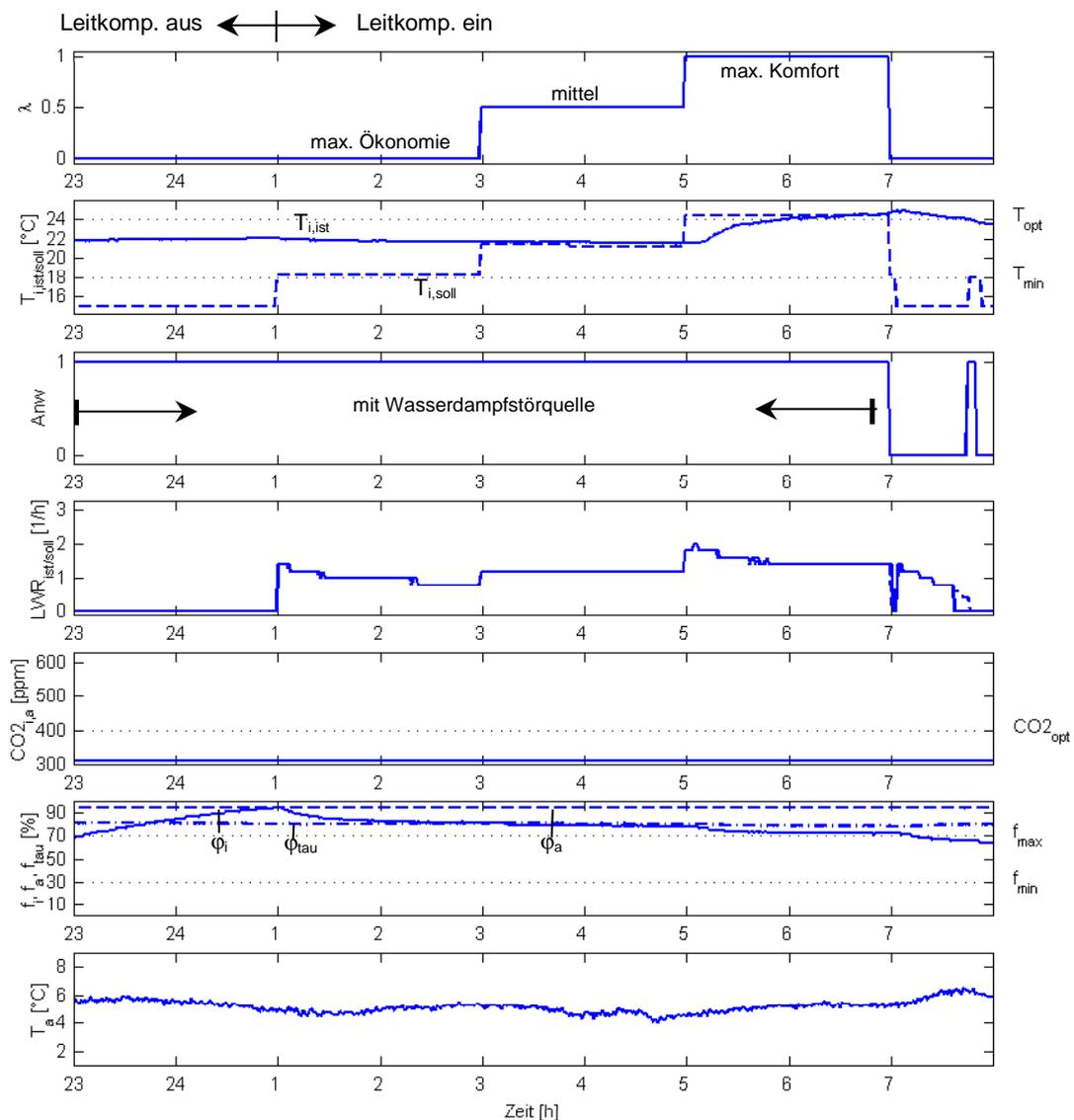


Abb. 4.2-8: Nachtversuch mit konstanter Wasserdampfstörrquelle (04./05.03.99)

#### 4.2.4.4 Systemverhalten bei inhomogener Durchlüftung

Nachdem in den vorangegangenen Unterabschnitten das Systemverhalten ohne/mit Leitkomponente sowie der Einfluß des Wichtungsfaktors  $\lambda$  bei starken CO<sub>2</sub>- bzw. Wasserdampfstörcquellen diskutiert wurde, ist die Robustheit der Leitkomponente gegenüber stark inhomogener Durchlüftung Gegenstand dieses Unterabschnitts.

Die bei der Optimierung von LWR<sub>soll</sub> verwendeten Modellgleichungen des Lüftungsprozesses (Gleichungen 3.5-8) gehen von der idealisierten Annahme einer homogenen Durchmischung der Raumluft während der Lüftung aus. Ziel dieses Unterabschnittes ist es nachzuweisen, daß sich die Leitkomponente robust verhält gegenüber inhomogenen Lüftungsverhältnissen, die in der Praxis häufig anzutreffen sind.

Der in Abb. 4.2-9 dargestellte Zeitverlauf wurde am 25.11.98 erhoben. Ab 15:00 h werden CO<sub>2</sub>- und Wasserdampfstörcquellen in unmittelbarer Nähe des CO<sub>2</sub>- bzw. Feuchtesensors platziert, so daß die Sensoren nicht einen repräsentativen Wert der Raumluft, sondern einen lokalen, stark erhöhten und zeitlich stark schwankenden Wert messen.

Bis 15:00 h wird die Leitkomponente mit dem Wichtungsfaktor  $\lambda \rightarrow 0$  ("max. Ökonomie") betrieben. Durch die Anwesenheit von Personen im Raum steigt CO<sub>2i</sub> zwischen 13:00 h und 15:00 h von 350 ppm auf etwa 800 ppm.

Ab 15:00 h wird  $\lambda = 0.5$  ("mittel") eingestellt und die oben beschriebene Anordnung von CO<sub>2</sub>- und Wasserdampfstörcquellen vorgenommen. LWR stellt sich so ein, daß im Mittel CO<sub>2i</sub> bei 700 ppm und  $\varphi_i$  bei etwa 75 % und somit im mittleren Komfortbereich liegen. Die Leitkomponente reagiert aufgrund der Tiefpaßfilterung der geschätzten Störgrößen "gutmütig" auf die starken stochastischen Schwankungen der Meßwerte. Um 18:20 h werden die Störquellen abgeschaltet.

Die Spitzenwerte von LWR<sub>soll</sub>, markiert durch Kreise, entsprechen dem Abwesenheitsmode der Leitkomponente. Dabei wird  $T_{i,soll} = 15$  °C und  $\lambda \rightarrow 1$  ("max. Komfort") gesetzt, so daß für die Dauer der Abwesenheit verstärkt gelüftet wird, um CO<sub>2i</sub> und  $\varphi_i$  in den Komfortbereich zu bringen. Auf Abwesenheit wird jedoch erst nach etwa 5 Minuten erkannt, um zu kurzzeitige Umschaltvorgänge zu vermeiden. So erklärt sich, daß bei den kurzen Abwesenheiten z. B. zwischen 19:00 und 20:00 h keine Änderung von  $T_{i,soll}$  und LWR<sub>soll</sub> erfolgt.

Das Versuchsergebnis läßt insgesamt gute Robustheit gegenüber schlechter Durchmischung der Raumluft und starken, kurzzeitigen Störungen durch CO<sub>2</sub>- und Wasserdampfstörcquellen erkennen. Das Ergebnis zeigt, daß die definierten Komfortgrenzen im Falle starker stochastischer Schwankungen im Mittelwert eingehalten werden.

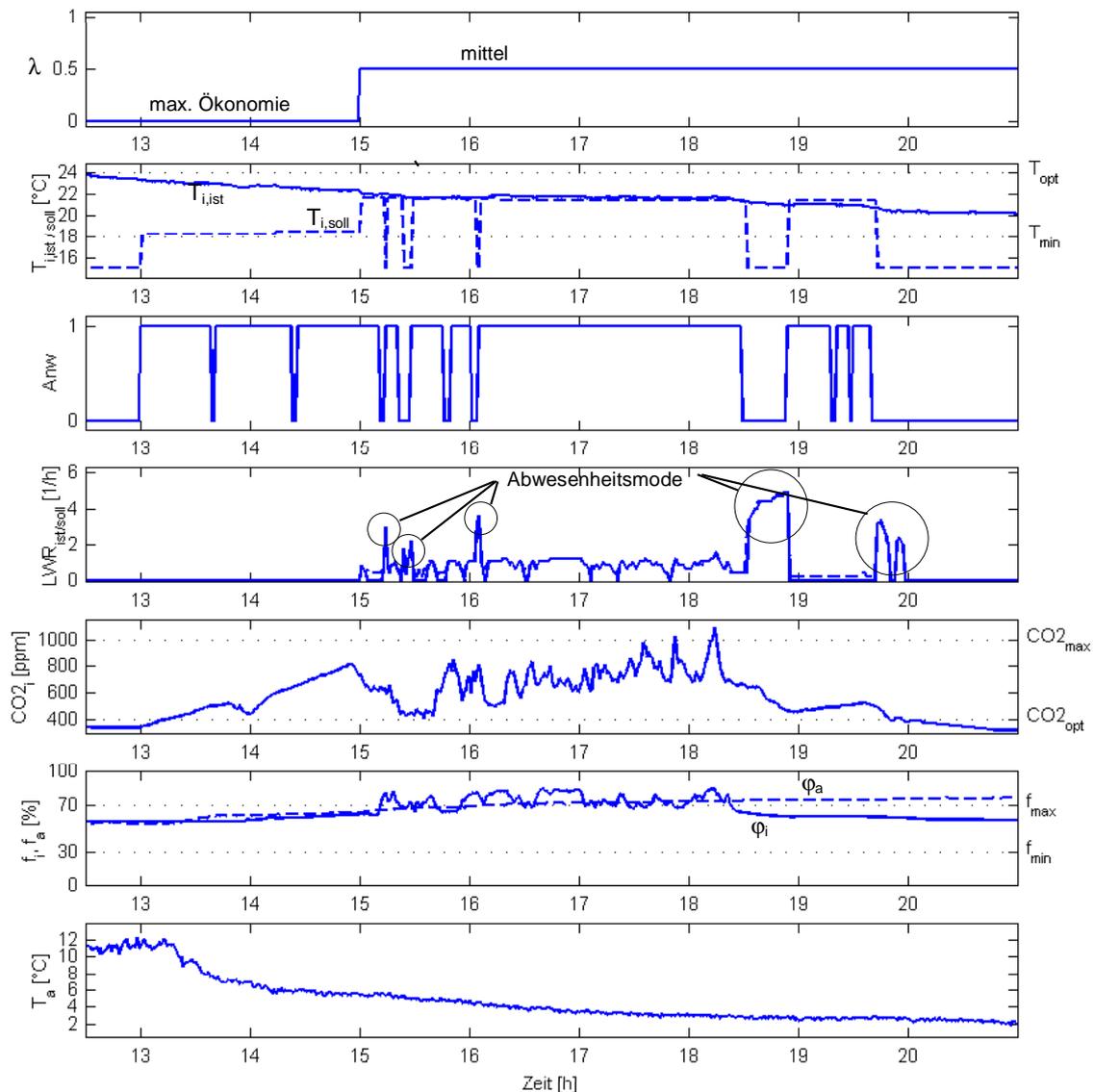


Abb. 4.2-9: Störversuche bei schlechter Durchmischung der Raumluft (25.11.98)

#### 4.2.4.5 Systemverhalten in der heizungsfreien Periode (Sommerfall)

Der ursprüngliche Ansatz der Leitkomponente bestand darin, die Heizungs- und Lüftungsregelkreise zu koordinieren und optimieren. Es soll nachfolgend gezeigt werden, daß die Leitkomponente auch in der heizungsfreien Periode (Sommerfall) wirkungsvoll angewandt werden kann. In diesem Fall wird das Komfortkriterium bezüglich Temperatur bei der Optimierung von  $LWR_{soil}$  mit berücksichtigt, da nun die Lüftung als Stellglied zur Temperaturbeeinflussung dient.

In Abb. 4.2-10 ist ein typischer Zeitverlauf eines sehr warmen Sommertages dargestellt. Die Messung wurde am 30.07.98 erhoben. Aufgetragen sind neben den üblichen Größen die Temperaturdifferenz ( $T_i - T_a$ ), die für die Aktivierung und Wirkungsrichtung von LWR zur

Beeinflussung von  $T_i$  wesentlich ist. Da die Heizung hier nicht als Aktorik in Erscheinung tritt, ist  $T_{i,soll}$  nicht dargestellt.

Der Wichtungsfaktor  $\lambda$  wurde über den Meßzeitraum auf  $\lambda = 0.5$  ("mittel") eingestellt. Die Wichtung ist im Sommerfall i. a. jedoch nicht sehr einflußreich, da das Ökonomie-Kriterium nur über die benötigte Ventilatorleistung in Erscheinung tritt.

Bereits um 7:00 h morgens liegt  $T_i$  bei  $T_{opt} = 24$  °C. Da es bereits am Tag zuvor sehr warm war, haben sich die Wände des Raumes aufgewärmt und wirkten in der Nacht als Wärmequelle. Aus diesem Grund ist LWR mit etwa 1/h aktiviert, um einer weiteren Erwärmung vorzubeugen.

Von 9:30 h bis 10:00 h wird eine Wasserdampfströmungsquelle in unmittelbare Nähe des Feuchtesensors gebracht, so daß  $\varphi_i$  sprunghaft auf etwa 95 % ansteigt. Die Leitkomponente reagiert, indem LWR für die Dauer von einer halben Stunde auf etwa 2/h erhöht wird. Nachdem  $\varphi_i$  auf  $\varphi_{opt} = 70$  % gesunken ist, nimmt LWR gegen 10:30 h wieder den ursprünglichen, durch  $T_i$  verursachten Wert von 1/h an.

Der starke Anstieg von LWR ab etwa 11:00 h ist durch die Erhöhung von  $T_a$  ab diesem Zeitpunkt begründet. Somit verringert sich  $(T_i - T_a)$  fast auf Null, so daß für den Transport der Wärmeleistung aus dem Raum LWR erhöht werden muß. Die internen und externen Wärmequellen, d.h. die Wärmeabgabe von Personen, PCs und die an diesem Tag sehr starke Solarstrahlung bewirken einen Anstieg von  $T_i$  bis auf etwa 28 °C um 14:00 h.

Gegen 14:30 h unterschreitet  $(T_i - T_a)$  die untere Hysteresegegrenze  $-\Delta T_{Hyst} = -1$  °C, so daß die Leitkomponente  $(T_i - T_a)$  nun als negativ erkennt und somit durch die Aktivierung von LWR kein Wärmetransport aus dem Raum, sondern in den Raum gegeben ist. Dies bewirkt, daß LWR ab 14:30 h gleich Null gesetzt wird. Während LWR deaktiviert ist, ist ein leichtes Ansteigen von  $CO_{2i}$  auf etwa 400 ppm zu verzeichnen.

Gegen 19:30 h überschreitet  $(T_i - T_a)$  die obere Hysteresegegrenze  $+\Delta T_{Hyst} = +1$  °C, so daß LWR wieder zur Abkühlung des Raumes eingesetzt wird. Da der Raum zu diesem Zeitpunkt nicht belegt ist, wird durch den Abwesenheitsmode der Leitkomponente die Wichtung intern auf  $\lambda \rightarrow 1$  ("max. Komfort") gesetzt. Dadurch erklärt sich das Absinken von LWR von 5/h auf etwa 3/h zwischen 19:00 h und 20:00 h in den kurzen Anwesenheitsphasen.

Nachdem der Raum ab etwa 20:00 h nicht mehr belegt ist, versucht die Leitkomponente,  $T_i$  auf  $T_{opt} = 24$  °C abzusenken, was aufgrund der Aufwärmung des gesamten Raumes inklusive der Wände erst nach einigen Stunden gelingt. Hierbei spielt auch die Eigenschaft der Lüftungsanlage, daß nicht nur Außenluft, sondern auch Luft aus Nachbarräumen angesaugt wird, eine Rolle.

Anhand des dargestellten Zeitverlaufs ist die Temperaturabhängigkeit der relativen Feuchte innen  $\varphi_i$  und außen  $\varphi_a$  gut zu beobachten.  $\varphi_i$  sinkt im Laufe des Nachmittags aufgrund der Erwärmung des Raumes auf ca. 55 % ab und steigt in den Nachtstunden bedingt durch die Abkühlung wieder an. Bei  $\varphi_a$  ist eine noch stärkere Kopplung mit der Außentemperatur  $T_a$  zu beobachten.

Die Meßergebnisse lassen erkennen, daß die Leitkomponente auch bei den besonderen Verhältnissen des Sommerfalls, die vor allem im Problem der Überhitzung des Raumes liegen, wirkungsvoll angewandt werden kann. Von besonderer Bedeutung ist die Berücksichtigung der Wirkungsrichtung von LWR bezüglich  $T_i$ , die sich je nach Vorzeichen von  $(T_i - T_a)$  umkehren kann. Das Ergebnis verdeutlicht den Effekt dieser Vorzeichenumkehr, der in der Leitkomponente mit einer Hystereseffunktion gegenüber Rauscheinflüssen abgesichert wird.

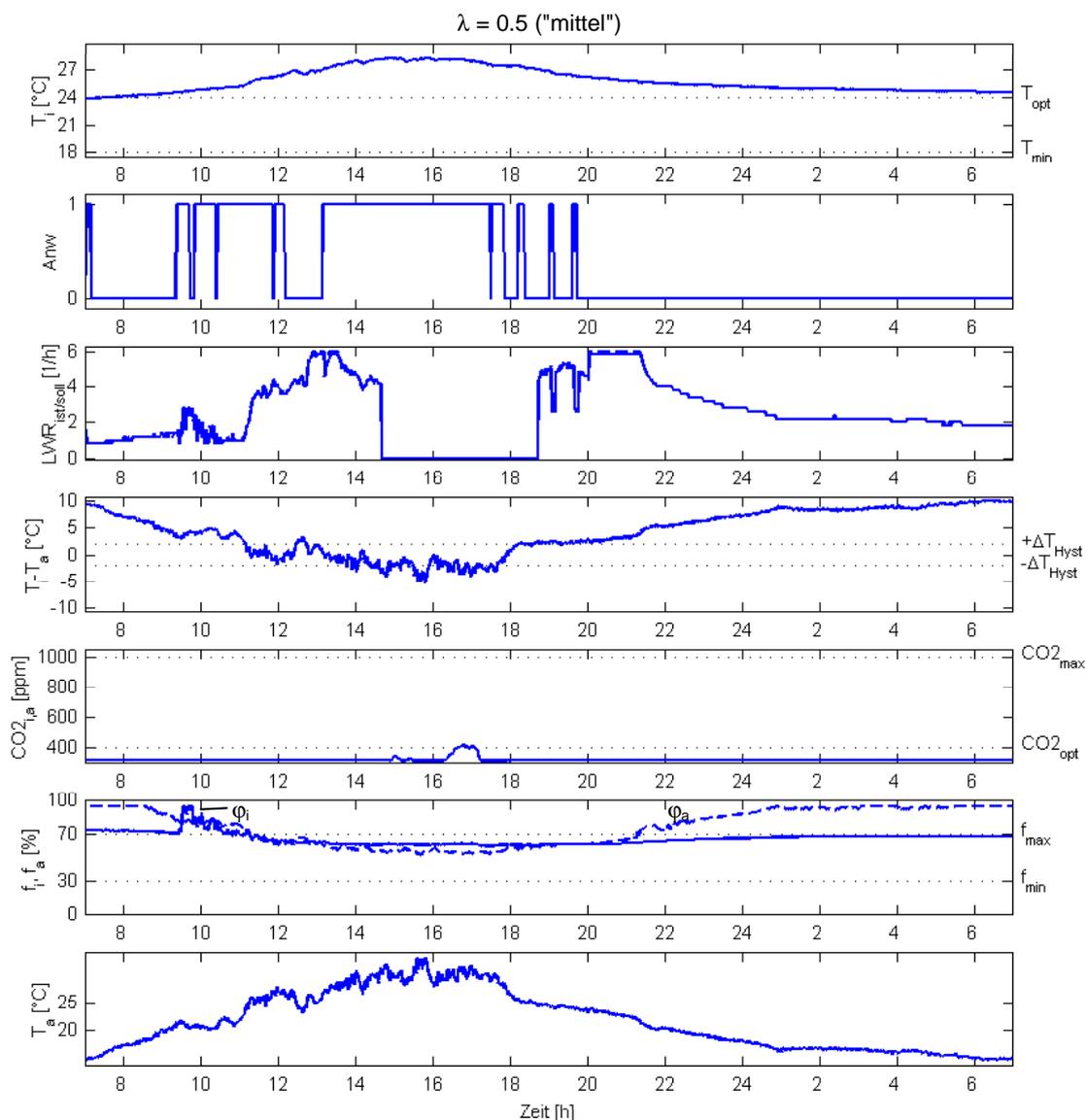


Abb. 4.2-10: Gemessenes Systemverhalten im Sommerfall (30.07.98)

#### 4.2.4.6 Systemverhalten bei Lüftungssteuerung mit Schwenkfenster

Das abschließend vorgestellte Meßergebnis aus Raum 2 des Test- und Demozentrums am IITB dient dem Nachweis, daß die Leitkomponente auch mit sehr unterschiedlicher Lüftungsaktorik (Schwenkfenster statt Ventilator) realisiert werden kann. Ebenso wird gezeigt, daß die Leitkomponente flexibel ist bezüglich der verwendeten Sensorik, da in Raum 2 die Luftqualität über einen Mischgassensor an Stelle eines CO<sub>2</sub>-Sensors erfaßt wird. Außerdem sind in diesem Raum keine Sensoren bezüglich relativer Feuchte innen und außen verfügbar. Schließlich unterscheidet sich Raum 2 in der Bauphysik wesentlich von Raum 1. Wegen des höheren Anteils an Außenwänden ist der Parameter  $\varepsilon \approx 0.05$ , so daß die empfundene Temperatur  $T_{op}$  nicht mehr der Lufttemperatur  $T_{i,ist}$  gleichzusetzen ist (vgl. 2.4.3).

Da in Raum 2 die Lüftung über ein Schwenkfenster erfolgt, wird die Vermeidung von Zugerscheinungen über die ZGF  $\mu_{komf\_Z}$  als weiteres Komfortkriterium berücksichtigt.

Die Lüftungssteuerung ist durch den gleichen Schwellwertalgorithmus wie in der Simulation aus Unterabschnitt 4.1.3.5 realisiert:

$$\begin{aligned} LWR_{soll} > 0.9/h &\Rightarrow \text{Fenster auf} \hat{=} LWR_{ist} = 0.8/h \\ LWR_{soll} < 0.7/h &\Rightarrow \text{Fenster zu} \hat{=} LWR_{ist} = 0 \end{aligned} \quad (4.2-1)$$

Die in Abb. 4.2-11 gezeigte Messung wurde am 02.03.99 in Raum 2 des Test- und Demozentrums am IITB erhoben. Dargestellt ist in Abb. 4.2-11 neben den üblichen Größen der Zugehörigkeitsgrad bezüglich Zugerscheinungen  $\mu_{komf\_Z}$  sowie Mischgas innen und außen ( $MG_i$ ,  $MG_a$ ) in willkürlichen Einheiten (arbitrary units, [a. u.]) an Stelle von CO<sub>2i</sub>, CO<sub>2a</sub>.

Der Mischgasgehalt der Außenluft wurde experimentell zu  $MG_a = 40$  bestimmt. Die Komfort-ZGF bezüglich  $MG_i$  ( $\mu_{komf\_M}$ ) wird, analog zur Definition der Komfort-ZGF bezüglich CO<sub>2i</sub>, durch die Parameter  $MG_{opt} = 60$  und  $MG_{max} = 200$  festgelegt. Für  $MG_i \leq MG_{opt}$  ist  $\mu_{komf\_M} = 1$ , Für  $MG_i \geq MG_{max}$  gilt  $\mu_{komf\_M} = 0$ . Die Parameter  $MG_{opt}$  und  $M_{max}$  wurden empirisch ermittelt.

Zu den Zeitpunkten 9:30 h, 12:00 h, 14:30 h und 16:00 h wurde in dem Raum eine Zigarette geraucht. Da Tabakrauch eine starke Mischgas-Störquelle darstellt, steigt  $MG_i$  zu diesen Zeitpunkten sprunghaft an.

Bis um 10:20 h wird die Leitkomponente mit  $\lambda \rightarrow 0$  ("max. Ökonomie ") betrieben. Daher wird  $T_{i,soll} = 18.2$  °C ausgegeben, doch da aufgrund starker interner Wärmequellen der Istwert  $T_{i,ist}$  zu diesem Zeitpunkt bereits über 20 °C liegt, besteht zunächst kein Heizbedarf. Mit dem Rauchen der ersten Zigarette um 9:30 h überschreitet  $MG_i$  nur kurzzeitig den maximalen Wert  $MG_{max} = 200$ , so daß  $LWR_{soll}$  gleich Null bleibt.

Gegen 9:50 h verläßt die Person den Raum, so daß durch den Abwesenheitsmode der Leitkomponente  $T_{i,soll} = 15 \text{ °C}$  und intern  $\lambda \rightarrow 1$  ("max. Komfort") gesetzt wird. Dies hat  $LWR_{soll} = 3/h$  zur Folge, so daß das Fenster geöffnet wird. Nachdem  $MG_i$  fast bis auf  $MG_{opt} = 60$  gesunken ist, schließt das Fenster wieder.

Gegen 10:20 h wird der Wichtungsfaktor  $\lambda = 0.5$  ("mittel") gesetzt, was eine Erhöhung von  $T_{i,soll}$  auf  $22.4 \text{ °C}$  zur Folge hat. Um 12:00 h wird die zweite Zigarette geraucht, wodurch  $MG_i$  bis auf 400 ansteigt. Da die Person im Raum bleibt, werden zu erwartende Zugscheinungen in  $\mu_{komf\_Z}$  berücksichtigt, so daß  $LWR_{soll}$  nur auf etwa 2/h ansteigt. Das Fenster wird geöffnet, solange  $LWR_{soll}$  den Schwellwert von 0.9/h übersteigt.

Gegen 12:30 h verläßt die Person den Raum, so daß der Abwesenheitsmode der Leitkomponente ein erneutes Ansteigen von  $LWR_{soll}$  und eine Öffnung des Fensters zur Folge hat.

Gegen 10:20 h wird der Wichtungsfaktor  $\lambda \rightarrow 1$  gesetzt ("max. Komfort"), so daß  $T_{i,soll}$  auf  $24.6 \text{ °C}$  gesetzt wird. Dieser Wert entspricht bei  $T_a = 10 \text{ °C}$  und den Wandeigenschaften von Raum 2 der Empfindungstemperatur  $T_{op} = 24 \text{ °C}$  und somit der definierten optimalen Temperatur.

Das Rauchen der Zigaretten gegen 14:30 h und 16:00 h bewirkt jeweils die Öffnung des Fensters für etwa eine halbe Stunde. Da wegen der zu erwartenden Zugscheinungen  $\mu_{komf\_Z}$  als Restriktion wirkt, wird  $LWR_{soll}$  etwas abgesenkt, so daß schließlich  $MG_i$  nur auf etwa 90 und nicht bis auf  $MG_{opt} = 60$  absinkt. Dies entspricht einem Kompromiß in den Komfortforderungen bezüglich Luftqualität (Mischgas) und Zugfreiheit.

Nachdem die Person gegen 17:00 h den Raum verlassen hat, entfällt  $\mu_{komf\_Z}$  als Restriktion, so daß  $LWR_{soll}$  bis auf 2/h ansteigt und das Fenster geöffnet wird. Gegen 19:30 h sinkt  $LWR_{soll}$  unter die Schwelle von 0.7/h, da nun  $MG_i$  auf  $MG_{opt} = 60$  gefallen ist, so daß das Fenster wieder geschlossen wird.

Die Meßergebnisse lassen den für die praktische Anwendung sehr wichtigen Schluß zu, daß die Leitkomponente auch für den Fall wirkungsvoll eingesetzt werden kann, daß die Lüftung über ein Schwenkfenster an Stelle eines kontinuierlich ansteuerbaren Ventilators realisiert wird. Die zusätzliche Berücksichtigung des Komfortkriteriums bezüglich Zugscheinungen führt zu einem Kompromiß zwischen den z. T. gegensätzlichen Komfortforderungen nach guter Luftqualität und der Vermeidung von Zugscheinungen.

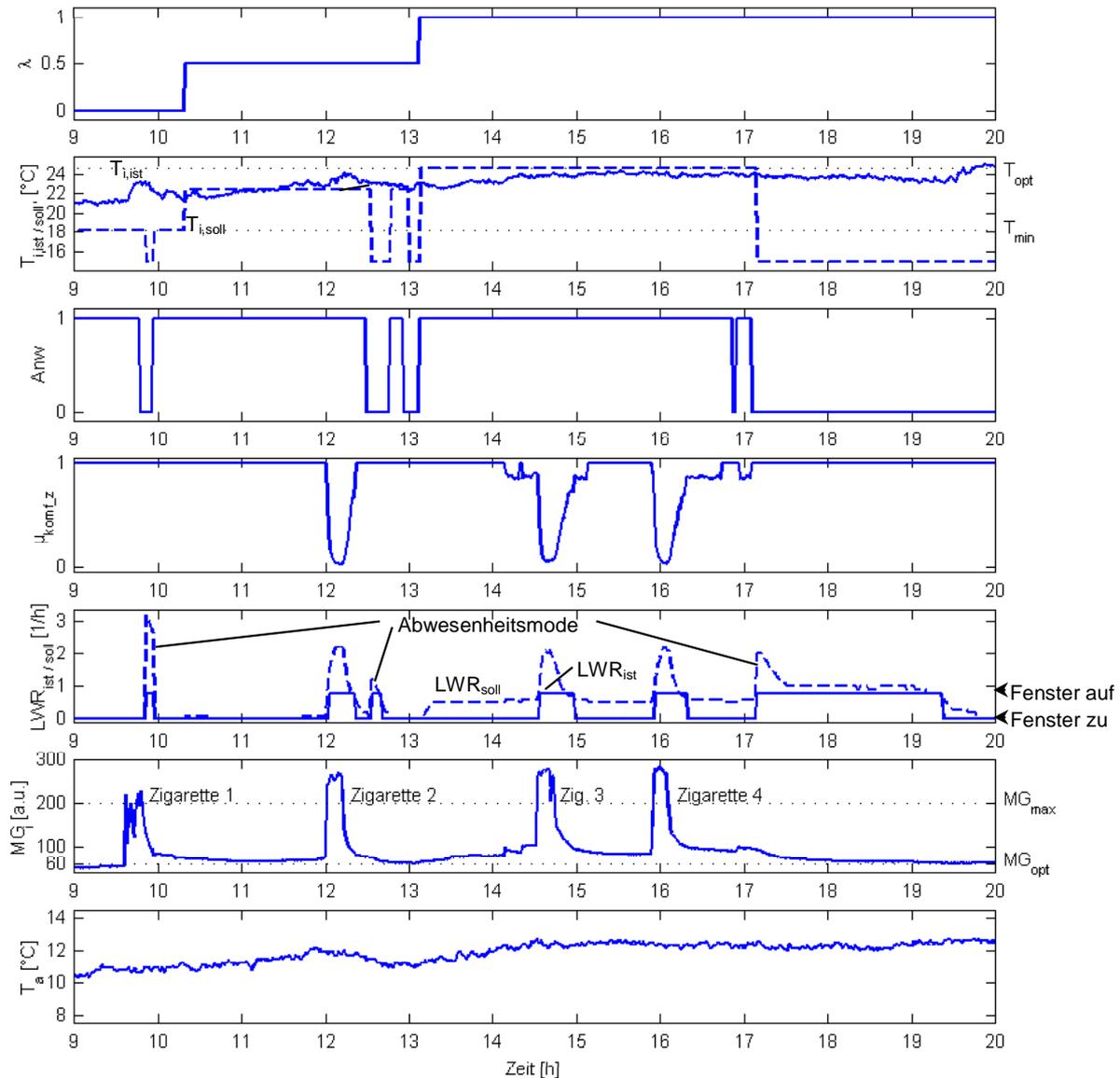


Abb. 4.2-11: Anwendung der Leitkomponente bei Fensterlüftung (02.03.99)

### 4.3 Zusammenfassung der experimentellen und Simulationsergebnisse

Die grundsätzliche Funktionsweise der Leitkomponente wurde anhand statischer Simulationsrechnungen nachgewiesen. Dabei wurde insbesondere gezeigt, daß der Wichtungsfaktor  $\lambda$  und die Außentemperatur  $T_a$  einen maßgeblichen Einfluß auf das Optimierungsergebnis haben. Dabei bleiben die Ergebnisse jedoch immer transparent, so daß sich die charakteristischen Parameter der Komfort-ZGF leicht an die individuellen Komfortkriterien anpassen lassen.

Anhand der dynamischen Simulation von repräsentativen Tagesverläufen wurde mit Hilfe eines realitätsnahen Raummodells gezeigt, daß die Leitkomponente unter allen klimatischen

Bedingungen und bei unterschiedlichen Störeinflüssen wie beispielsweise schwankender Raumbelastung wirkungsvoll angewandt werden kann und den Raumklimaprozess hinsichtlich der definierten Komfort- und Ökonomiekriterien optimiert. Die Realitätsnähe des Modells wurde durch den Vergleich eines gemessenen mit dem gleichen simulierten Szenario nachgewiesen.

Energiebilanzen der Simulationen zeigen, daß durch Wahl der Kosten-Komfortwichtung  $\lambda$  der Energieverbrauch transparent gesteuert werden kann, wobei sich etwa eine linearer Zusammenhang zwischen der verbrauchten Energie und  $\lambda$  ergibt.

Es wurde der Vorteil der Fuzzy-Leitkomponente gegenüber einfachen manuellen Bedienstrategien nachgewiesen, der darin liegt, daß die definierten unteren Komfortgrenzen nicht unterschritten werden und daß ein optimales "Komfort-Kosten-Verhältnis" erzielt wird.

Sowohl durch Simulationen als auch durch Meßergebnisse wurde die für die praktische Realisierung äußerst wichtige Robustheit der Leitkomponente gegenüber Modellungenauigkeiten (z. B. Ungenauigkeit in LWR, stark inhomogene Durchlüftung), dem Einfluß von Rauschen sowie groben Störeinflüssen wie CO<sub>2</sub>- und Wasserdampfstörungen belegt.

Die Simulations- und Meßergebnisse zeigen, daß sich die Zustandsgrößen entsprechend der definierten Referenztrajektorien überschwingungsfrei einstellen. Somit ist das interne Modell der Leitkomponente in guter Übereinstimmung mit der tatsächlichen Strecke. Die Trajektorie von LWR ist in der Regel durch einen glatten Verlauf mit wenig Stellbewegung charakterisiert.

Schließlich wurde durch den Einsatz unterschiedlicher Luftqualitätssensoren und Lüftungsaktoren in den zwei Versuchsräumen gezeigt, daß die Leitkomponente flexibel ist bezüglich der verwendeten Sensor-Aktorkonfiguration. Es wurde demonstriert, daß die Komfort-ZGFn entsprechend der gewählten Sensorik und Aktorik einfach adaptiert bzw. neue Komfort-ZGFn berücksichtigt werden können (z. B. Zugserscheinungen im Falle von Fensterschwenker).

## 5 Zusammenfassung

Die Zielstellung dieser Arbeit bestand in der Entwicklung einer anwenderfreundlichen Leitkomponente für die integrierte Koordination der Heizungs- und Lüftungsregelkreise. Es sollte dem Nutzer möglich sein, über ein einfaches Bedienelement seine individuelle Komfort-Ökonomiewichtung vorgeben zu können. Die Komfortkriterien sollten leicht bezüglich unterschiedlichen Anforderungen anpaßbar sein. Die Schnittstelle zu den unterlagerten Heizungs- und Lüftungsregelkreisen bestand in der Ausgabe von optimierten Sollwerten der Innentemperatur und der Luftwechselrate für die Heizungs-Lüftungsregelkreise bzw. direkt an deren Stellglieder.

Die Arbeit gliederte sich in folgende wesentliche Teilschritte:

- Übersichtsdarstellung der Theorie des Fuzzy Decision Making und Auswahl eines geeigneten Wichtungsverfahrens,
- Entwicklung eines physikalischen Raummodells, das alle wesentlichen Zustands-, Stör- und Stellgrößen enthält,
- Zusammenstellung und Auswahl relevanter Behaglichkeitskriterien,
- Entwicklung eines verallgemeinerten Konzeptes zur Sollwertoptimierung bei unscharfen Gütekriterien unter Verwendung der Theorie des Fuzzy Decision Making und Anwendung des Konzeptes auf die Optimierung des Temperatur- und Lüftungssollwertes,
- Nachweis der Funktion und Leistungsfähigkeit anhand realitätsnaher statischer und dynamischer Simulationen,
- Experimentelle Erprobung in zwei Versuchsräumen, Diskussion und Bewertung verschiedener charakteristischer Meßergebnisse sowie Vergleich der experimentellen mit den Simulationsergebnissen.

Die wichtigsten Ergebnisse der Arbeit werden im folgenden kurz zusammengefaßt.

### I. Theorie und Konzeptentwicklung

- Aus der Vielzahl von vorgestellten Ansätzen im Bereich von Fuzzy-Control und Fuzzy-Optimierung wurde die Theorie des Fuzzy Decision Making zur Problemlösung ausgewählt. Dies vor allem, weil sich somit die menschliche Beurteilung besonders gut nachbilden läßt, sich die vorhandenen analytischen Modellbeziehungen einfach integrieren lassen und eine Wichtung in transparenter Form möglich ist. Daher wurde der

Ansatz des Fuzzy Decision Making beispielsweise einem regelbasiertem Fuzzy-Konzept vorgezogen.

- Für den Algorithmus des Fuzzy Decision Making wurden der Problemstellung angepaßte Operatoren und Wichtungsmechanismen bestimmt. Es wurde nachgewiesen, daß die Wichtung über Multiplikatoren in Kombination mit dem MIN-Operator hier besser geeignet ist als andere, in der Literatur verbreitetere Ansätze. Der Algorithmus des Fuzzy Decision Making wurde so erweitert, daß in jedem Fall eine eindeutige optimale Entscheidung erzielt wird.
- Es wurde ein verallgemeinerter Algorithmus zur optimalen Entscheidungsfindung formuliert, in den physikalische Modellgleichungen integriert wurden. Dabei wurde unterschieden zwischen statischem und dynamischen Verhalten. Zur Berücksichtigung des dynamischen Verhaltens wurde ein prädiktiver Ansatz mit Definition einer Referenztrajektorie entwickelt. Der Algorithmus zeichnet sich im Vergleich zu alternativen Algorithmen (z. B. Dynamische Fuzzy-Programmierung) durch einen geringen Rechenaufwand aus.

## II. Anwendung auf die Optimierung des Temperatur- und Lüftungswertes

- Es wurde ein Raummodell entwickelt, das alle wesentlichen physikalischen Wechselwirkungen enthält und trotzdem nicht zu große Komplexität aufweist. Die Modellgleichungen dienen zum einen als Grundlage eines realitätsnahen Simulationsmodells, zum anderen wurden sie als Modellkomponenten im Optimierungsalgorithmus verwendet. Eine Besonderheit stellt die Entwicklung eines statischen Modells der Empfindungstemperatur dar.
- Es wurden die wichtigsten Einflußgrößen für das Komfortempfinden des Menschen (Komfort bzgl. empfundener Temperatur, relative Feuchte, Luftqualität, Zugerscheinungen) sowie Ökonomiekriterien herausgearbeitet. Diese wurden als Fuzzy-Gütekriterien dargestellt, da
  - somit die Unschärfe des menschlichen Komfortempfindens transparent und leicht individuell anpaßbar berücksichtigt werden kann,
  - die Gütekriterien über Algorithmen des Fuzzy Decision Making weiterverarbeitet werden können.
- Die verschiedenen Komfortkriterien wurden zu einem Kriterium aggregiert, so daß die schließlich resultierenden zwei Kriterien (Komfort, Ökonomie) mit einem einzigen Parameter gewichtet werden konnten. Somit wurde eine besonders einfache Bedienung des Systems durch den Nutzer ermöglicht, was im Hausbereich von großer Bedeutung ist.

- Ergänzend zu dem fuzzy-basierten Optimierungsalgorithmus wurden heuristische Strategien entwickelt, mit denen bestimmte Sonderfälle behandelt wurden (Abwesenheit, Winter-/Sommerfall).

### III. Experimentelle und Simulationserprobung

- Das Raummodell sowie die entwickelte Leitkomponente wurden unter MATLAB/Simulink realitätsnah implementiert. Das Modell berücksichtigt tages- und jahreszeitabhängiges Außenklima, wechselnde Raumbelegung und unterschiedliche Lüftungsaktorik.
- Um die universelle Anwendbarkeit nachzuweisen, wurde die entwickelte Leitkomponente in zwei bauphysikalisch sehr unterschiedlichen Versuchsräumen auf verschiedenen Plattformen (PC und Microcontroller) und mit unterschiedlichen Sensor-Aktor-konfigurationen implementiert (Luftqualität über CO<sub>2</sub> bzw. Mischgas; Lüftung über Ventilator bzw. Fensteröffner).
- In zahlreichen Simulationen und Experimentellen Ergebnissen wurde die Leistungsfähigkeit der Leitkomponente nachgewiesen. Es wurden folgende Aussagen erzielt:
  - Die deutliche Überlegenheit gegenüber einfachen manuellen Bedienstrategien wurde demonstriert.
  - Die Robustheit des Konzeptes gegenüber Modellungenauigkeiten, unterschiedlichen Störgrößen und fehlerbehafteter Stellgrößen wurde nachgewiesen.
  - Es wurde gezeigt, daß durch Vorgabe des Wichtungsfaktors die Heizungs- und Lüftungsregelkreise gemäß den definierten Gütekriterien optimiert werden.
  - Bilanzen der verbrauchten Energien ergaben eine signifikante und für den Nutzer transparente Abhängigkeit vom Wichtungsfaktor.
  - Für die jeweilige Sensor-Aktorkonfiguration ließen sich die Gütekriterien einfach anpassen bzw. ergänzen, z. B. wurde Zugfreiheit als weiteres Gütekriterium im Falle von Fensterlüftung berücksichtigt.
  - Anhand experimenteller Untersuchungen in den zwei Versuchsräumen wurde das Raummodell verifiziert. Unterschiede zum realen Systemverhalten konnten im wesentlichen erklärt werden.

Der generische Charakter der hier vorgestellten Fuzzy-Leitkomponente gestattet eine Anwendung auch auf benachbarte Fragestellungen, die im zeitlich begrenzten Rahmen dieser Arbeit nur am Rande untersucht werden konnten. Weiterführende Arbeiten sollten sich daher mit folgenden Fragestellungen beschäftigen:

- Es ist zu untersuchen, wie die Komfortzugehörigkeitsfunktionen automatisch an das individuelle Komfort-Empfinden adaptiert werden können. Nach dem hier vorgestellten Konzept müssen die charakteristischen Parameter der Komfort-Zugehörigkeitsfunktionen manuell angepaßt werden. Dies ist einem Laien jedoch nicht zuzumuten. Ein Ansatz zur Adaption könnte darin liegen, daß manuelle Interaktionen des Nutzers wie beispielsweise das Einschalten der Heizung oder die Öffnung des Fensters erfaßt, ausgewertet und daraus Parameteränderungen abgeleitet werden.
- Mit der Verfügbarkeit neuartiger und preiswerter Sensoren z. B. zur Messung der Empfindungstemperatur, der Luftströmung und weiterer Merkmale der Luftqualität können weitere Komfortkriterien in das Konzept integriert werden.
- Neben Heizung und Lüftung ist besonders in Räumen mit Südausrichtung und großen Fensterflächen die Einbindung der Jalousie in die Leitkomponente sinnvoll, da auch die Jalousiensteuerung nach unscharfen Komfort- und Ökonomiekriterien bewertet werden kann.
- Die Anwendung des Konzeptes auf verwandte Prozesse, z. B. die Optimierung des Pflanzenwuchses in Gewächshäusern oder Industrieprozesse, die nach unterschiedlichen, teils gegenläufigen Gütekriterien geführt werden können, ist zu untersuchen.

## 6 Literatur

- [Alb97] Albrecht, J.: "Vorausschauende optimale Steuer- und Regelstrategien zur Verbesserung der Kraftwerksführung", Fortschritt-Berichte VDI Reihe 8 Nr. 616, VDI Verlag, Düsseldorf 1997
- [Alt93a] v. Altrock, C.; Arend, H.-O.; Krause, B.; Steffens, C.; Behrens-Römmeler, E.: "Customer-Adaptive Fuzzy Control of Home Heating System", Proc. IEEE-Conference Industrial Fuzzy Control Intelligent Systems (IFIS), Houston/Texas 1993, S. 115-119
- [Alt93b] v. Altrock, C.: "Fuzzy Logic. Band 1 - Technologie", Oldenbourg Verlag, München 1993
- [Ash92] ASHRAE Standard 55-1992. American Society of Heating, Refrigeration and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE), 1992
- [Ath66] Athans, M.; Falb, P.: "Optimal Control", Mc Graw-Hill Book Co., Inc., New York 1966
- [Ban93] Bandemer, H.; Gottwald, S.: "Einführung in Fuzzy-Methoden: Theorie und Anwendungen unscharfer Mengen", Akademie-Verlag, Berlin 1993
- [Bat99] BatiBUS Club International im Internet: <http://www.batibus.com>
- [Bel57] Bellman, R.E.: "Dynamic Programming", Princeton Univ. Press, Princeton, N.J., 1957
- [Bel70] Bellman, R.E.; Zadeh, L.A.: "Decision Making In A Fuzzy Environment", Management Science, 17 (1970), S. 141-163
- [Bel73] Bellman, R.E.; Giertz, M.: "On the analytic formalism of the theory of fuzzy sets", Information Science 5 (1973), S. 149-157
- [Ber97a] Bernard, T; Klingner, M.; Kuntze, H.-B.; Nirschl, G.; Rudolf, M; Watson, K.: "Ressourcenschonendes Wohnen: Das Fraunhofer-Verbundprojekt IHS-ReWo", Mitteilungen aus dem Fraunhofer-Institut IITB, Karlsruhe 1997, S. 11-16
- [Ber97b] Bernard, T; Kuntze, H.-B.: "Ein fuzzy-basiertes Leitkonzept zur bedarfsgewichteten multikriteriellen Optimierung von Heizungs- und Lüftungsregelkreisen", Proc. 7. Workshop "Fuzzy Control" des GMA-UA 1.4.2, Dortmund 1997, S. 149-165
- [Ber98a] Bernard, T; Kuntze, H.-B.: "Ein fuzzy-basiertes Konzept zur multikriteriellen Sollwertoptimierung von Raumklimaregelkreisen"; 32. Regelungstechnisches Kolloquium, Boppard 1998
- [Ber98b] Bernard, T.; Kuntze, H.-B.: "Ein neues fuzzy-basiertes Leitkonzept zur bedarfsgewichtet optimierten Führung von Klimaregelkreisen." Automatisierungstechnische Praxis (atp) 40 (1998) 7, S. 23 - 25
- [Ber98c] Bernard, T; Kuntze, H.-B.: "Ein fuzzy-basiertes Konzept zur multikriteriellen Prozeßoptimierung angewendet auf die bedarfsgerechte Führung von Klimaregelkreisen", VDI/VDE GMA-Kongreß "Computational Intelligence. Neuronale Netze, Evolutionäre Algorithmen, Fuzzy Control im industriellen Einsatz", Berlin 1998. VDI-Berichte 1381, VDI Verlag, Düsseldorf 1998

- [Ber98d] Bernard, T; Kuntze, H.-B.: "Erfahrungen bei der Realisierung eines fuzzy-basierten Leitkonzeptes für Raumklimaregelkreise", 8. Workshop "Fuzzy Control" des GMA-UA 1.4.2, Dortmund 1998
- [Ber98e] Bernard, T; Kuntze, H.-B.: "A New Fuzzy-based Supervisory Control Concept for the Demand-responsive Optimization of HVAC Control Systems", Proc. 37th IEEE Conference on Decision and Control CDC '98, Tampa/Florida 1998, S. 4258-4263
- [Ber99a] Bernard, T.; Kuntze, H.-B.; Nirschl, G.: "Fuzzy-basierte Raumklimaregelung", Heizung, Lüftung/Klima, Haustechnik (HLH) 50 (1999) 1, S. 38-45
- [Ber99b] Bernard, T; Kuntze, H.-B.: "Multi-objective Optimization of Building Climate Control Systems Using Fuzzy-Logic", Proc. European Control Conference ECC'99, F0851, Karlsruhe 1999
- [Bet96] Bettenhausen, K.D.: "Automatische Struktursuche für Regler und Strecke. Beiträge zur datengetriebenen Analyse und optimierenden Führung komplexer Prozesse mit Hilfe evolutionärer Methoden und lernfähiger Fuzzy-Systeme", Fortschritt-Berichte VDI Reihe 8 Nr. 574, VDI Verlag, Düsseldorf 1996
- [Bet97] Bettenhausen, K.D.; Gehlen, S.; Marenbach, D.: "Intelligente leittechnische Konzepte für die Bioverfahrenstechnik: Einsatz und Perspektiven an der TH Darmstadt", Automatisierungstechnik (at) 45 (1997) 5, S. 199-208
- [Bisch88] Bischoff, M.: "Rechenmodell zur Untersuchung verschiedener Heizsysteme hinsichtlich Strahlungsklima und thermischer Behaglichkeit", Dissertation Technische Universität Braunschweig, 1988
- [Bock87] Bocklisch, S.: "Prozeßanalyse mit unscharfen Verfahren", Verlag Technik, Berlin 1987
- [Böhm95] Böhm, R.: "Fuzzy-Regelungen: Entwurf auf der Basis von Relationen und Stabilitätsanalyse", Fortschritt-Berichte VDI Reihe 8 Nr. 501, VDI Verlag, Düsseldorf 1995
- [Bonf92] Bonfig, K.-W.: Feldbus-Systeme, Expert Verlag 1992
- [Bonn96] Bonn, G.; Chaves, F.: "Telematikanwendungen für das Soziale Umfeld", Mitteilungen aus dem Fraunhofer-Institut IITB, Karlsruhe 1996, S. 11-22
- [Bor92] Borst, W.: "Der Feldbus in der Maschinen- und Anlagentechnik", Franzis Verlag 1992
- [Bött94] Böttcher, J.: "Bussysteme in der Automatisierungstechnik", Hrsg. G. Schnell, Vieweg Verlag 1994
- [Brac97] Brackmann, L.; Varchimin, J.-U.; Heimer, Th.; Mayer, E.; Schrimpf, F.; Doberer, U.; de Boer, J.: "Intelligente Haustechnik", Spektrum der Wissenschaft, November 1997, S. 102-116
- [Bren93] Brendel, T.: "Dornier-Versuchshaus Bermatingen. Meßdatenauswertung und -analyse zur bedarfsgeregelten Wohnungslüftung im Versuchshaus Bermatingen", BMFT-Forschungsprogramm "Lüftung im Wohnungsbau", Ing.-Büro Dr. Brendel, Frankfurt 1993
- [Bret92] Bretthauer, G.; Straube, B.: "Einsatzmöglichkeiten für Fuzzy-Regler", Studie SMWK 4-7541.82-EPS/1, Fraunhofer-Institut IITB-EPS, Dresden 1992, S. 1-208
- [Bret94] Bretthauer, G.; Mikut, R.; Opitz, H.-P.: "Stabilität von Fuzzy-Regelungen – eine Übersicht". GMA-Aussprachetag Fuzzy Control, Langen 22./23. März 1994, VDI-Berichte 1113, VDI-Verlag, Düsseldorf 1994, S. 287-297

- 
- [Con94] MacConell, P.F.; Owens, D.H.: "'Intelligent' Fuzzy Regulation of Residential Buildings", Proc. 3rd IEEE Conference on Control Applications, Glasgow/UK 1994, S. 1629-1634
- [Dav94] Davis, L.I.; Sieja, T.F.; Matteson, R.W.; Dage, G.A.; Ames, R.: "Fuzzy Logic for Vehicle Climate Control", Proc. 3rd IEEE Conference on Fuzzy Systems, Orlando/USA 1994, S. 530-534
- [DFG93] Deutsche Forschungsgemeinschaft: "MAK- und BAT-Werte-Liste", Mitteilung 29 der Senatskommission zur Prüfung Gesundheitsschädlicher Arbeitsstoffe vom 1.9.1993, VCH Verlagsgesellschaft, Weinheim 1993
- [Die97] Dietrich, D. (Hrsg.): "LON-Technologie: verteilte Systeme in der Anwendung", Hüthig Verlag, Heidelberg 1997
- [DIN1946] DIN 1946, Teil 2: "Raumluftechnik, Gesundheitstechnische Anforderungen (VDI-Lüftungsregeln)", Beuth Verlag, Berlin 1994
- [Dub84] Dubois, D.; Prade, H.: "Criteria Aggregation and Ranking of Alternatives in the Framework of Fuzzy Set Theory", Studies in the Management Sciences 20 (1984), S. 209-240
- [Ehm95] Ehm, H.: "Wärmeschutzverordnung '95", Bauverlag, Wiesbaden und Berlin 1995
- [EHS99] European Home Systems Association (EHSA) im Internet: <http://www.ehsa.com>
- [EIB99] European Installation Bus Association sc (EIBA) im Internet: <http://www.eiba.com>
- [Erh86] Erhorn, Hans; Gertis, Karl: "Mindestwärmeschutz oder/und Mindestluftwechsel?", Gesundheits-Ingenieur – gi, 107 (1986) 1, S. 12 -14, 71-76
- [Erh94] Erhorn H.; Reiß, J. (Hrsg): "Niedrigenergiehäuser. Zielsetzung, Konzepte, Entwicklung, Realisierung, Erkenntnisse", Fraunhofer-Institut für Bauphysik (IBP), Stuttgart 1994
- [Erh97] Erhorn H.; Reiß, J.: "Mehrfamilien-Niedrigenergiehaus Mannheim. Energetische Bewertung des Gebäudes und der Wohnungslüftungssysteme", IBP-Bericht WB 96/1997, Fraunhofer-Institut für Bauphysik (IBP), Stuttgart 1997
- [ESS95] ESSO Energieprognose 1995, ESSO AG, Hamburg
- [Fan70] Fanger, P.O.: "Thermal Comfort: Analysis and Applications in Environmental Engineering", Danish Technical Press, Copenhagen 1970
- [Fan88] Fanger, P.O.: "Olf und decipol – Die neuen Maßeinheiten für empfundene Luftverschmutzung", gi-Gesundheits-Ingenieur - Haustechnik - Bauphysik - Umwelttechnik 109 (1988), 5, S. 216-219
- [Fat94] Fatikow, S.; Wöhlke, G.: "Neuro- und Fuzzy-Steuerungsansätze in Robotik und Automation", Vorlesungsskript Universität Karlsruhe, 1994
- [Fed95] Feddern, J; Gebhardt, J.: "Weder zu kalt noch zu feucht. Klimaregelung mit Fuzzy Logic", Elektronik 7/1995, S. 72-76
- [Fei94] Feist, W.: "Thermische Gebäudesimulation: Kritische Prüfung unterschiedlicher Modellansätze", C.F. Müller Verlag, Heidelberg 1994
- [Fisch99] Fischer, M.: "Fuzzy-modellbasierte Regelung nichtlinearer Prozesse", Fortschritt-Berichte VDI Reihe 8 Nr. 750, VDI Verlag, Düsseldorf 1999
- [Fit97] Fitzner, K.: "Notwendigkeit Raumluftechnischer Anlagen", Hygiene in der Raumluftechnik, VDI-Berichte 1318, VDI Verlag, Düsseldorf 1997
- [Föl88] Föllinger, O.: "Optimierung dynamischer Systeme", Oldenbourg-Verlag, München 1988
- [Föl93] Föllinger, O.: "Nichtlineare Regelungen", Oldenbourg-Verlag, München 1993

- [Föll94] Föllinger, O.: "Regelungstechnik: Einführung in die Methoden und ihre Anwendung", Hüthig-Verlag, Heidelberg 1994
- [For93] Bayerisches Forschungszentrum für wissensbasierte Systeme (FORWISS): "Fuzzy-Technik in Theorie und Praxis. Applikationen am FORWISS", Erlangen, München, Passau 1993
- [Fra75] Frank, W.: "Raumklima und Thermische Behaglichkeit", Verlag Wilhelm Ernst&Sohn, Berlin 1975
- [Fuz96] Proc. 6. Workshop "Fuzzy Control" des GMA-UA 1.4.2, Dortmund 1996
- [Fuz97] Proc. 7. Workshop "Fuzzy Control" des GMA-UA 1.4.2, Dortmund 1997
- [Fuz98] Proc. 8. Workshop "Fuzzy Control" des GMA-UA 5.22, Dortmund 1998
- [Gar87] Garcia, C.E.; Prett, D.M.; Morari, M.: "Model Predictive Control: Theory and Practice – a Survey", Automatica, No. 25, 1987, S. 335-348
- [Gal91] Gal, T. (Hrsg.): "Grundlagen des Operations Research", Springer-Verlag, Berlin 1991
- [Geh93] Gehlen, S.: "Untersuchungen zur wissensbasierten und lernenden Prozeßführung in der Biotechnologie", Fortschritt-Berichte VDI Reihe 20 Nr. 87, VDI Verlag, Düsseldorf 1993
- [Gert97] Gertis, K.; Erhorn, H.; Reiß, J.: "Klimawirkungen und Schimmelpilzbildung bei sanierten Gebäuden", Proceedings Bauphysik-Kongreß, Berlin 1997, S. 241-253
- [Glat98] Glatzer, W. et al.: "Revolution in der Haushaltstechnologie: Die Entstehung des Intelligent Home", Campus Verlag, Frankfurt 1998
- [Glü97] Glück, B.: "Wärmetechnisches Raummodell: gekoppelte Berechnungen und wärmephysiologische Untersuchungen", C.F. Müller Verlag, Heidelberg 1997
- [Glü98] Glück, B.: "Vergleichsprozesse der Klimatechnik", C.F. Müller Verlag, Heidelberg 1998
- [Göl78] Göldner, K.; Kubik, S.: "Nichtlineare Systeme der Regelungstechnik", Verlag Technik, Berlin 1978
- [Hand94] Handke, J.; Handschin, E.; Linke, K.; Sanders, H.-H.: "Koordination der lang- und mittelfristigen Kraftwerkseinsatzplanung mit der Fuzzy-Logik", Elektrizitätswirtschaft 93 (1994) 5, S. 204-210
- [Hanel94] Hanel, B.: "Raumluftrömung", C.F. Müller Verlag, Heidelberg 1994
- [Hans98] Hanss, M.: "Identifikation von Fuzzy-Modellen und ihre Anwendung zur Regelung nichtlinearer Prozesse", Dissertation Universität Stuttgart, 1998
- [Int99] Interbus Club im Internet: <http://www.interbusclub.com>
- [Jan94] Janczik, M.: "Fuzzy-Logik in der Heiztechnik", Wärmetechnik 2/94, S. 62-69; 3/94, S. 171-178
- [Jini99] Informationen zur Jini-Technologie im Internet unter: <http://www.sun.com/jini>; <http://www.jini.org>
- [Kac97] Kacprzyk, J.: "Multistage Fuzzy Control", Wiley, Chichester 1997
- [Kie93] Kiendl, H.; Fritsch, M.; Frenck, C.; Meyer-Gramann, K.D.; Cuno, B.; Opitz, H.-P.; Klöden, W.; Böhlmann, S.; Seyfarth, R.; Linzenkirchner, E.; Bork, P.; Lieven, K.: "Fuzzy Control", Automatisierungstechnik (at) 41 (1993), Hefte 1-12, S. A1-A40
- [Kie97] Kiendl, H.: "Fuzzy Control methodenorientiert", Oldenbourg Verlag, München 1997

- [Kli99] Klingner, M.; Knabe, G.; Lauckner, G.; Werdin, H.; Billerbeck, G.: "Bedarfsgerechte Regelung des Raumlufzustandes in Wohngebäuden - Teil 1", Heizung, Lüftung/Klima, Haustechnik (HLH) 50 (1999), Nr. 1, S. 46-55
- [Kna92] Knabe, G.: "Gebäudeautomation", Verlag für Bauwesen, Berlin 1992
- [Kna97] Knabe, G.; Werdin, H.; Klingner, M.; Lauckner, G.; Billerbeck, G.; Kunze, J.: "Demand Guided Control of the Indoor Air Quality in Domestic Buildings", CLIMA 2000 '97 Conference Brussels, Brüssel 1997, P 216
- [Koc96] Koch, M.; Kuhn, T.; Wernstedt, J.: "Fuzzy Control. Optimale Nachbildung und Entwurf optimaler Entscheidungen", Oldenbourg Verlag, München 1996
- [Koh94] Kohno, S., Kikuchi, Y.: "Fuzzy-controlled tunnel ventilation system", Proc. 11th Symposium on Automation and Robotics in Construction (ISARC), Brighton/U.K. 1994, S. 433-439
- [Kro97] Kroll, A.: "Fuzzy-Systeme zur Modellierung und Regelung komplexer technischer Systeme", Fortschritt-Berichte VDI Reihe 8 Nr. 612, VDI Verlag, Düsseldorf 1997
- [Lan94] Lang, J.: "Energieautarkes Solarhaus", BINE Informationsdienst, Fachinformationszentrum Karlsruhe, 1994
- [LON99a] LON-Nutzer-Organisation (LNO) im Internet: <http://www.echolon.com>
- [LON99b] "Neues Wohnen mit LON", Kongreß der LON-Nutzer-Organisation (LNO) am 15.10.1999 in München
- [Lut95] Lute, P.; van Paassen, D.: "Optimal Indoor Temperature Control Using a Predictor", IEEE Control Systems, August 1995, S. 4-10
- [Mad96] Madjid, M.: "Beitrag zur modellbasierten Überwachung und Optimierung des Betriebs heiz- und raumluftechnischer Anlagen", Dissertation Universität Stuttgart, 1996
- [Math99] The MathWorks Inc. im Internet: <http://www.mathworks.com>
- [May88] Mayer, E.: "Einrichtung zur Beurteilung des Raumklimas", Deutsches Patent Nr. 3205704 (1988)
- [May89] Mayer, E.: "Physik der thermischen Behaglichkeit", Physik in unserer Zeit, 20 (1989), Nr. 4, S. 97-103
- [Mei94] Meier, S.: "Bedarfslüftung – ein großes Energie-Sparpotential liegt brach", Heizung, Lüftung/Klima, Haustechnik (HLH) 45 (1994), Nr. 9, S. 459-465
- [Mik98] Mikut, R.; Hendrich, F.: "Produktionsreihenfolgeplanung in Ringwalzwerken mit wissensbasierten und evolutionären Methoden", Automatisierungstechnik (at) 46 (1998) 1, S. 15-21
- [Mik99] Mikut, R.; Böhlmann, S.; Cuno, B.; Jäkel, J.; Kroll, A.; Rauschenberg, B.-M.; Slawinski, T.: "Fuzzy-Logik und Fuzzy Control – Begriffe und Definitionen", Proc. 9. Workshop "Fuzzy Control" des GMA-UA 5.22, Dortmund 1999 (Beitrag zur geplanten Richtlinie "Computational Intelligence" der VDI/VDE-GMA)
- [Mül99] Müller, D.: "Intelligente Verzahnung der Energieerzeuger", Informationsveranstaltung der LON-Nutzerorganisation LNO, Frankfurt/M 1992.
- [Neu98] Neumann, U.: "Integrierte Instandhaltungsplanung für elektrische Energieübertragungssysteme", Fortschritt-Berichte VDI Reihe 21 Nr. 249, VDI Verlag, Düsseldorf 1998
- [Now96] Nowotny, S.: "Lüftungs- und klimatechnische Gebäudeausrüstung: Grundlagen und Berechnungsmodelle", Bauverlag Wiesbaden, Berlin 1996

- [NRW99] Projekt "inHaus-NRW", Koordination: Fraunhofer-Institut für Mikrosystemtechnik, Duisburg; Informationen im Internet: <http://www.inhaus-nrw.de>
- [Opitz93] Opitz, H.-P. "Fuzzy Control. Teil 6: Stabilität von Fuzzy-Regelungen", Automatisierungstechnik (at) 41 (1993), S. A21-A24
- [Pam98] Pammer, H.; Felix, R.; Kühlen, J.: "Reihenfolgeplanung in der Automobilmontage mit FuzzyDecisionDesk", Proc. Anwendersymposium der Fuzzy-Neuro-Initiative NRW, Düsseldorf 1998, S. 39-43
- [Pap96] Papageorgiou, M.: "Optimierung: statische, dynamische, stochastische Verfahren für die Anwendung", Oldenbourg Verlag, München 1996
- [Pet58] Pettenkofer, M.v.: "Über den Luftwechsel in Wohngebäuden", Literarisch-Artistische Anstalt der J.G. Cotta'schen Buchhandlung, München 1858
- [Pfa95] Pfannstiel, D.: "Einsatz adaptiver und fuzzy-basierter Regelungsstrategien in der Heizungstechnik", Automatisierungstechnische Praxis (atp) 39 (1997) 8, S. 18-28
- [Pfa97] Pfannstiel, D.: "Homeautomation: Zukünftiger Markt im Hausbereich?", Automatisierungstechnische Praxis (atp) 37 (1995) 1, S. 42-49
- [Pro65] Profos, P.; Hemmi, P.: "Untersuchungen zur Dynamik der Klimaregelung", Neue Technik, 7A, 1965, S. 49-86
- [Reck95] Recknagel, Sprenger, Schramek: "Taschenbuch für Heizung und Klimatechnik", 67. Auflage, Oldenbourg Verlag, München 1995
- [ReWo97] Informationsschrift der Fraunhofer-Gesellschaft zum Projekt "Integrierte Haussysteme für ressourcenschonendes Wohnen (IHS-ReWo)", 1997
- [Rom93] Rommelfanger, H.: "Fuzzy-Logik basierte Verarbeitung von Expertenregeln", OR-Spektrum 15 (1993), S. 31-42
- [Rom94] Rommelfanger, H.: "Fuzzy Decision Support Systeme", Springer-Verlag, Heidelberg 1994
- [Ros96] Rosenheimer Haus im Internet: <http://www.fh-rosenheim.de/extern/rohaus>
- [Saar99] Stadtwerke Saarbrücken AG, Projekt "SESAM PLUS (System für Energie-Spar-Managemenet)", Saarbrücken 1999
- [Saj97] Sajidman, M.; Kuntze, H.-B.: "Integration of Fuzzy Control and Model Based Concepts for Disturbed Industrial Plants with Large Dead-Times", Proc. 6th IEEE Int. Conf. on Fuzzy Systems (FUZZ IEEE'97), Barcelona 1997
- [Sak93] Sakawa, M.: "Fuzzy Sets and interactive multiobjective optimization", Plenum Press, New York 1993
- [San96] Santa, K.: "Fuzzy-basierte Sollwertvorgabe für die Raumklimaregelung", Technik am Bau (TAB), Sondernummer MSR Technik, Oktober 1996, S. 31-38
- [Schw81] Schwohl, T.: "Raumklima und Behaglichkeit. Zum Problem der Raumklimamessung unter besonderer Berücksichtigung der selektiven Bestimmung der Raumschließungsflächentemperatur", Dissertation Medizinische Hochschule Lübeck, 1981
- [Soe90] Soeterboek, R.: "Predictive Control: A Unified Approach", Dissertation Techn. Univ. Delft, 1990
- [Sie99] Verkabelungssystem "HomeWay" der Fa. Siemens, vorgestellt von Dr. Lothar Stoll auf der Fachtagung der Landesinnungsverbände Sachsen, Sachsen-Anhalt und Thüringen am 17.06.1999 in Leipzig
- [Smi59] Smith, O. J.: "A Controller to Overcome Deadtime", ISA Journal, 6 (1959) 2, pp. 28-33

- 
- [Stö94] Stöcker, H. (Hrsg.): "Taschenbuch der Physik: Formeln, Tabellen, Übersichten", Verlag Harri Deutsch, Frankfurt/M. 1994
- [Stri95] Striebel, D.: "Regelung und Steuerung heiztechnischer Anlagen", Automatisierungstechnische Praxis (atp) 37 (1995) 1, S. 11-19
- [Tak85] Takagi, T.; Sugeno, M.: "Fuzzy Identification of Systems and Its Application to Modeling and Control", IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, 15 (1985), 1
- [UBA96] Umweltforum BAU e.V.: "Niedrigenergiehäuser: Luftqualität, Lüftungstechnik, Luftdichte Konstruktion", Fachtagung am 28.02.1996 in Karlsruhe
- [VDI98] VDI/VDE GMA-Kongreß "Computational Intelligence. Neuronale Netze, Evolutionäre Algorithmen, Fuzzy Control im industriellen Einsatz", Berlin 1998. VDI-Berichte 1381, VDI Verlag, Düsseldorf 1998
- [VDI99b] "In Deutschland schimmelt es", VDI nachrichten vom 19.3.99
- [VDMA97] VDMA-Einheitsblatt 24773: "Bedarfsgeregelte Lüftung. Begriffe, Anforderungen, Regelstrategien", Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau e.V. (VDMA), Beuth-Verlag, Berlin 1997
- [VIMP98] "Verteilte intelligente Mikrosysteme für den privaten Lebensbereich (VIMP)"; Verbundprojekt des BMBF-Förderschwerpunkts Mikrosystemtechnik (12/1995 - 11/1998)
- [Vol94] Volger, K.: "Haustechnik: Grundlagen, Planung, Ausführung", Teubner Verlag, Stuttgart 1994
- [Wer95] Werdin, H.: "Entwicklung eines vereinfachten regelungstechnischen Modells der versorgungstechnischen Anlage von Niedrigenergiehäusern", Diplomarbeit, Technische Universität Dresden 1995
- [Yag78] Yager, R.R.: "Fuzzy Decision-Making Including Unequal Objectives", Fuzzy Sets and Systems 1 (1978), S. 85-95
- [Yag80] Yager, R.R.: "On a General Class of Fuzzy Connectives", Fuzzy Sets and Systems 3 (1980), S. 235-242
- [Zad65] Zadeh, L.A.: "Fuzzy Sets", Information and Control, 1965, S. 338-353
- [Zad75] Zadeh, L.A.; Fu, K.S.; Tanaka, K.; Shimura, M. (Hrsg.): "Fuzzy Sets and their Application to Cognitive and Decision Processes", Academic Press, New York 1975
- [Zad78] Zadeh, L.A.: "PRUF – A Meaning Representation Language for Natural Languages", International Journal Man-Machine Studies 10 (1978), S. 395-460
- [Zim87] Zimmermann, H.-J.: "Fuzzy Sets, Decision Making, and Expert Systems", Kluwer Academic Publishers, Boston 1987
- [Zim91] Zimmermann, H.-J.: "Fuzzy Set Theory - and Its Applications", Kluwer Academic Publishers, Boston 1991
- [Zim94] Zimmermann, H.-J.: "Fuzzy Logic. Band 2 - Anwendungen", Oldenbourg Verlag, München 1994



## Anhang A Systemverhalten

Gegenstand dieses Abschnittes ist es, die Übereinstimmung einiger der in Abschnitt 2.3 eingeführten Modellgleichungen mit Meßergebnissen zu diskutieren. Dazu werden das unregelmäßige Systemverhalten der Heizungs- und Lüftungsvorgänge sowie einfache Regelungsversuche untersucht. Die Meßergebnisse wurden, soweit nicht anders angegeben, in Raum 1 des Test- und Demozentrums für Integrierte Haussysteme im IITB erhoben.

### A.1 Lüftung

Im folgenden wird der Einfluß der Luftwechselrate auf die Zustandsgrößen  $\text{CO}_2$ -Gehalt, Mischgas, relative Feuchte sowie die Heizleistung dargestellt. Weiter wird ein Verfahren zur Identifikation der Luftwechselrate vorgestellt.

#### A.1.1 Systemverhalten $\text{CO}_2$ -Gehalt

In Abb. A.1-1 sind der Zeitverlauf des  $\text{CO}_2$ -Gehaltes innen und außen ( $\text{CO}_{2,i}$ ,  $\text{CO}_{2,a} = 300 \text{ ppm}$ ), der natürliche Logarithmus der Differenz ( $\text{CO}_{2,i} - \text{CO}_{2,a}$ ) und die Ventilator Drehzahl aufgetragen. Mit Beginn des Zeitverlaufs wird durch eine  $\text{CO}_2$ -Sprühflasche eine kurze, starke  $\text{CO}_2$ -Störung in den Raum eingebracht. Dadurch steigt  $\text{CO}_{2,i}$  innerhalb weniger Minuten auf ca. 1700 ppm an. Bei Erreichen des Maximalwertes wird der Ventilator mit 20 % des maximalen Volumenstroms  $\dot{V}_{\text{max}} = 700 \text{ m}^3/\text{h}$ , d.h.  $\dot{V} = 140 \text{ m}^3/\text{h}$  eingeschaltet. Nach der Modellgleichung

$$\dot{\text{CO}}_{2,i} = -\text{LWR}(\text{CO}_{2,i} - \text{CO}_{2,a}) + \dot{\text{CO}}_{2,\text{stör}} \quad (2.3-23)$$

folgt für  $\dot{\text{CO}}_{2,\text{stör}} = 0$ ,  $\text{CO}_{2,a} = \text{const.}$  und Luftwechselrate  $\text{LWR} = \text{const.}$ :

$$\text{CO}_{2,i} - \text{CO}_{2,a} = \text{CO}_{2,i}(0) \cdot e^{-\text{LWR} \cdot t} \quad (\text{A.1-1})$$

$$\Rightarrow \ln(\text{CO}_{2,i} - \text{CO}_{2,a}) = \ln(\text{CO}_{2,i}(0)) - \text{LWR} \cdot t \quad (\text{A.1-2})$$

Das Exponentialgesetz (A.1-1) wird durch die Gerade in Abb. A.1-1, 2. Zeile, annähernd bestätigt. Aus der Steigung der Gerade läßt sich LWR berechnen. Für das hier dargestellte Beispiel ergibt sich  $\text{LWR} \approx 2.2/\text{h}$ .

Nach der Definition der Luftwechselrate,

$$\text{LWR} = \dot{V} / V_{\text{Raum}} \quad (2.3-4)$$

ergibt sich unter der Annahme des freien Raumvolumens  $V_{\text{Raum}} = 50 \text{ m}^3$   $\text{LWR} = 140 \text{ m}^3/\text{h}/50 \text{ m}^3 = 2.8/\text{h}$ . Dieser theoretische Wert weicht also um über 20 % vom experimentell ermittelten Wert ab.

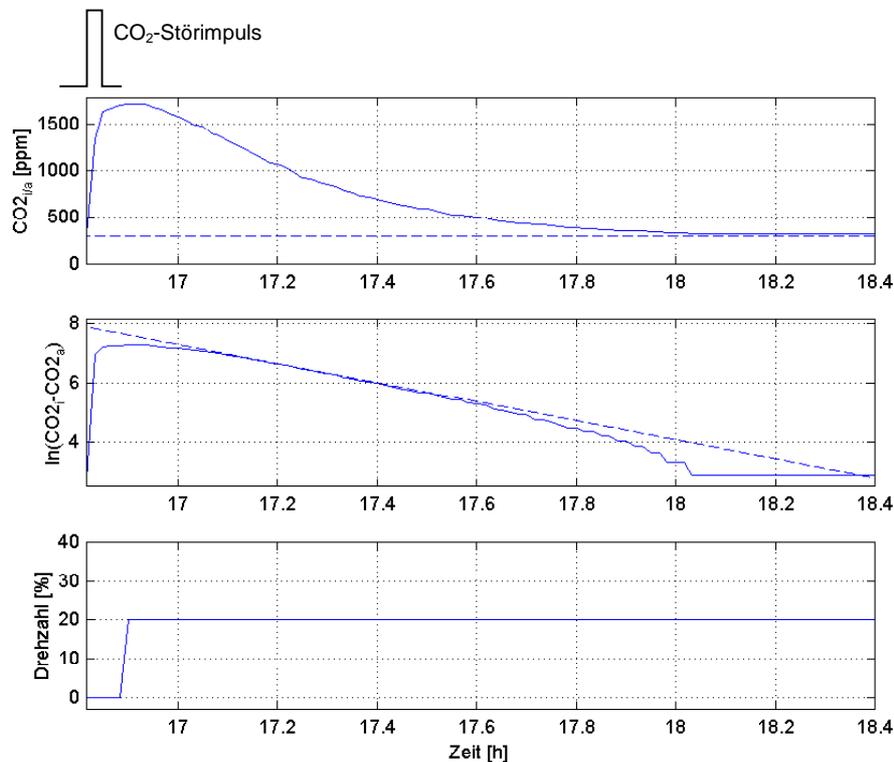


Abb. A.1-1: Zeitverlauf des CO<sub>2</sub>-Gehaltes bei konstanter Ventilator Drehzahl

### A.1.2 Identifikation der Luftwechselrate

Wird das in Unterabschnitt A.1.1 beschriebene Verfahren bei unterschiedlichen Ventilator Drehzahlen durchgeführt, so läßt sich experimentell LWR als Funktion der Drehzahl bestimmen. Das Ergebnis einer großen Anzahl von Messungen ist in Abb. A.1-2 dargestellt. Als maximale Drehzahl wurde aus Gründen der Lärmbelastigung bei sehr hohen Drehzahlen 60 % gewählt.

Die Meßwerte, die durch Kreise gekennzeichnet sind, weisen eine relativ große Streuung auf. Die wesentliche Ursache dafür ist darin zu sehen, daß der tatsächliche Volumenstrom von einigen nicht konstanten Randbedingungen wie Druckdifferenz und Temperaturprofil der Raumluft abhängt.

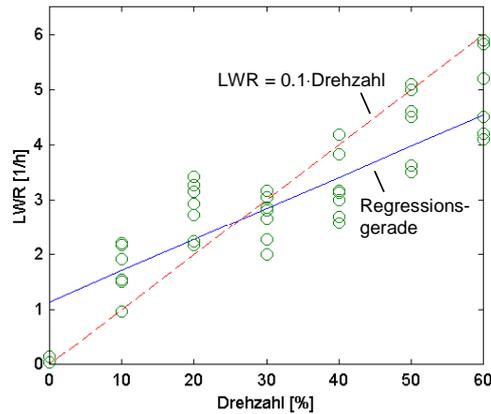


Abb. A.1-2: Zur Zuordnung der Luftwechselrate in Abhängigkeit der Ventilator-drehzahl.  
Kreise: Meßwerte

Die durchgezogene Gerade in Abb. A.1-2 ist die Regressionsgerade. Da sich somit bei Drehzahl = 0 der nicht plausible Wert  $LWR \approx 1/h$  ergibt, wurde folgende lineare Kennlinie gewählt (gestrichelte Linie):

$$LWR [1/h] = 0.1 \cdot \text{Drehzahl} [\%] \quad (\text{A.1-3})$$

### A.1.3 Systemverhalten Mischgas

Während für  $\text{CO}_2$  im Mischkammermodell die bilanzierende DGL (2.3-23) wie in Abschnitt 2.3 theoretisch hergeleitet werden kann, ist es zunächst offen, ob für das Signal des Mischgassensors ein ähnliches Gesetz gilt, da der Mischgassensor die Konzentration aller oxidierbaren Stoffe mißt und diese jedoch unterschiedlich gewichtet ([Mei94], vgl. Abb. 2.4-3).

$$M\dot{G}_i = -LWR(MG_i - MG_a) + M\dot{G}_{\text{stör}} \quad (\text{A.1-4})$$

Um diese Frage zu untersuchen, wurde ein zum  $\text{CO}_2$ -Störversuch aus Unterabschnitt A.1.1 analoges Experiment durchgeführt, welches in Abb. A.1-3 dargestellt ist. Gegen 18:30 h wird eine Zigarette als starke Mischgas-Störquelle angezündet und etwa 10 Minuten später das Fenster geöffnet. Aus der logarithmischen Darstellung von  $(MG_i - MG_a)$  und dem Vergleich mit der Regressionsgerade ist abzulesen, daß näherungsweise ein Exponentialgesetz vorliegt und somit Gleichung (A.1-4) zumindest für  $M\dot{G}_{\text{stör}} = 0$  zutrifft. Aus der Steigung der Gerade ergibt sich  $LWR \approx 2.2/h$ .

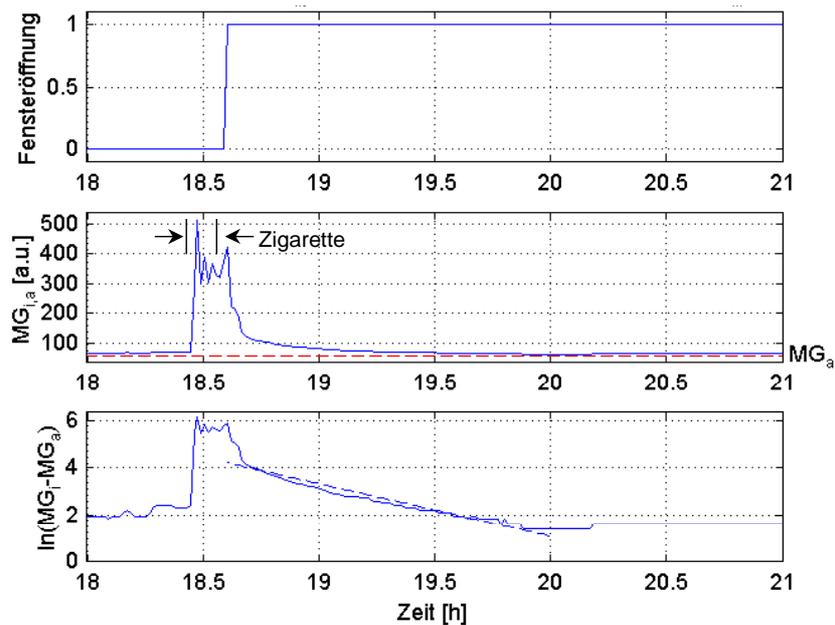


Abb. A.1-3: Zeitverlauf des Mischgassignals bei einer Störung durch eine Zigarette und Lüftung mit Fensteröffnung

#### A.1.4 Einfluß der Luftwechselrate auf relative Feuchte und Heizleistung

In Abb. A.1-4 sind die Zeitverläufe der Heizleistung  $\dot{Q}_{\text{Heiz}}$ , Ist- und Sollwert der Innentemperatur ( $T_{i,\text{ist}}$ ,  $T_{i,\text{soll}}$ ) die relative Feuchte innen und außen ( $\varphi_i$ ,  $\varphi_a$ ) und die durch einen Ventilator eingestellte Luftwechselrate LWR dargestellt. Es soll der Einfluß von LWR auf  $\varphi_i$  und  $\dot{Q}_{\text{Heiz}}$  untersucht werden.

##### Einfluß der Luftwechselrate auf die Heizleistung

Es wird ab 8:00 h  $T_{i,\text{ist}}$  auf den konstanten Sollwert  $T_{i,\text{soll}} = 23 \text{ °C}$  geregelt und LWR im Abstand von drei Stunden um jeweils 2/h erhöht und um 24:00 h wieder gleich Null gesetzt.

Aus Abb. A.1-4 ist eine Korrelation von  $\dot{Q}_{\text{Heiz}}$  mit LWR abzulesen, da  $\dot{Q}_{\text{Heiz}}$  nach der Erhöhung von LWR jeweils etwas ansteigt, allerdings ist der Effekt kleiner als nach Gleichung (2.3-14)

$$\dot{Q}_{\text{Lüft}} = \rho_L c_L V_{\text{Raum}} \text{LWR} (T_i - T_a) \quad (2.3-14)$$

zu erwarten ist. Für  $\rho_L c_L V_{\text{Raum}} = 20 \text{ Wh/K}$ ,  $\text{LWR} = 1/\text{h}$  und  $(T_i - T_a) = 20 \text{ K}$  ergibt sich nach Gleichung (2.3-14)  $\dot{Q}_{\text{Lüft}} = 400 \text{ W}$ . Folglich müßte für  $\text{LWR} = 6/\text{h}$  (ab 18:00 h)  $\dot{Q}_{\text{Heiz}}$  eigentlich um  $6 \cdot 400 = 2400 \text{ W}$  größer sein als für  $\text{LWR} = 0$  (bis 12:00 h). Der Grund für diese Abweichung ist hauptsächlich darin zu sehen, daß durch die Undichtigkeit des Raumes nicht

nur kalte Außenluft, sondern auch wärmere Luft aus den Nachbarräumen angesaugt und so die Wärmebilanz verfälscht wurde.

Um den Einfluß der Lüftung auf die relative Feuchte  $\varphi_i$  zu untersuchen, wurde ab 9:00 h eine Wasserdampf-Störquelle mit konstanter Produktionsrate von ca. 0.15 Liter pro Stunde eingeschaltet. Dies entspricht bei einem Raumvolumen von  $50 \text{ m}^3$  einer Wasserdampf-Störrate  $\dot{x}_{\text{stör}} = 150\text{g}/60\text{kg}/\text{h} \approx 2.5\text{g}/\text{kg}/\text{h}$ . Nach Gleichung (2.3-28) wird die Dynamik von  $\varphi_i$  bei konstanter Innentemperatur  $T_i$  im Mischkammermodell über die Differentialgleichung

$$\dot{\varphi}_i = -\text{LWR}(\varphi_i - \tilde{\varphi}_a) + \frac{\dot{x}_{\text{stör}}}{x_{\text{max}}(T_i)} \quad (\text{A.1-5})$$

beschrieben. Der nicht ganz lineare Anstieg von  $\varphi_i$  nach Einschalten der Störquelle um 9:00 h läßt auf einen geringen Luftaustausch auch bei ausgeschaltetem Ventilator schließen.

### Zeitkonstante des exponentiellen Abfalls

Ab 12:00 h wird der Ventilator mit  $\text{LWR} = 2/\text{h}$  aktiviert. Der Zeitverlauf von  $\varphi_i$  zeigt einen exponentiellen Abfall auf etwa  $\varphi_i = 70 \%$  mit einer Zeitkonstante von etwa 0.5 h. Somit wird die Modellgleichung (A.1-5) bestätigt, denn danach berechnet sich die Zeitkonstante zu  $1/\text{LWR} = 1/(2 \cdot 1/\text{h}) = 0.5 \text{ h}$ .

### stationärer Fall

Nach Gleichung (A.1-5) gilt im stationären Fall ( $\dot{\varphi}_i = 0$  und  $\dot{T}_i = 0$ )

$$\varphi_i = \tilde{\varphi}_a + \frac{\dot{x}_{\text{stör}}}{x_{\text{max}}(T_i)} / \text{LWR}. \quad (\text{A.1-6})$$

Für  $\varphi_a = 70 \%$ ,  $T_i = 23 \text{ }^\circ\text{C}$  und  $T_a = 5 \text{ }^\circ\text{C}$  gilt  $\tilde{\varphi}_a = \varphi_a \frac{x_{\text{max}}(T_a)}{x_{\text{max}}(T_i)} \approx 30\%$  und  $x_{\text{max}}(T_i) = 0.018 \text{ g}/\text{kg}$ .

Die sich daraus ergebenden Werte  $\varphi_{i,\text{theo}}$  im stationären Fall sind in Tabelle A.1-1 den tatsächlichen, gemessenen Werten  $\varphi_{i,\text{exp}}$  gegenübergestellt.

LWR [1/h]	$\varphi_{i,theo}$ [%]	$\varphi_{i,exp}$ [%]
2	70	70
4	35	65
6	23	57

Tabelle A.1-1: Theoretische und experimentell bestimmte Werte der relativen Feuchte  $\varphi_{i,theo}$  und  $\varphi_{i,exp}$  im stationären Fall in Abhängigkeit der Luftwechselrate ( $\varphi_a = 70\%$ ,  $T_i = 23\text{ °C}$ ,  $T_a = 5\text{ °C}$ )

Die ersichtliche große Abweichung ist hauptsächlich auf die weiter oben beschriebene Tatsache zurückzuführen, daß nicht nur Außenluft, sondern auch wärmere Luft aus den Nachbarräumen angesaugt wird, so daß sich ein größerer Wert von  $\varphi_a$  ergibt. Ein weiteres Problem liegt in dem Feuchte-Sensor, für den aufgrund einer manuellen Eichung keine genauen Angaben über die Fehlerschranken im gesamten Meßbereich vorliegen. Die Ergebnisse aus Tabelle A.1-1 sind daher eher von qualitativer Bedeutung.

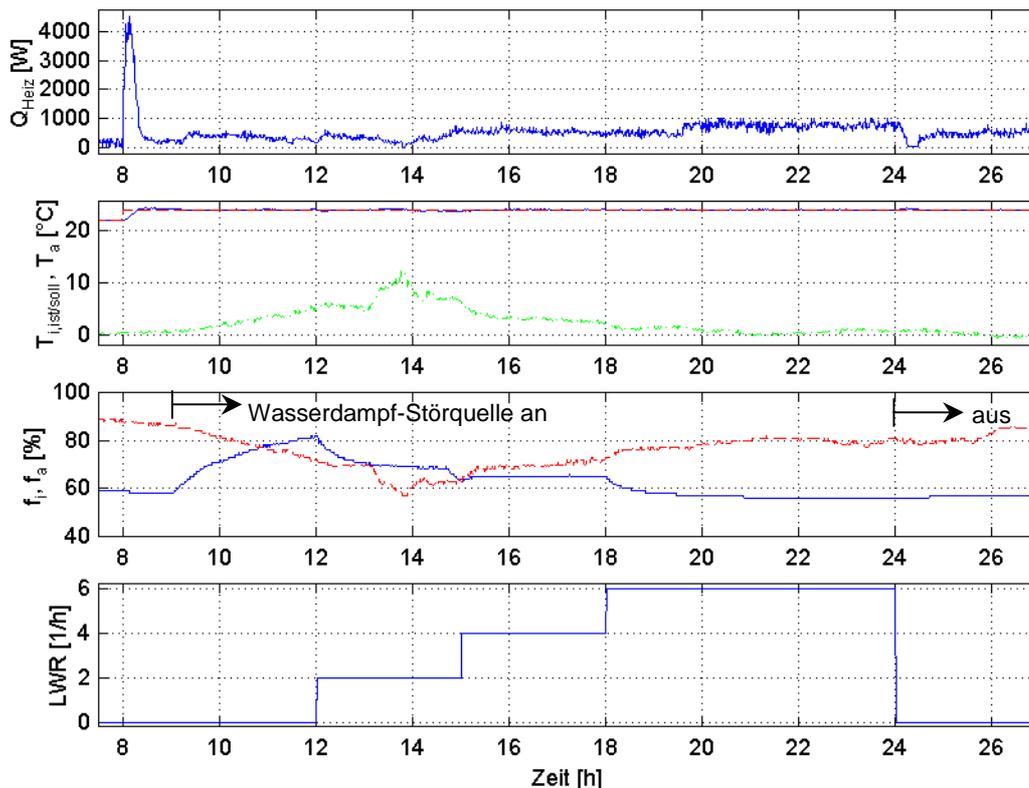


Abb. A.1-4: Zum Einfluß der Luftwechselrate auf die relative Feuchte und die Heizleistung

## A.2 Temperaturabhängigkeit der relativen Feuchte

Aus dem Zeitverlauf der Temperatur und Feuchte außen ( $T_a$ ,  $\varphi_a$ ) in Abb. A.1-4 ist die Temperaturabhängigkeit der relativen Feuchte zu erkennen.  $T_a$  und  $\varphi_a$  sind über die Gleichung

$$\varphi_a = x_a / x_{\max}(T_a) \quad (2.3-7)$$

miteinander verknüpft ( $x_a$ : absoluter Wassergehalt der Außenluft). Da  $x_{\max}$  mit  $T_a$  steigt, sinkt  $\varphi_a$ , wenn  $T_a$  steigt (unter der Voraussetzung, daß  $x_a$  konstant ist). Dieser Zusammenhang ist besonders gut während des starken Anstiegs von  $T_a$  zwischen 13:00 h und 14:00 h zu erkennen. Ein weiterer Zeitverlauf, der die Temperaturabhängigkeit der relativen Feuchte gut darstellt, ist in Abb. A.2-1 gezeigt.

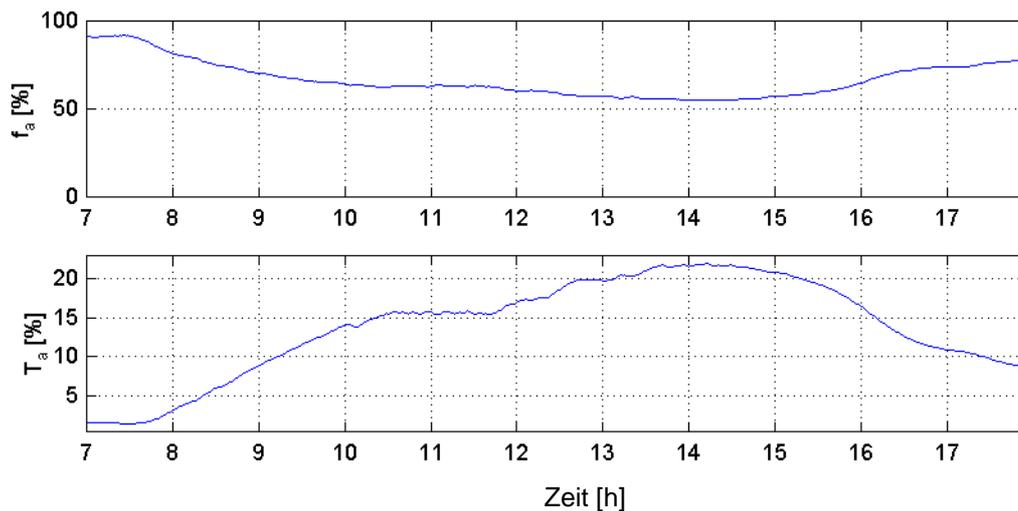


Abb. A.2-1: Tagesgang der Temperatur und relativen Feuchte außen (20.01.99)

## A.3 Heizvorgang

Im folgenden wird die Dynamik und das stationäre Verhalten des Heizvorgangs näher beleuchtet.

### A.3.1 Dynamik

Nachdem im vorangegangenen Abschnitt der Einfluß von LWR auf  $Q_{\text{Heiz}}$  diskutiert wurde, wird im folgenden die Dynamik eines typischen Heizvorgangs ohne Lüftung betrachtet. In

Abb. A.3-1 sind der Zeitverlauf des Ist- und Sollwertes der Innentemperatur ( $T_{i,ist}$ ,  $T_{i,soll}$ ) und die Heizleistung  $\dot{Q}_{Heiz}$  dargestellt.

Gegen 15:45 h wird  $T_{i,soll}$  auf 21 °C und gegen 17:00 h auf 23 °C eingestellt. Nach einer transienten Phase von etwa 30 Minuten, während der  $\dot{Q}_{Heiz}$  auf etwa 3000 W ansteigt, wird die stationäre Phase erreicht.  $\dot{Q}_{Heiz}$  beträgt in der stationären Phase mit  $T_{i,soll} = 21$  °C etwa 350 W, mit  $T_{i,soll} = 23$  °C etwa 800 W.

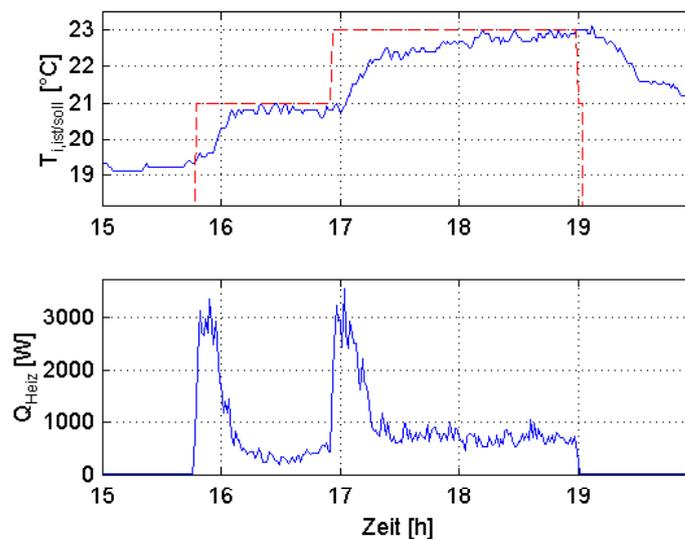


Abb. A.3-1: Dynamik des Heizvorganges

### A.3.2 Stationärer Fall: Transmissionsverluste

Ziel dieses Unterabschnittes ist es, den Wärmeübergangskoeffizienten  $k$  experimentell zu ermitteln.

Im stationären Fall ( $\dot{T}_i = 0$ ), für  $LWR = 0$  sowie der Vernachlässigung solarer Gewinne ( $\dot{Q}_{sol} = 0$ ) folgt aus der allgemeinen Wärmebilanzgleichung (2.3-8) der Zusammenhang

$$\dot{Q}_{Heiz} + \dot{Q}_{int} = \dot{Q}_{Trans}, \quad (\text{A.3-1})$$

wobei  $\dot{Q}_{int}$  interne Wärmequellen und  $\dot{Q}_{Trans}$  Transmissionswärmeverluste darstellen.  $\dot{Q}_{Trans}$  lässt sich abschätzen über

$$\dot{Q}_{Trans} = kA(T_i - T_a). \quad (\text{2.3-38})$$

Somit gilt für  $\dot{Q}_{Heiz}$  unter den genannten Voraussetzungen

$$\dot{Q}_{\text{Heiz}} = kA(T_i - T_a) - \dot{Q}_{\text{int}}. \quad (\text{A.3-2})$$

Um  $k$  experimentell zu ermitteln, sind in Abb. A.3-2 Werte von  $\dot{Q}_{\text{Heiz}}$ , die nach der im vorangegangenen Unterabschnitt beschriebenen Vorgehensweise bestimmt wurden, in Abhängigkeit von  $(T_i - T_a)$  aufgetragen. Da die internen Wärmequellen  $\dot{Q}_{\text{int}}$  jedoch stets unterschiedlich sind, läßt sich in Abb. A.3-2 nur schlecht eine Gerade anpassen, deren Steigung ( $kA$ ) ist. Aus der eingezeichneten Gerade ergibt sich  $kA = 30 \text{ W/K}$ . Da die Fläche der Außenwand etwa  $A = 12.5 \text{ m}^2$  beträgt, ergibt sich als  $k$ -Wert der Außenwand inklusive Fenster  $k = 2.4 \text{ W/m}^2/\text{K}$ . Dies stimmt zumindest in grober Näherung mit den tatsächlichem Wert  $k = 1.5 \text{ W/m}^2/\text{K}$  überein.

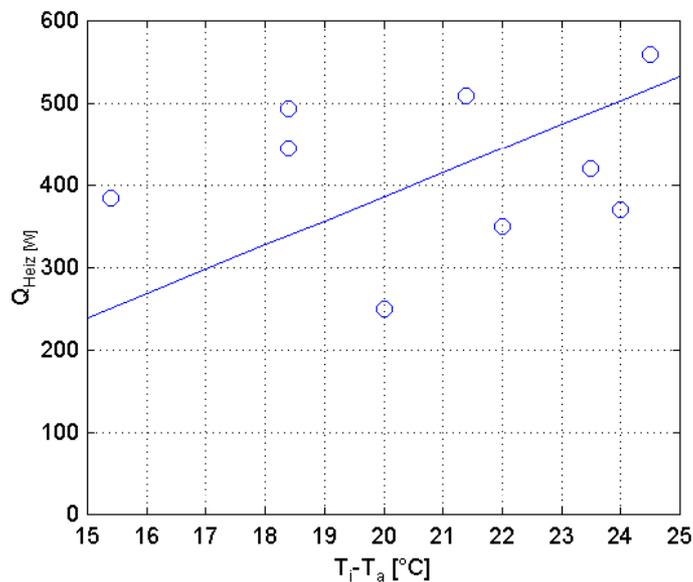


Abb. A.3-2: Heizleistung im stationären Fall in Abhängigkeit der Temperaturdifferenz zwischen Innen- und Außentemperatur

## A.4 Wandtemperatur

Zur Berechnung der Empfindungstemperatur  $T_{\text{op}}$  wird die Temperatur der Außenwand  $T_w$  benötigt. Da  $T_w$  i. a. nicht als Meßwert verfügbar ist, wurde in Abschnitt 2.3 ein einfaches statisches Modell für  $T_w$  entwickelt:

$$\hat{T}_w = T_i - \frac{k}{\alpha}(T_i - T_a) \quad (2.3-40)$$

( $\alpha \approx 5 \text{ W/m}^2/\text{K}$ ). Dieses Modell wird anhand von Abb. A.4-1 validiert. Die Wandtemperatur wurde dazu mittels eines an der Wand befestigten Temperatursensors gemessen. Dargestellt sind in Abb. A.4-1 der Verlauf der Innentemperatur  $T_i$ , der Außentemperatur  $T_a$ , der gemessenen Wandtemperatur  $T_w$  und des nach Gleichung (2.3-42) berechneten Schätzwertes  $\hat{T}_w$ . Es ist insgesamt eine gute Übereinstimmung der gemessenen und berechneten Wandtemperatur festzustellen. Allerdings besteht wegen der Wärmekapazität der Wand immer eine Phasenverschiebung zur Außentemperatur, so daß Gleichung (2.3-40) nur als grobe Näherung betrachtet werden kann.

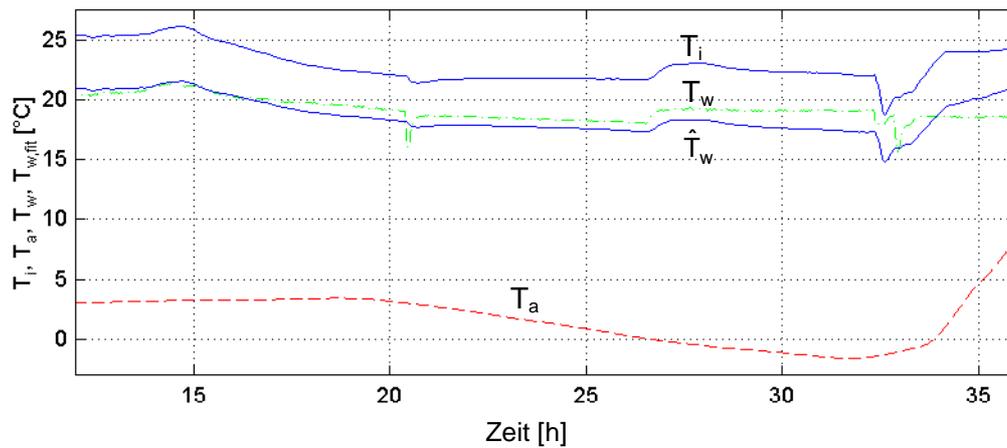


Abb. A.4-1: Zum Modell der Wandtemperatur ( $T_w$ : gemessene Wandtemperatur,  $\hat{T}_w$ : berechnete Wandtemperatur,  $T_i$ : Innentemperatur,  $T_a$ : Außentemperatur)

## Anhang B Simulationsmodell

Im folgenden wird das in Abschnitt 4.1 verwendete Simulationsmodell, dessen Struktur und wichtige Parameter bereits in Unterabschnitt 4.1.1 gezeigt wurden, im Detail vorgestellt. Das Modell wurde unter MATLAB 5.2/Simulink 2.2 implementiert. Die dem Modell zugrunde liegenden Annahmen und Gleichungen wurden weitgehend in Abschnitt 2.3 eingeführt.

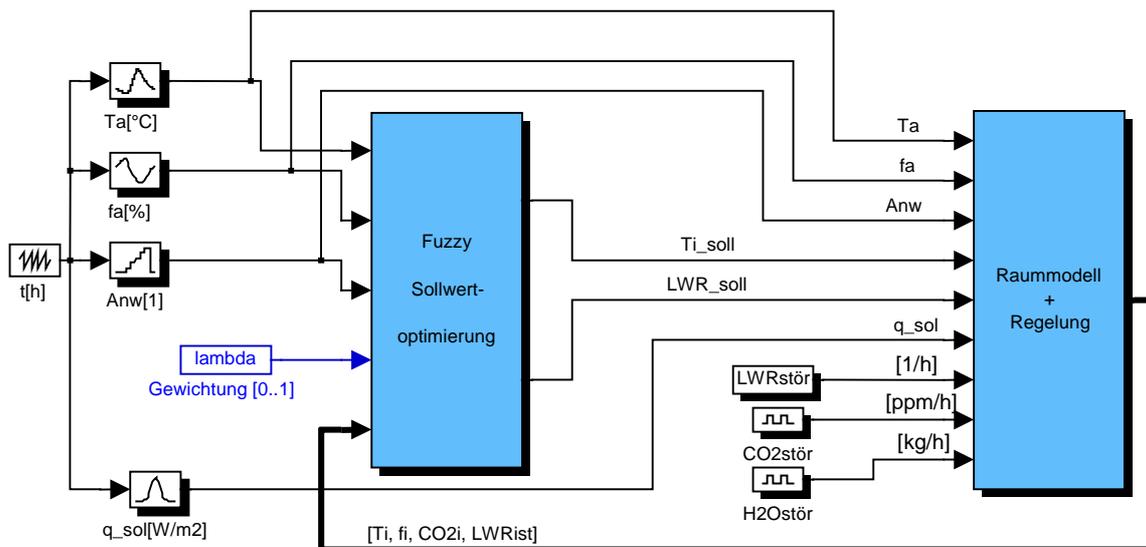


Abb. B.0-1: Struktur des Simulationsmodells ( $f_i \equiv \varphi_i$ ,  $f_a \equiv \varphi_a$ )

### B.1 Fuzzy-Leitkomponente

Die Leitkomponente wurde als MATLAB S-Function implementiert (Abb. B.1-1). Eingangsgrößen sind die Innenklimagrößen Temperatur  $T_i$ , relative Feuchte  $f_i$  und  $\text{CO}_2$ -Gehalt  $\text{CO}_{2i}$ , die Außenklimagrößen Temperatur  $T_a$  und relative Feuchte  $f_a$ . Der konstante Wert des  $\text{CO}_2$ -Gehalt außen  $\text{CO}_{2a}$ , die Parameter der Komfort- und Ökonomie-ZGF sowie die bauphysikalischen Parameter werden der S-Function `sfct_fuzzy` als Parameter übergeben. Neben den wesentlichen Ausgangsgrößen  $T_{i,\text{soll}}$  und  $\text{LWR}_{\text{soll}}$  werden zu Beobachtungszwecken berechnete Größen bezüglich Störgrößen, interne Sollwerte und Flags ausgegeben.

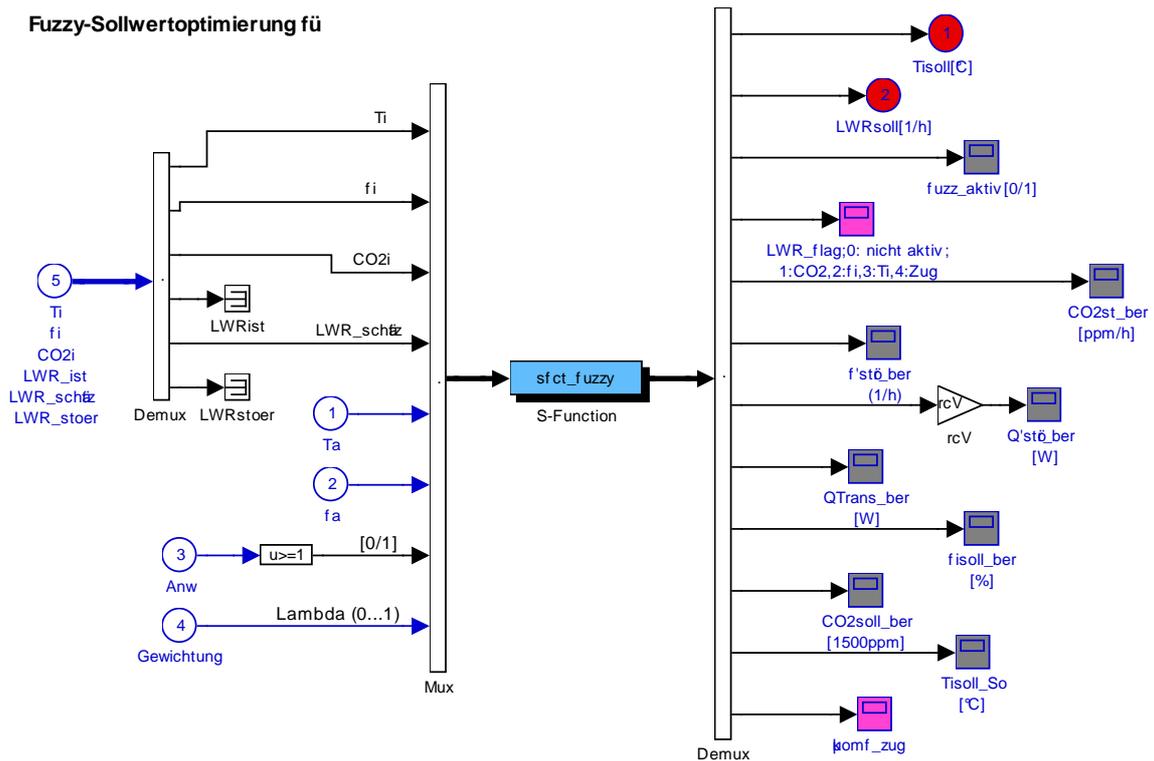


Abb. B.1-1: Implementierung der fuzzy-basierten Leitkomponente als MATLAB S-Function (Block "Fuzzy Sollwertoptimierung" aus Abb. B.0-1)

## B.2 Raummodell und Regelung

Das in Abb. B.2-1 im Überblick gezeigte Raummodell umfaßt folgende Module:

- Außen-, Innenwände und Fenster
- Einfluß der Lüftung auf  $CO_2$ -Gehalt, relative Feuchte, Temperatur
- Lüftungssteuerung
- Heizkörper
- Temperaturregler
- Einfluß der Solarstrahlung

Die Module werden im folgenden vorgestellt.

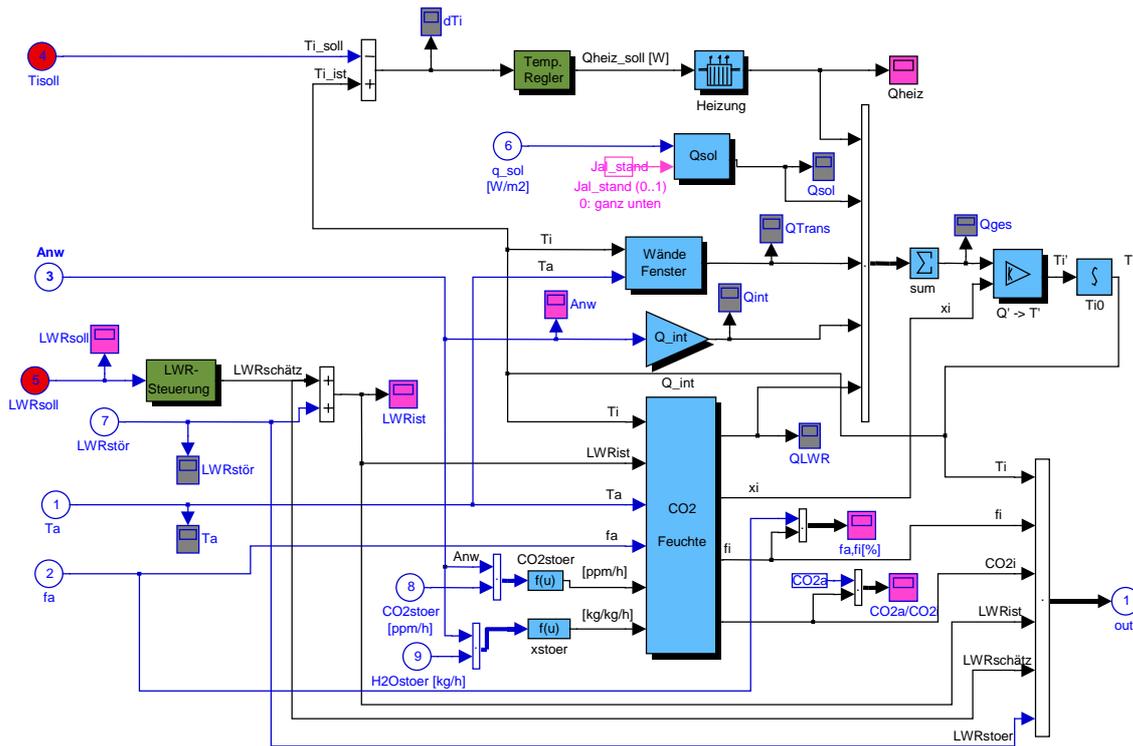


Abb. B.2-1: Raummodell und Regelung (Block "Raummodell+Regelung" aus Abb. B.1-1)

### Außenwand, Fenster und Innenwände

Das Modell der Außenwand, der Fenster und Innenwände ist in Abb. B.2-2 dargestellt. Die Außen- und Innenwände sind als RC-Netzwerk modelliert (vgl. 2.3.4). Exemplarisch ist das Model der Außenwand in Abb. B.2-3 gezeigt. Die Wärmeleitung durch das Fenster ist als statisches Modell implementiert (Abb. B.2-4).

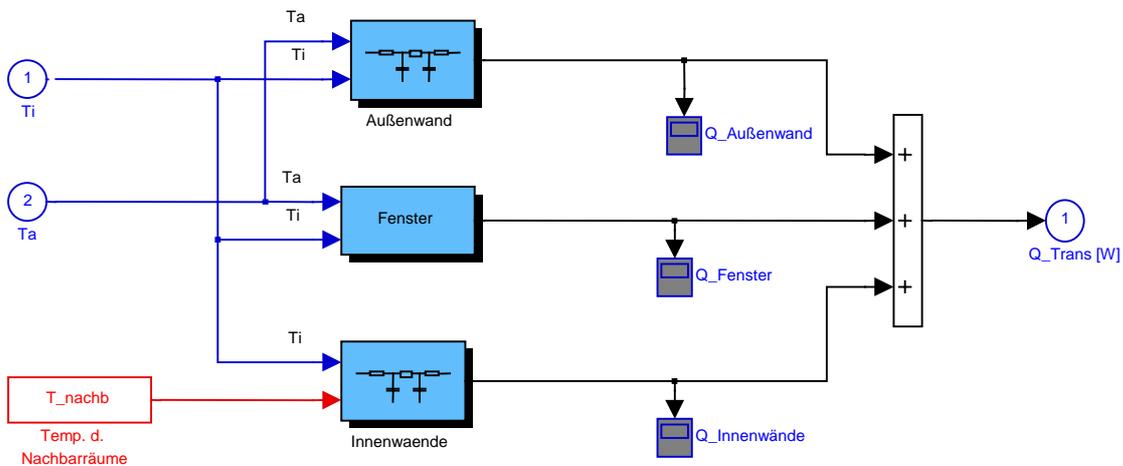


Abb. B.2-2: Wärmeströme in den Raum über die Außenwand, Fenster und Innenwände (Block "Wände,Fenster" aus Abb. B.2-1)

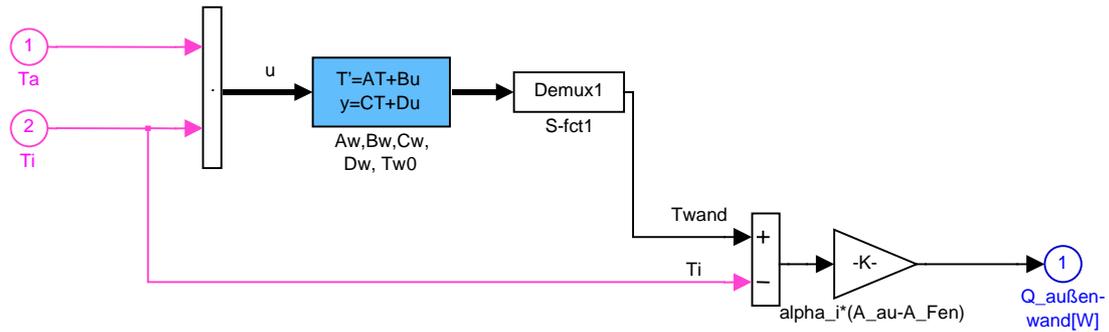


Abb. B.2-3: Transmissionswärmeverluste über die Außenwand als RC-Netzwerk (Block "Außenwand" aus Abb. B.2-2)

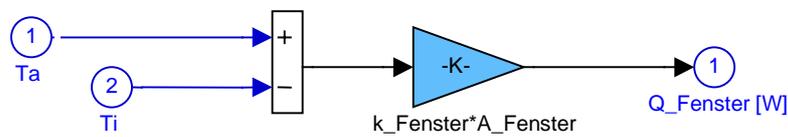


Abb. B.2.4: Transmissionswärmeverluste über das Fenster (Block "Fenster" aus Abb. B.2-2)

### Lüftungsmodell

Das in Abb. B.2-5 gezeigte Lüftungsmodell berechnet  $CO_2$ -Gehalt  $CO_{2i}$ , relative Feuchte  $\phi_i$ , den absoluten Wassergehalt innen und außen ( $x_i, x_a$ ) und die Lüftungswärmeverluste  $\dot{Q}_{LWR}$ . Die Module zu  $CO_{2i}$  bzw.  $\phi_i, x_i, x_a$  sind in Abb. B.2-6 bzw. Abb. B.2-7 dargestellt.

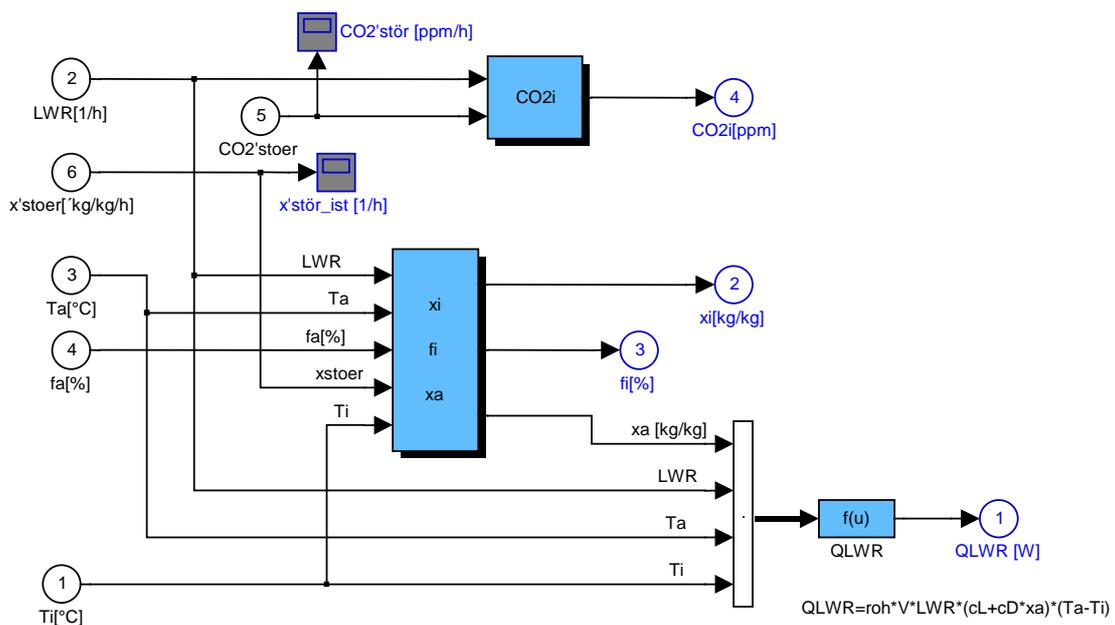


Abb. B.2-5: Lüftungsmodell (Block "CO2,Feuchte" aus Abb. B.2-1)

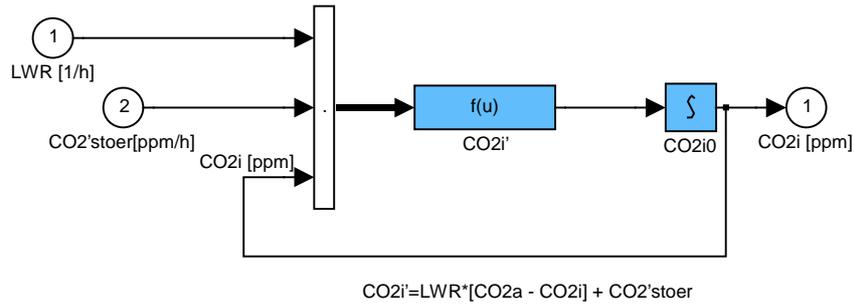


Abb. B.2-6: Modell des CO<sub>2</sub>-Gehaltes (Block "CO<sub>2</sub>i" aus Abb. B.2-5)

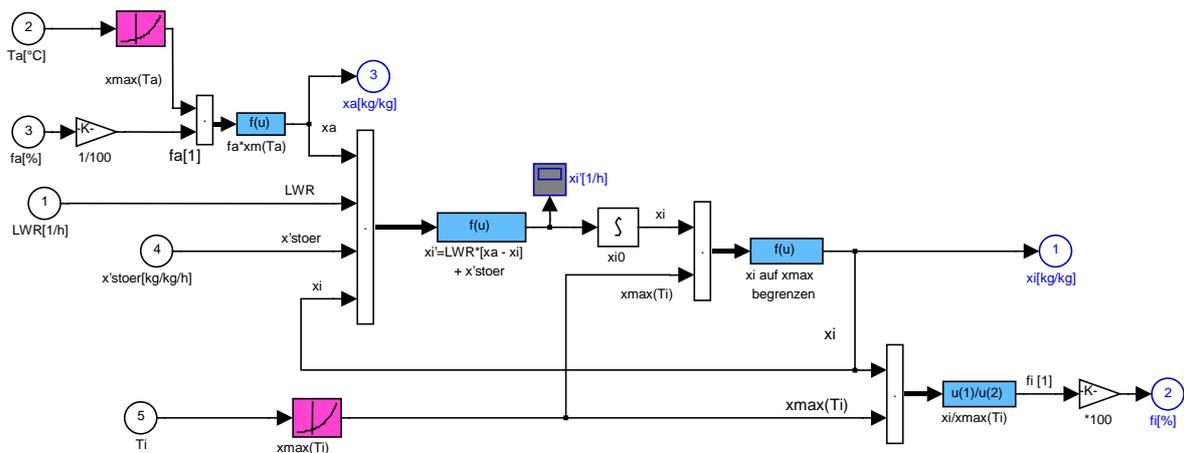


Abb. B.2-7: Modell der relativen Feuchte  $\phi_i$  und des absoluten Wassergehaltes innen und außen ( $x_i, x_a$ ) (Block "xi,fi,xa" aus Abb. B.2-5)

### Lüftungssteuerung

Die Lüftungssteuerung (Abb. B.2-8) stellt einen vorgegeben Lüftungswollwert  $LWR_{soll}$  ein. Dies geschieht entweder über einen Ventilator, der den Sollwert ideal einstellt oder über einen Fensteröffner, der über einen Schwellwertalgorithmus mit Hysterese angesteuert wird ( $LWR_{soll} < 0.7/h$ : Fenster zu,  $LWR_{soll} > 0.9/h$ : Fenster auf). Bei geöffnetem Fenster wird eine Luftwechselrate  $LWR_{schätz} = 0.8/h$  angenommen. Der tatsächlicher Lüftungswert  $LWR_{ist}$  ergibt sich aus der Summe des von der Lüftungssteuerung eingestellten Lüftungswertes  $LWR_{schätz}$  und einem Störanteil  $LWR_{stör}$  (vgl. Abb. B.2-1).

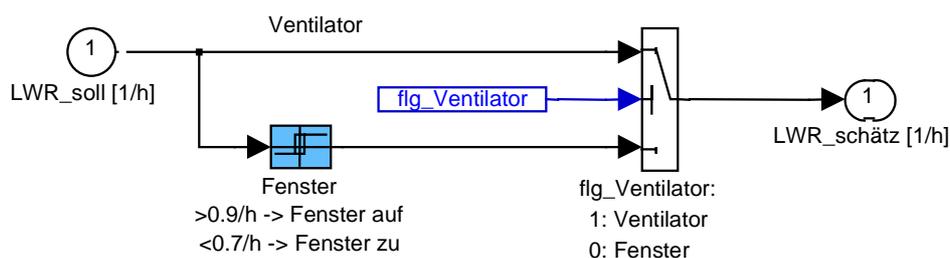


Abb. B.2-8: Lüftungssteuerung (Block "LWR-Steuerung" aus Abb. B.2-1)

## Heizkörper

Das Modell des Heizkörpers (Abb. B.2-9) geht von der Annahme aus, daß ein Sollwert der Heizleistung  $\dot{Q}_{\text{Heiz\_soll}}$  vorgegeben wird, dem der Heizkörper mit Tiefpaßverhalten folgt (Zeitkonstante 10 Minuten). Die Heizleistung ist nach oben auf 3000 W, nach unten auf 0 W beschränkt. Auf eine detailliertere Modellierung des Heizkörpers, die Ventilkennlinie sowie die Dynamik des Heizungssystems berücksichtigen müßte [Reck95], wurde an dieser Stelle verzichtet.

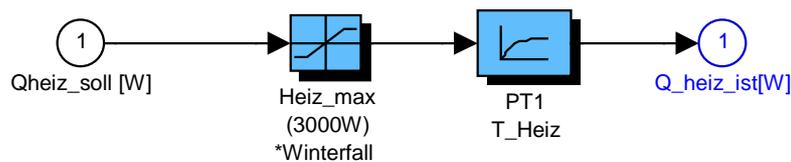


Abb. B.2-9: Modell des Heizkörpers (Block "Heizung" aus Abb. B.2-1)

## Temperaturregler

Der Temperaturregler ist als PI-Regler mit nichtlinearer Abhängigkeit der Integralverstärkung  $K_I$  von der Regeldifferenz  $\text{err} = T_{i,\text{soll}} - T_{i,\text{ist}}$  implementiert (Gleichung (B.2-1)). Damit wird verhindert, daß der Integralanteil bei großer Regeldifferenz zu stark gewichtet wird.

$$K_I(\text{err}) = \begin{cases} 0.1/\text{h} & \text{für } \text{err} < -2\text{K} \\ 3.0/\text{h} & \text{für } \text{err} \geq -2\text{K} \end{cases} \quad (\text{B.2-1})$$

Der Integralanteil  $\int K_I(\text{err}) \text{err} \, dt$  wird nach oben auf 1 K beschränkt (Anti-Windup). Ausgang des Reglers ist ein Sollwert der Heizleistung  $\dot{Q}_{\text{Heiz\_soll}}$ .

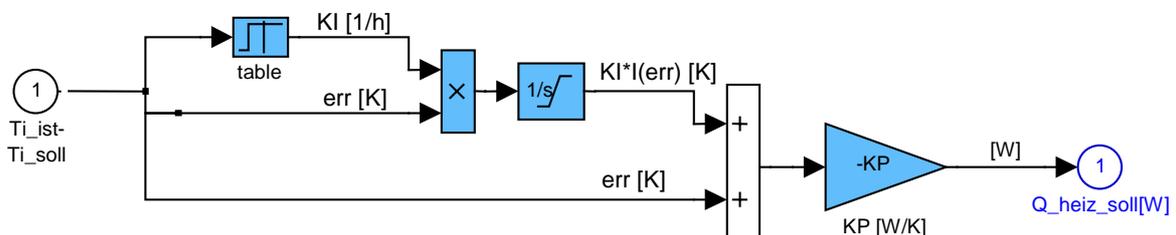


Abb. B.2-10: Temperaturregler (Block "Temp.-Regler" aus Abb. B.2-1)

### Einfluß der Solarstrahlung

Der Wärmeeintrag durch Solarstrahlung berechnet sich aus der Intensität der Solarstrahlung  $\dot{q}_{\text{sol}}$ , der Jalousiestellung  $\text{jal} \in [0,1]$ , dem Durchlaßgrad des Fensters  $g \approx 0.7$  [Reck95] und der Fensterfläche  $A_{\text{Fenster}}$  gemäß Gleichung (B.2-2).

$$\dot{Q}_{\text{sol}} = \text{jal} \cdot g \cdot A_{\text{Fenster}} \cdot \dot{q}_{\text{sol}} \quad (\text{B.2-2})$$

Die Tatsache, daß die Wärme nicht direkt zur Erwärmung der Raumluft beiträgt, sondern indirekt über die Erwärmung von bestrahlten Flächen wird durch einen Tiefpaß 1. Ordnung (Zeitkonstante 10 Minuten) berücksichtigt. Die Zeitkonstante wurde aus detaillierteren Simulationen der Wechselwirkung der Solarstrahlung mit der Wand als RC-Modell gewonnen (vgl. 2.3.4.3).

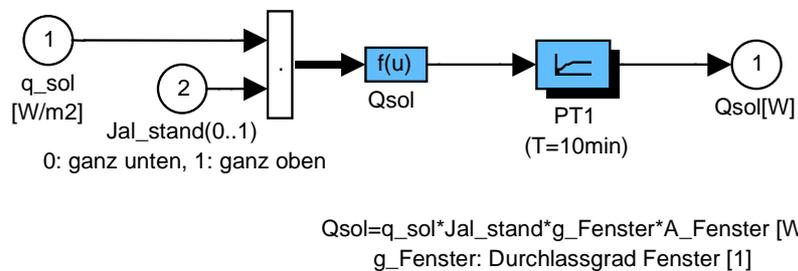


Abb. B.2-11: Wärmeeintrag durch Solarstrahlung (Block "Qsol" aus Abb. B.2-1)

## Anhang C Programmstruktur und Parameter

Nachfolgend werden die Programmstruktur der Leitkomponente beschrieben (Abschnitt C.1), verwendete Parameter spezifiziert (Abschnitt C.2) sowie die Bereichsgrenzen und Initialisierung der dynamischen Datenbasis beschrieben (Abschnitt C.3).

### C.1 Programmstruktur

Die Optimierung der Sollwerte bezüglich Innentemperatur und Luftwechselrate stellt nur einen Teil des echtzeitfähigen, in der Sprache C implementierten Programms dar. Weitere Programmblöcke sind für das Einlesen und die Weiterverarbeitung der Parameter, Störgrößen und Zustandswerte aus der dynamischen Datenbasis zuständig. Das Programmablaufschaema ist in Abb. C.1-1 dargestellt.

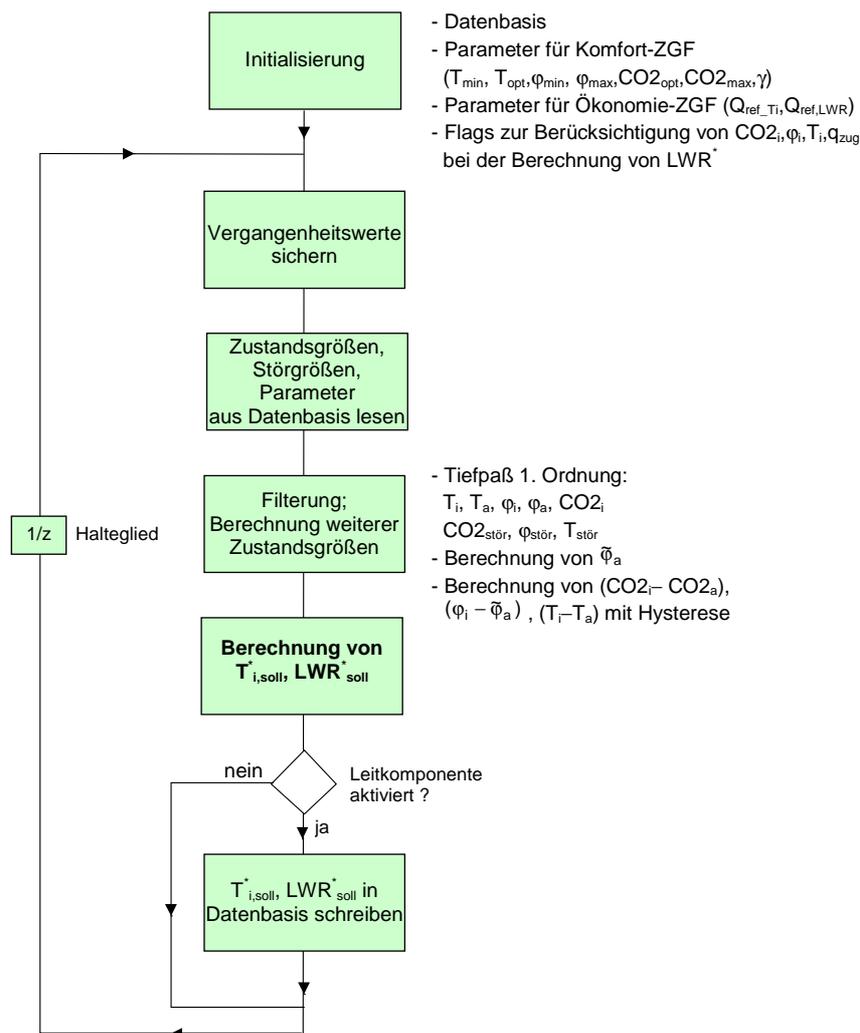


Abb. C.1-1: Programmablaufschaema der Leitkomponente

## C.2 Parameter

Nachfolgend sind die verwendeten physikalischen Konstanten (Tabelle C.2-1), die Parameter zur Bauphysik und Lüftungsaktorik (Tabelle C.2-2) sowie die Parameter zur Filterung und Berechnung der Zustandsgrößen (Tabelle C.2-3) aufgeführt. Letztere wurden anhand von Simulationsergebnissen und experimentellen Erfahrungen eingestellt.

Tabelle C.2-1: verwendete physikalische Konstanten [Reck95,Stö94]

Parameter	Wert	Bedeutung
$\rho_L$	1.2 kg/m <sup>3</sup>	Dichte der trockenen Luft
$c_L$	1000 J/kg/K	spez. Wärmekapazität der trockenen Luft
$\alpha$	5 W/m <sup>2</sup> /K	Wärmeübergangskoeffizient (zur Berechnung der Empfindungstemperatur $T_{op}$ )
CO <sub>2a</sub>	300 ppm	CO <sub>2</sub> -Gehalt außen
CO <sub>2rate</sub>	10 Liter/h	CO <sub>2</sub> -Produktionsrate einer Person (zur Berechnung von $Q_{ref\_LWR}$ )

Tabelle C.2-2: Parameter zur Bauphysik und der Lüftungsaktorik in den zwei Versuchsräumen (Raum 2: Fensterlüftung)

Parameter	Raum 1	Raum 2	Bedeutung
<b>Bauphysik</b>			
$V_{Raum}$	50 m <sup>3</sup>	30 m <sup>3</sup>	freies Raumvolumen
$k_a$	1.0 W/m <sup>2</sup> /K	1.5 W/m <sup>2</sup> /K	k-Wert der Außenwand inkl. Fenster
$A_a$	10 m <sup>2</sup>	10 m <sup>2</sup>	Fläche der Außenwand inkl. Fenster
$A_{ges}$	60 m <sup>2</sup>	30 m <sup>2</sup>	Gesamte Fläche aller Wände
<b>Lüftungsaktorik</b>			
$Vent_{min}$	0 m <sup>3</sup> /h	---	minimale Ventilatorleistung
$Vent_{min}$	300 m <sup>3</sup> /h	---	minimale Ventilatorleistung
$\Delta Vent$	5 m <sup>3</sup> /h	---	Schrittweite, mit der die Ventilatorleistung geändert werden kann
$P_{vent\_max}$	50 W	0 W	maximale Ventilatorleistung

Tabelle C.2-3: Parameter zur Filterung und Berechnung der Zustands- und Hilfsgrößen

Parameter	Wert	Bedeutung
<b>Zeitkonstanten der Referenztrajektorien</b>		
$\tau_C$	15 min	Zeitkonstante Referenztrajektorie bezüglich $CO_{2i}$
$\tau_\phi$	15 min	Zeitkonstante Referenztrajektorie bezüglich $\phi_i$
$\tau_T$	15 min	Zeitkonstante Referenztrajektorie bezüglich $T_i$ (Sommerfall)
<b>Parameter für Hysteresefunktion</b>		
$\Delta CO_{2min}$	50 ppm	Begrenzung von $(CO_{2i} - CO_{2a})$
$\Delta \phi_{min}$	5 %	Begrenzung von $(\phi_i - \tilde{\phi}_a)$
$\Delta T_{min}$	1 K	Begrenzung von $(T_i - T_a)$
<b>Parameter zur Begrenzung der berechneten Störraten</b>		
$CO_{2stör\_max}$	2000 ppm/h	Begrenzung von $CO_{2stör}$
$\phi_{stör\_max}$	100 %/h	Begrenzung von $\phi_{stör}$
$T_{stör\_max}$	20 K/h	Begrenzung von $T_{stör}$
<b>Tiefpaß-Zeitkonstanten für Störraten</b>		
$T_{TP\_CO_{2stör}}$	20 min	Tiefpass-Zeitkonstante für $CO_{2stör}$
$T_{TP\_phi\_stör}$	20 min	Tiefpass-Zeitkonstante für $\phi_{stör}$
$T_{TP\_T\_stör}$	20 min	Tiefpass-Zeitkonstante für $T_{stör}$
<b>Tiefpaß-Zeitkonstanten für Zustandsgrößen</b>		
$T_{TP\_CO_{2i}}$	2 min	Tiefpass-Zeitkonstante für $CO_{2i}$
$T_{TP\_phi}$	2 min	Tiefpass-Zeitkonstante für $\phi_i$
$T_{TP\_T_i}$	2 min	Tiefpass-Zeitkonstante für $T_i$
<b>Tiefpaß-Zeitkonstanten für Außenklimagrößen</b>		
$T_{TP\_phi_a}$	2 min	Tiefpass-Zeitkonstante für $\phi_a$
$T_{TP\_T_a}$	5 min	Tiefpass-Zeitkonstante für $T_a$
$T_{a\_sommerfall}$	15 °C	ist der mit der Zeitkonstante $T = 12$ h tiefpaßgefilterte Wert von $T_a$ größer als $T_{a\_sommerfall}$ , so wird auf Sommerfall erkannt
<b>sonstige Parameter</b>		
$T_{a,ref}$	5 °C	Referenz-Außentemperatur (zur Berechnung von $Q_{ref\_T}$ , $Q_{ref\_LWR}$ )
$\Delta t_{anw}$	1 min	nach $\Delta t_{anw}$ gilt der Raum als belegt (Vermeidung von zu kurzfristigen Umschaltvorgängen)

### C.3 Bereichsgrenzen und Initialisierung der dynamischen Datenbasis

In Tabelle C.3-1 sind die physikalischen Größen und Parameter aufgeführt, die aus der dynamischen Datenbasis gelesen werden. Bei der Einleseprozedur wird die Plausibilität der Werte über eine Bereichsgrenzenkontrolle geprüft. Liegt der Wert außerhalb der Bereichsgrenzen, so wird der angegebene Ersatzwert eingesetzt.

Tabelle C.3-1: Bereichsgrenzen, Ersatzwerte und Initialisierungswerte der physikalische Größen und Parameter, die aus der dynamischen Datenbasis gelesen werden

Variable	Ist-/ Sollwert	untere Grenze	obere Grenze	Ersatzwert	Initialisierung	Bedeutung
<b>Innen- und Außenklimagrößen</b>						
$T_i$	ist	10 °C	50 °C	20 °C	---	Temperatur innen
$T_q$	ist	-20 °C	50 °C	5 °C	---	Temperatur außen
$\varphi_i$	ist	10 °C	95 °C	60 %	---	rel. Feuchte innen
$\varphi_q$	ist	10 °C	95 °C	70 %	---	rel. Feuchte außen
$CO_{2_i}$	ist	250 ppm	$10^4$ ppm	350 ppm	---	$CO_2$ -Gehalt innen
Anw	ist	0	1	0	---	Anwesenheit (0/1)
$LWR_{ist}$	ist	0/h	10/h	0/h	0/h	Luftwechselrate (Istwert)
<b>Parameter der Komfort-ZGF</b>						
$CO_{2_{opt}}$	soll	350 ppm	1500ppm	500 ppm	400 ppm	Komfort-ZGF bzgl. $CO_{2_i}$
$CO_{2_{max}}$	soll	500 ppm	5000ppm	1000 ppm	1000 ppm	Komfort-ZGF bzgl. $CO_{2_i}$
$\varphi_{min}$	soll	20 %	40 %	30 %	30 %	Komfort-ZGF bzgl. $\varphi_i$
$\varphi_{max}$	soll	60 %	80 %	70 %	70 %	Komfort-ZGF bzgl. $\varphi_i$
$T_{min}$	soll	16 °C	22 °C	18 °C	18 °C	Komfort-ZGF bzgl. $T_{op}$
$T_{opt}$	soll	18 °C	26 °C	24 °C	24 °C	Komfort-ZGF bzgl. $T_{op}$
$q_1$	soll	10 W/m <sup>2</sup>	40 W/m <sup>2</sup>	20 W/m <sup>2</sup>	40 W/m <sup>2</sup>	Komfort-ZGF bzgl. $q_{zug}$
$q_2$	soll	30 W/m <sup>2</sup>	60 W/m <sup>2</sup>	40 W/m <sup>2</sup>	40 W/m <sup>2</sup>	Komfort-ZGF bzgl. $q_{zug}$
<b>sonstige Parameter</b>						
$\Delta t$	soll	1 s	300 s	10 s	10 s	Abtastzeit
$\lambda$	soll	0	1	0.5	0.5	Gewichtung Komfort - Ökonomie (0 ... 1)
Aktivierung	soll	0	1	1	1	Aktivierung der Leitkomponente (0/1)
Typ_Anz	soll	1	20	2	2	Typische Anzahl von Personen im Raum (zur Berechnung von $Q_{ref\_LWR}$ )
$\Delta T_i$	soll	0.1 °C	1 °C	0.2 °C	0.2 °C	Schrittweite von $T_{i,soll}$
$T_{i\_abw}$	soll	15 °C	20 °C	15 °C	15 °C	Temperatursollwert bei Abwesenheit

Alle Parameter werden mit Defaultwerten initialisiert und können im laufenden Betrieb geändert werden. Die Initialisierungswerte sind ebenfalls in Tabelle C.3-1 aufgeführt.

Bei den Parametern, die die Komfort-ZGF bezüglich  $T_{op}$ ,  $\varphi_i$  und  $CO_{2i}$  definieren, wird zusätzlich zur Bereichsgrenzenkontrolle überprüft, ob die jeweiligen Parameter in der richtigen Relation zueinander stehen ( $T_{opt} > T_{min}$ ,  $\varphi_{max} > \varphi_{min}$ ,  $CO_{2max} > CO_{2opt}$ ). Im Falle einer Verletzung der Relation werden die jeweiligen Ersatzwerte eingesetzt.

Im Versuchsraum 2 wird die Luftqualität über einen Mischgas- statt  $CO_2$ -Sensor erfaßt, so daß die entsprechenden Parameter der Komfort-ZGF anzupassen sind. Anders als bei  $CO_2$  wird das Meßsignal in willkürlichen Einheiten (arbitrary units, a. u.) angegeben, so daß die Parameter individuell vom jeweils verwendeten Sensor abhängen. Für den im Versuchsraum 2 verwendeten Sensor ergaben sich folgende Werte:

Tabelle C.3-2: Anpassung der Parameter bei Mischgas- statt  $CO_2$ -Sensor

Größe	Wert [a. u.]	Bedeutung
$MG_i$	Meßwert	Mischgas innen; ersetzt $CO_{2i}$
$MG_a$	40	Mischgas außen; ersetzt $CO_{2a}$
$MG_{opt}$	60	ersetzt $CO_{2opt}$
$MG_{max}$	200	ersetzt $CO_{2max}$

## Anhang D Sensorik und Aktorik der Versuchsräume

Im folgenden sind die technischen Daten der in den zwei Versuchsräumen verwendeten Sensoren und Aktoren aufgeführt.

### D.1 Versuchsraum 1

Alle Sensoren und Aktoren des Versuchsraum 1 wurden über ein LON-Feldbussystem vernetzt. Die Ankopplung erfolgte über Neuron-Chips vom Typ 3150. Die technischen Daten der Sensoren und Aktoren sind in den Tabelle D.1-1 und D.1-2 dargestellt.

Tabelle D.1-1: Technische Daten der Sensoren in Versuchsraum 1

Sensor	Firma	Typ	Technische Daten
Temperatur innen, außen, Wandtemperatur, Vorlauf-, Rücklauftemp.	RS-Components	SMT 160-30	Meßprinzip: Thermowiderstand Meßbereich-30...+100°C Fehler <0.7 °C Ausgangssignal: pulsbreitenmoduliert
Feuchte innen, außen	Fanell	540-985	Meßprinzip: kapazitiv Meßbereich 10 ... 90% rel. Feuchte Fehler: ± 15 % des Meßsignals
CO <sub>2</sub> -Gehalt innen	Endres + Hauser	CD2.4DA	Meßprinzip: Infrarot Meßbereich: 0 ... 5000 ppm Reproduzierbarkeit: ± 1%
Anwesenheit	RS-Components	Vierfach-Bewegungsmelder	Meßprinzip: Infrarot Öffnungswinkel 80°
Volumenstrom Heizung	Endres + Hauser	PICOMAG II DM16533	Meßprinzip: induktiv

Tabelle D.1-2: Technische Daten der Aktoren in Versuchsraum 1

Aktor	Firma	Typ	Technische Daten
Stellantrieb Heizung	Danfoss	AMV 100	analog ansteuerbar, ± 24 V
Abluftventilator	Maico	ESR 20	max. Volumenstrom: 700 m <sup>3</sup> /h Steuerung mit Phasenanschnitt

## D.2 Versuchsraum 2

Die Sensoren und Aktoren des Versuchsraum 2 wurden teilweise über ein LON- bzw. ein EIB-Feldbussystem vernetzt. Die technischen Daten der Sensoren und Aktoren sind in den Tabellen D.2-1 und D.2-2 dargestellt.

Tabelle D.2-1: Technische Daten der Sensoren in Versuchsraum 2

Sensor	Firma	Typ	Technische Daten
Temperatur innen, außen	Thermokon Sensortechnik	WRF01 LON (innen) AGS54 LON (außen)	Meßprinzip: Thermowiderstand Meßbereich-30...+100°C Fehler: < 0.7% Ausgangssignal: pulsbreitenmoduliert Feldbusankopplung: LON
Mischgas	Thermokon Sensortechnik	LQ LON	Meßprinzip: Reduktion der Gase Feldbusankopplung: LON
Anwesenheit	Top Control	Präsenzmelder ECO-IR 360 LON	Meßprinzip: IR Öffnungswinkel 360° Feldbusankopplung: LON

Tabelle D.2-2: Technische Daten der Aktoren in Versuchsraum 2

Aktor	Firma	Typ	Technische Daten
Stellmotor Heizkörperventil	Heimeier	EMO EIB	Stellgröße: Ventilstellung 0 ... 100% Laufzeit: 25s/mm Feldbusankopplung: EIB
Fensteröffner	WindowMaster	WMD 100	max. Fensteröffnung: 15 cm Feldbusankopplung: EIB