

**PRÄDIKTIVE WÄRMEFLUSSREGELUNG
SOLAROPTIMIERTER WOHNGEBÄUDE MIT NEUARTIGEN
VERSCHATTUNGS- UND SPEICHERSYSTEMEN**

-THERMISCHE SIMULATION KOMPLEXER GEBÄUDE-

Vom Fachbereich Elektrotechnik und Informationstechnik
der Universität Kaiserslautern
zur Verleihung des akademischen Grades
“Doktor der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.)”
genehmigte Dissertation.

von

Dipl.-Ing. Werner Hube
geb. in Schwenningen/Neckar

D 386

Tag der mündlichen Prüfung:	30. April 2004
Dekan des Fachbereichs:	Prof. Dr.-Ing. N. Wehn
Prüfungskommission:	
Vorsitzender:	Prof. Dr.-Ing. P. Weiß
Berichterstattende:	Prof. Dr.-Ing. habil. L. Litz Prof. Dr. rer. nat. H. Heinrich

Vorwort

Die Arbeit entstand während meiner Tätigkeit am Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme in Freiburg. Sie wurde jedoch erst durch das Promotionsstipendium der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU) ermöglicht. So danke ich der DBU für die finanzielle Unterstützung genauso wie für die aufschlussreichen Seminare, zu denen ich eingeladen wurde.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Lothar Litz vom Lehrstuhl für Automatisierungstechnik der Universität Kaiserslautern für die Übernahme des Hauptreferats.

Bei Herrn Prof. Dr. rer. nat. Hermann Heinrich vom Lehrstuhl Bauphysik/Technische Gebäudeausrüstung der Universität Kaiserslautern bedanke ich mich für die Übernahme des Koreferats.

Mein wichtigster Dank geht an Herrn Dr. Christof Wittwer. Sein fortwährendes Interesse an den Inhalten der Arbeit führte zu kritischen Diskussionen in wissenschaftlichen und inhaltlichen Fragen. Sein Engagement hat mich enorm unterstützt und entscheidend zur Entwicklung der Arbeit beigetragen.

Ganz besonders möchte ich mich auch bei Herrn Dr. Volker Wittwer, Herrn Dr. Werner Platzer und bei Herrn Dipl.-Phys. Klaus Rohlfss bedanken. Sie legten die Grundlage und gaben die Anregung zu dieser Arbeit. Auch für die Betreuung sei Dank.

Ebenso gilt mein Dank den Diplomanden, insbesondere Herrn Dipl.-Ing. (FH) Stephan Buschmann und wissenschaftlichen Hilfskräften, die mir wichtige Ergebnisse zur Programmvalidierung der Simulationsumgebung lieferten, sowie bei experimentellen Untersuchungen eine große Hilfe waren.

Des Weiteren möchte ich mich bei allen Kollegen der Gruppen TAK und FFE sowie im weiteren Umfeld bei der ganzen Abteilung TOS bedanken.

Dank auch an den Fachbereich für Bauphysik und technischer Ausbau der Universität Karlsruhe, namentlich Herrn Prof. Dipl.-Ing. Andreas Wagner, für die inhaltliche wie auch experimentelle Unterstützung zu den umfangreichen Feldversuchen am Solarhaus in Gundelfingen.

Dank allen, die durch Korrekturlesen, Diskussionen und anderweitige Unterstützung dabei geholfen haben, eine runde Sache daraus zu machen.

Das Glück liegt in der Familie. Sie gibt die Kraft und die Ausdauer für viele Aufgaben.

Meinem Bruder Gerhard danke ich für den gegebenen Rückhalt.

Herzlich danke ich Friederike und meinen Kindern Felice und Nico, die mich mehr als einmal ins "Kämmerle" verschwinden sahen.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Motivation	1
1.2	Entwicklungsstand: Integrale Regelungskonzepte	2
1.2.1	Bewertung Simulationsumgebungen	3
1.2.2	Bewertung Regelungsalgorithmen	4
1.3	Zielstellung und Aufbau der Arbeit	6
2	“Solares Bauen” und Grundlagen zur Modellbildung	9
2.1	“Solares Bauen”	9
2.1.1	Gebüdereaktion auf Sonneneinstrahlung	10
2.1.2	Moderne Fassadenkonstruktionen	12
2.1.2.1	Hochwertige Fenster	13
2.1.2.2	Sonnenschutzsysteme	14
2.1.2.3	Transparente Wärmedämmung	16
2.1.2.4	Phasenwechselmaterial im Wandverbund	17
2.1.3	Solarunterstützte Heizanlagen	19
2.1.4	Thermische Behaglichkeit und Raumluftqualität	21
2.2	Thermische Prozesse im Gebäude	25
2.2.1	Wärmetransportvorgänge	25
2.2.2	Solarstrahlung	28
2.3	Thermisches Gebäudemodell innerhalb <i>ColSim</i>	31
2.3.1	Raummodell	31
2.3.1.1	Konvektiver Wärmeübergang	32
2.3.1.2	Strahlungsaustausch	35

2.3.1.3	Energiebilanz an der Innenoberfläche	36
2.3.2	Wandmodell	37
2.3.2.1	Dynamischer Wärmetransport in Wänden	37
2.3.2.2	Diskretisierungsschema für mehrschichtige Wandbauteile	38
2.3.2.3	Wärmeübertragung an Außenflächen	40
2.3.2.4	Energiebilanz an der Außenoberfläche	44
2.3.3	Fenstermodell	45
2.3.4	Solarstrahlung und Himmelsmodell	47
3	Validierung und Modifikation des Gebäudemodells	51
3.1	Kreuz-Validierung des Gebäudemodells	51
3.1.1	BESTEST - Cross Validation	51
3.1.2	TASK 26 - Referenzgebäude	53
3.2	Moderne Fassadensysteme	55
3.2.1	Transparente Wärmedämmung	55
3.2.2	Phasenwechselmaterial im Wandverbund	59
3.2.3	Verschattungseinrichtung	65
3.3	Heizkörper: Radiatoren und Konvektoren	66
3.4	Gesamtmodell des Gebäudes	70
3.4.1	Modellaufbau des solaroptimierten Gebäudesystems	70
3.4.2	Dynamisches Verhalten des Gesamtmodells	75
4	Prädiktive Wärmeflussregelung solarer Gebäude	83
4.1	Regleranforderungen und Streckenverhalten	83
4.1.1	Anforderungen an den Regelkreis	83
4.1.2	Das Gütekriterium	85
4.1.2.1	Raumklima-/Komfort-Kriterium	85
4.1.2.2	Energieoptimales Kriterium	86
4.2	Übergeordnetes Wärmemanagement	86
4.2.1	Regelungskonzept	86
4.2.2	Passive und aktive Stellglieder	88
4.2.3	Zustandsvorhersage	90
4.2.3.1	Model Predictive Control	90

4.2.3.2	Zustandsvorhersage mittels Modellreduktion und Wettervorhersage	92
4.2.3.3	Parameteranpassung	96
4.2.4	Konzept: Fuzzy-Logik	99
4.2.5	Linguistische Variablen	101
4.2.6	Regelbasis zur Erhaltung der Behaglichkeitstemperatur	106
5	Simulationsgestützte Untersuchungen	107
5.1	Konventionelle Regelung	108
5.2	Regelung mittels Prädiktion und Fuzzy-Logik	113
5.2.1	Erweiterung um Heizkreisrücklaufbegrenzung	114
5.2.2	Weitere Auswertungen	118
5.2.3	Robustheit gegenüber Änderungen	122
6	Zusammenfassung und Ausblick	125
A	Erläuterungen zu ColSim	129
A.1	Konzept	130
A.2	Programm-Struktur und Aufbau	131
A.3	Numerisches Lösungsverfahren	132
A.4	Modellbildung durch das thermisches Ersatzschaltbild	135
B	Die BESTEST-Vergleichsmethode	139
B.1	Das Testverfahren	140
B.2	ColSim Ergebnisse im BESTEST-Vergleich	141
C	Solarhaus Gundelfingen	149
C.1	Wärmestromanalyse zum Gebäude	150
C.2	Untersuchungen zur Heizkennlinie	157
C.3	TWD-Wand im Wandel	159
C.4	“Low Flow” im Heizkreis	161

D	165
D.1 Implikationen zur Regelbasis	165
D.2 Nomenklatur	167
D.3 Veröffentlichungen	169
D.4 Lebenslauf	171
Literatur	173
Abbildungsverzeichnis	177
Tabellenverzeichnis	185

Kapitel 1

Einleitung

Die hier vorliegende Dissertation lässt sich als Beitrag zu den Bemühungen um eine effektive Nutzung, der auf die Gebäudehülle auftretenden Solarstrahlung, auffassen. Es wird das Zusammenspiel der innovativen, teils in der Anwendung, teils noch in der Forschung befindlichen Konzepte zum Einsatz in Fassadenelementen untersucht, wie die optisch schaltbaren Schichten, die transparente Wärmedämmung, die Phasenwechselmaterialien, in Verbindung mit einer intelligenten Regelung und der bereits gut bekannten konventionellen Heiz- und Warmwassertechnik.

1.1 Motivation

“ Solarenergie nutzen ! ”

Architektur wurde baugeschichtlich immer durch die klimatischen Randbedingungen geprägt. Durch preiswerte und scheinbar unbegrenzte fossile Energieträger geriet der Aspekt der Solararchitektur jedoch zunehmend in Vergessenheit. Der inzwischen hohe Komfortanspruch kann durch aktive Heiz-, Kühl-, Lüftungs- und Lichtsysteme (HLK) zuverlässig erfüllt werden. Der Anreiz, bei der Planung von Gebäuden der natürlichen Klimatisierung und der Sonnenenergienutzung Beachtung zu schenken, entfiel. Ein großer Teil des momentanen Gebäudebestandes spiegelt diese Rahmenbedingungen wider: In Deutschland entfallen ca. 30 % des gesamten Endenergiebedarfs auf die Gebäudeheizung [53]. Der spezifische Energiebedarf für Heizung und Warmwasser¹ des Gebäudebestandes liegt bei ca. 250 kWh/(m²a)!²

Durch die Erkenntnis, dass der massive Verbrauch fossiler Energie zu einer Ressourcenknappheit führt und das ökologische Gleichgewicht³ stört, gewinnt die Nutzung der Solarenergie bei der Gebäudeplanung wieder an Bedeutung. Aufgabe guter Architektur mit der

¹der durch aktive Systeme bereitgestellte Energiebedarf pro Quadratmeter Wohnfläche und Jahr

²Eine Studie des Institutes *Wohnen und Umwelt GmbH* im Auftrag der Umweltstiftung *WWF-Deutschland* [80] zeigt für den deutschen Gebäudebestand ein Energieeinsparpotential mit wirtschaftlich sinnvollen Maßnahmen im Durchschnitt von über 50 % auf.

³insbesondere aufgrund der *CO₂*-Problematik und der damit verbundenen globalen Erwärmung.

Sonne ist, den Energieverbrauch zu senken und nicht erneuerbare Energie durch die passive und aktive Nutzung der Sonnenenergie zu ersetzen[73]. Neue Materialien und Konzepte ermöglichen die Realisierung von "Solarhäusern" mit extrem niedrigem Heizenergiebedarf bei hoher thermischer und visueller Behaglichkeit.

Moderne Solargebäude versorgen sich zunehmend selbst mit Wärme. Hierbei spielen Entwicklungen im Bereich der Fassadenkonstruktionen eine zentrale Rolle. Inhalt dieser Arbeit sind Phasenwechselmaterialien im Wandverbund, transparente Wärmedämmung und hochwertige Fenster⁴ mit optisch schaltender Schicht. In Kombination mit hohem Dämmstandard der opaken Flächen und geringen Transmissionsverlusten der Fenster werden hohe solare Erträge realisierbar. Der hohe solare Wärmeeintrag muss durch Wärmespeicherung verzögert an den Raum abgegeben werden. Der Solarbeitrag und die zeitlich verzögerte Wirksamkeit der passiven-solaren Gewinne definieren das thermische Gebäudeverhalten neu. Der aus Altbauten bekannte Zusammenhang zwischen Heizlast und Außentemperatur ist nicht mehr gegeben, weil gerade an sehr kalten Tagen hohe Strahlungsgewinne auftreten.

Das solaroptimierte Gebäude beinhaltet eine Vielzahl von Aktoren, die zur Wärmeflussregelung benötigt werden. Neben dem Heizkreis und den Verschattungssystemen ist dies neuerdings auch das Lüftungssystem. In der Regel werden die einzelnen Systeme unabhängig voneinander geregelt. Da die Wirtschaftlichkeit wie auch der Komfort aber von dem Zusammenspiel aller Komponenten abhängt, sollte in Zukunft mit vernetzten Regelungen gearbeitet werden. Die Optimierung der Regelung wird durch geeignete Abstimmung der Regelsysteme und der Nutzerprofile erreicht.

Die Besonderheit eines neuen, integralen Regelungssystems liegt in der Berücksichtigung des aktuellen Gebäudezustandes. Die Dynamik der passiven-solaren Gewinne, sowie die besondere Eigenschaft der Wärmespeicher (z. B. Aggregatswechsel des Latentmaterials) bewirken ein nichtlineares Systemverhalten. Mit dem Ansatz der modellbasierten Regelung kann der Regler den Zustand des Gebäudes erfassen und unter Berücksichtigung einer vom Nutzer vorgegebenen Komfortgewichtung optimale Führungs- und Stellgrößen berechnen.

Ziel dieser Arbeit ist die Optimierung des Zusammenspiels aller Komponenten, die in einem modernen, solaroptimierten Wohngebäude zum Einsatz kommen. Die Integration moderner Fassadenelemente und der vom Gebäudetyp abhängigen Heiztechnik, soll zu einer weiteren Senkung des Heizenergiebedarfs und einer damit verbundenen fossilen Energieeinsparung führen. Modellbasierte, integrale Regelungen können zur rationellen Energieverwendung beitragen.

1.2 Entwicklungsstand: Integrale Regelungskonzepte

Die im nächsten Kapitel beschriebenen Entwicklungen in der Gebäudetechnik verändern die Anforderungen an Architekten, Planer und Ingenieure. Komfortqualität und Kosteneffizienz gewinnen parallel zur gestalterischen Ausführung weiter an Bedeutung. Um eine übergreifende Optimierung aller thermischen Systeme am Wohngebäude zu erreichen, muss von

⁴an der Südfassade meist auch großflächig ausgeführt

der bisher in der Praxis üblichen Trennung der Regelung einzelner Teilsysteme Abstand genommen werden. Hier gilt es im Bezug auf die neuen Materialien im Gebäude integrale Regelungskonzepte zu verwirklichen.

1.2.1 Bewertung Simulationsumgebungen

Eine zielgerichtete Planung von Solarhäusern, insbesondere zur Betrachtung von Regelungskonzepten zur Optimierung aller Gebäudesysteme, wird erst durch die Verwendung dynamischer Simulationsprogramme ermöglicht. Die Anforderungen an die Simulationswerkzeuge ergeben sich aus den unterschiedlichen Aufgabenstellungen. Programme, welche ein hohes Maß an Flexibilität bieten, wie z. B.:

- variable Struktur
- Integration von Teilmodellen und Regelungen
- freie Parametrierung.

In der thermischen Simulation werden häufig *TRNSYS*⁵, *SMILE*⁶, *ColSim*⁷, *MatLab/Simulink (Toolbox CARNOT)*⁸ [62] oder auch *ESP*⁹ verwendet. Diese Programme sind zur integrierten Gebäude- und Anlagensimulation geeignet.

Während *TRNSYS*, *ColSim* und *MatLab* zur Gruppe der modularen, prozeduralen Simulationswerkzeuge gehören, gibt es in jüngster Zeit Bestrebungen Simulationswerkzeuge auf Basis objektorientierter Ansätze zu entwickeln. *SMILE*, das im Rahmen eines Sonderforschungsbereichs an der TU-Berlin entwickelt wurde, benutzte erstmals eine objektorientierte Simulationssprache, die die Anwendung der Vererbungsmethodik zulässt. [47]

Mit dem neuen Standard *Modelica*, welches eine offene Simulationssprache definiert, wird die Simulationsbeschreibung von der Compilation des Modells formal getrennt. Für *Modelica* existiert ein kommerzieller Löser (*Dymola*¹⁰). *MERZ* [43] entwickelte im Rahmen seiner Arbeit eine Gebäudebibliothek für *Modelica*, die auf Modellbeschreibungen von Feist [19] und *TRNSYS* beruht. Mit der Verwendung objektorientierter mathematischer Beschreibungsformen verspricht man sich von der Wiederverwendung erprobter und validierter Komponenten eine Qualitäts- und Effizienzsteigerung.

Das Problem aller Simulationswerkzeuge ist aber die hohe Komplexität, die eine dauerhafte Wartung der Modelle erfordert. Die Implementierung sollte über eine dauerhafte Standardisierung verfügen. Dies erklärt die derzeit hohe Dominanz von Fortran bei der Implementierung von Modellen. Eine Programmierung in ANSI-C-Code verspricht eine ähnlich hohe Verfügbarkeit.

⁵<http://www.transsolar.com/ts/software/trnsys/sd/trnsd.htm>

⁶<http://www.smilenet.de/>; <http://www.dezentral.de/smile/index.html>

⁷<http://www.colsim.org>

⁸http://www.sij.fh-aachen.de/projekt_energiesysteme/carnot_1.shtml

⁹<http://www.esru.strath.ac.uk/Programs/ESP-r.htm>

¹⁰<http://www.dynasim.se>

Für die simulationsbasierte Entwicklung von Regelungssoftware sind bei der Auswahl der richtigen Simulationstools folgende Kriterien wichtig:

- hohe Zeitauflösung (im Sekundenbereich), Abbildung hoher Dynamik
- Jahreshorizontkalkulationen bei vertretbarer Berechnungszeit
- Einbindung von ANSI-C-Modellen (prozedural), um μ Controller geeigneten Code zu erstellen
- Hohe Flexibilität in Struktur und Parametrierung
- Integration von neuen Modellen
- Validierte Teilmodelle aus Messungen und Cross-Validation
- offenes und plattformunabhängiges Programm (Public Domain, keine Lizenzen, freie Compiler für unterschiedliche Plattformen)

Aus diesem Grund wurde das eigens zur Untersuchung von regelungstechnischen Problemstellungen konzipierte Simulationsprogramm *ColSim* gewählt. Es vereint verifizierte und validierte Systemkomponenten aus Gebäude und Anlage, mit der Möglichkeit, der flexiblen Erweiterung des offenen Programm-Codes, hinsichtlich der gestellten Aufgabenstellungen, die mit der Untersuchung der Wärmeflussregelung an solaroptimierten Wohngebäuden mit besonderen Komponenten gegeben ist.

1.2.2 Bewertung Regelungsalgorithmen

EISENMANN [16] fasst in ihrer Untersuchung über die Notwendigkeit eines angepassten Heizsystems in Niedrigenergiehäusern folgendes zusammen: “Heizsysteme sind jedoch weiter verbesserungsbedürftig und verbesserungsfähig. Teilsysteme, d. h. einzelne Komponenten, müssen weiter verbessert werden. Wesentlich ist aber, dass von der Entwicklung von Teilsystemen auf komplette Heizsysteme umgedacht wird, die als Ganzes optimiert werden müssen”. [16]

Die Notwendigkeit übergreifender und angepasster Regelungskonzepte ist somit die Folge der Entwicklungen im Wohnungsbau. Bei geringer werdendem Heizenergiebedarf werden innere und vor allem solare Wärmegewinne bedeutungsvoller. Die bedarfsgeführte Wärmeabgabe¹¹ zur Einstellung des optimalen Raumklimas tritt in den Vordergrund.

Wissenschaftliche Untersuchungen zur optimalen Einstellung des Raumklimas unter Berücksichtigung übergreifender Leitkonzepte finden sich in vielen Arbeiten wieder:

Eine Raumklimakonditionierung für Gebäude mit totzeitbehafteter TWD¹²-Wandheizungssystemen wurde von WILKE [77] umgesetzt. Ziel der Regelung ist ein optimales Raumklima bei maximalem Solargewinn. Bei dieser Untersuchung wurde speziell der Einfluss von TWD-Systemen untersucht.

¹¹Unnötige Raumtemperaturerhöhung durch das Heizsystem über den Sollwert hinaus bedeutet einen Energieverlust[16].

¹²Transparente Wärmedämmung

KLINGNER entwickelte [38] ein Regelungskonzept zur bedarfsgerechten Steuerung des Raumluftzustandes. Die Sollwertvorgabe für eine konventionelle Heizung, einer dezentralen Be- und Entlüftung und einer Verschattung resultiert aus einer wissensbasierten Strategie, die Erfahrungswissen nutzt, um Heizung und Lüftung energieeffizient und vorausschauend einzusetzen. Die Untersuchungen betreffen Gebäude im Niedrigenergiehausstandard. Als äußere Störgröße wird lediglich die Umgebungstemperatur berücksichtigt. Der Einfluss der erhöhten passiven Gewinne für solare Gebäude kommt hierbei nicht zum Tragen. Die Grenzwerte zur Festlegung des Behaglichkeitsfeldes sind scharf, d. h. das Konzept berücksichtigt nicht die Unschärfe des Komfort-Empfindens.

An diese Stelle treten Untersuchungen von Regelungskonzepten, die eine Fuzzy-Methodik zur Sollwertvorgabe nutzen. In den Arbeiten von SANTA und BERNARD [56, 3] wird ein Konzept zur Komfort-Ökonomie-Gewichtung vorgestellt. Während in [56] die Kriterien noch implizit in den Fuzzy-Regeln enthalten sind, gibt [3] dem Nutzer eine einfache Einstellmöglichkeit zur Hand, mit der der Regelung die Gewichtung des Komfort/Ökonomie-Anspruches bekannt gegeben wird. BERNARD erweitert zudem das Abhängigkeitsfeld zur Bestimmung des Komfortempfindens. Bisherige Betrachtungen berücksichtigten meist nur die Raumtemperatur. Die Einflussgrößen wurden in dieser Arbeit um die relative Feuchte, die Luftqualität und um Zugserscheinungen erweitert.

Wiederum treffen diese Untersuchungen für hoch gedämmte Wohngebäude zu. Unberücksichtigt blieb jedoch die notwendige Verschattung für Räume mit Südausrichtung. Damit verbunden ist die Vermeidung von Überhitzung gerade im Sommer. Das erweiterte Verhalten des Gebäudes bezüglich der passiven solaren Gewinne und der nichtlinearen Wärmespeicherung (PCM), wie auch der transparenten Wärmedämmsysteme (TWD) ist im Simulationsmodell, wie auch in der Regelung nicht integriert.

Erste Untersuchungen zur vorausschauenden, thermischen Regelung von Gebäuden sind von LUTE und VAN PAASSEN [41] (1988), FERGUSON [21] (1990) und Erker [17] (1992) gemacht worden. Die Ansätze verfolgen die Integration der Wetterprognose in die Regelung des Heizkreises oder der aktiven Kühlung. Durch prädiktives Heizen oder Kühlen des Büroraumes, kann der Raum unter dem Störeinfluss des Klimas innerhalb des Komfortfeldes gehalten werden [21]. Die Untersuchungen in [21] wurden nur für die Heizperiode durchgeführt. Es ergaben sich erhebliche Energieeinsparungen von 27 % für die Heizperiode. In einer sehr sonnigen Woche mitten im Winter betrug die Energieeinsparung sogar 35 %. An bewölkten Tagen war der Energieverbrauch im Vergleich zu einer konventionellen Regelung identisch.

In Fortsetzung der Entwicklungen von FERGUSON wurden von KRAUS et al. [46] entsprechende Untersuchungen für reale Gebäude vorgenommen. Basierend auf der Wetterprognose ließen sich bis zu 20 % (Simulation) an Energie einsparen. Die Aussagen zu den experimentellen Tests sind weniger deutlich. Hier wird von einer guten Akzeptanz des Reglers durch den Nutzer gesprochen. In den Regler integriert wurde ein selbstlernender, neuronaler Fuzzy-Algorithmus. Vorteil dieses Konzeptes ist die Selbstanpassung an das zu regelnde System und der damit reduzierten Zeit der Inbetriebnahme.

Spätere Ansätze zur Raumklimaregelung nutzen das Verfahren des *Internal Model Control* (IMC), dabei wird das Modell Bestandteil des Reglers. Dieses Verfahren eignet sich

besonders zur Vorhersage von Zustandsgrößen über einen Prädiktionshorizont. In den Untersuchungen von VIRK und LOVEDAY (u. a. in [72]) wird das reglerinterne Modell als ein prädiktiver “ON/OFF-Controller” eingesetzt, der zudem noch die wichtige Aufgabe der Fehlerdiagnose verfolgt. Diese Untersuchungen wurden jedoch für Mehrzonenbüromodelle gemacht, die erhöhte solare Gewinne nicht berücksichtigen. Das integrierte Modell ist komplex und mit einer großen Anzahl von Parametern versehen. Das Konzept verfolgt damit noch nicht die Adaption auf reale Regelungssysteme, die in Wohngebäuden eingesetzt werden.

1.3 Zielstellung und Aufbau der Arbeit

Die Literaturdiskussion zeigt, dass die Entwicklung komplexer Regelungskonzepte bisher vornehmlich für Nutzgebäude (nicht Wohngebäude) stattfand. Integrale Regelungsansätze, die das Verhalten moderner Wohngebäude im Bezug auf die erhöhten passiven, solaren Gewinne berücksichtigen, fehlen.

Mit der Kombination der Fuzzy-Logik zur Abbildung des unscharfen Empfindens des Menschen bezüglich seiner individuellen Behaglichkeit und einem Prädiktor, der den Raumzustand vorhersagt, wird im folgenden die Wärmeversorgung von solaroptimierten Wohngebäuden untersucht.

Ziel der Simulation ist, das nichtlineare thermische Verhalten des Gebäudes hinreichend genau abzubilden. Durch Erstellung eines Gebäudemodells mit hoher Flexibilität¹³ innerhalb dieses Simulationsprogramms, lässt sich das Verhalten eines Gebäudes unter Einfluss der Klimagrößen, dem Nutzerverhalten und der Anlageneigenschaften modellieren. Das Simulationswerkzeug muss für die regelungstechnischen Untersuchungen die Fähigkeit besitzen, dynamische Vorgänge in einer hohen zeitlichen Auflösung abzubilden. Auf dieser Grundlage werden integrale Regelungen entwickelt, die eine Optimierung des Solarenergieeintrages ermöglichen.

Neben den optimierten Solarerträgen, muss aber der Nutzer des Gebäudes und dessen individueller Komfortanspruch berücksichtigt werden. So baut sich ein Spannungsfeld zwischen Ökonomie und Komfort auf. Die integrale Regelung muss dieses Problem berücksichtigen und den geforderten Komfortanspruch des Bewohners durch optimale, möglichst verlustfreie Verteilung der Wärme erreichen.

Kapitel 2 dient der Erläuterung von Materialien und Konzepten im solaren Wohnungsbau, die in dieser Arbeit Berücksichtigung finden. Es wird verdeutlicht welchen Stellenwert die integrale Planung hat und wie der Stand der Technik ist. Die hohe Technisierung eröffnet neue Aspekte und Lösungen zur Optimierung des Gesamtsystems Gebäude und Anlage sowie die Entwicklung transparenter (für den Nutzer durchschaubarer) Visualisierungskonzepte. Des Weiteren befasst sich das Kapitel mit den physikalischen Prozessen im Gebäude

¹³Das Gebäudemodell muss die Eigenschaft besitzen, unterschiedlichen Wandaufbau abzubilden, entsprechend der verwendeten in einer hohen Vielfalt existierenden Fassade.

und bildet den theoretischen Hintergrund zur Modellbildung. Anhand der Simulationsumgebung *ColSim* wird das Gebäudemodell erläutert. Die erforderliche Modellbildung für Raum und insbesondere der Wandelemente wird beschrieben.

Kapitel 3 greift das bestehende Gebäudemodell auf und untersucht es auf seine Aussagekraft durch eine sogenannte “Cross-Validation” mit anderen etablierten Programmen. Zudem beschreibt Kapitel 3 die Entwicklung der erforderlichen Teilmodelle, der neuartigen Fassadenkomponenten (TWD, PCM, schaltbare Verglasung) und die notwendigen Anpassungen für den Heizkreis. Ergänzend erfolgen jeweils Abschnitte zur Validierung des Teilmodells auf Basis von Messwerten aus Feldversuchen. Anschließend wird ein Gesamtmodell eines solaroptimierten Wohngebäudes aufgebaut und untersucht.

In Kapitel 4 wird ein komplexer Regler entworfen: Ein in den Regler integriertes reduziertes Modell wird als Prädiktor eingeführt. Der eigentliche Stellsignalgeber ist eine Steuereinheit mit Fuzzy-Logik, die entsprechend des Zustandes und der Vorhersage die Verschattung, die Nachtlüftung und den Heizkreis führt.

In Kapitel 5 werden die Simulationsergebnisse diskutiert, es wird ein Vergleich zu herkömmlichen Regelungen hergestellt und Aussagen über die Wirksamkeit komplexer Wärmeflussregelungen gegeben.

Kapitel 6 fasst die Ergebnisse zusammen und vermittelt Anregungen für weiterführende Untersuchungen.

Ergänzend finden sich in Anhang A weiterführende Beschreibungen zur Simulationsumgebung *ColSim*. Anhang B ist der Darstellung der BESTEST-Vergleichsmethode gewidmet, die zur Programmvalidierung herangezogen wurde. Ein Teil der begleitenden Untersuchungen in einem realen Mehrfamilien-Niedrigenergiehaus werden in Anhang C beschrieben.

Kapitel 2

“Solares Bauen” und Grundlagen zur Modellbildung

Die Simulation ist heutzutage zu einem wichtigen Werkzeug in der Analyse komplexer dynamischer Systeme geworden [45]. Grundlage für Simulationsrechnungen ist die Entwicklung mathematischer Modelle. Mittels Analyse der Modelle von natürlichen und technischen Systemen, können allgemeine Aussagen über den dynamischen Betrieb des zu untersuchenden realen Systems gemacht werden. Untersuchungen zu Grenzbereichen und neuer Prozessabläufe werden möglich.

Die Modellbildung wird anhand der erforderlichen Systemkomponenten beschrieben. Es werden die physikalischen Gesetzmäßigkeiten betrachtet und in thermische Ersatzschaltbilder übertragen. Die Simulationsumgebung für die folgenden Untersuchungen ist *ColSim*, die alle Voraussetzungen zur Modellierung komplexer Regelungssysteme erfüllt.

Zuerst wird jedoch näher auf die Konzepte zum “Solaren Bauen” und der damit veränderten Gebäudereaktion auf Klimaeinflüsse eingegangen. Dabei werden die in dieser Arbeit behandelten, modernen Fassadenkonstruktionen erläutert. Die primäre Aufgabe der Regelung ist die Erhaltung des geforderten Raumklimas, in Kapitel 2.1.4 wird die thermische Behaglichkeit und die Raumluftqualität beschrieben.

2.1 “Solares Bauen”

Das “Solare Bauen” beinhaltet die integrale Planung und Realisierung von Gebäuden unter Berücksichtigung des optimalen Einsatzes von passiver und aktiver Solarenergienutzung zum Heizen und Beleuchten. Gesetzliche Vorgaben, wie z. B. die Umstellung der Wärmeschutzverordnung von 1995 (WschVo‘95) auf die aktuell eingeführte Energieeinsparverordnung von 2002 (EnEV‘02) erfordert nicht mehr nur die Reduktion des Heizwärmebedarfs, sondern die Reduktion des Primärenergiebedarfs. Die Folge ist, dass die Solarenergienutzung am Gebäude an Bedeutung gewinnt. Solare Gewinne reduzieren den Primärenergiebedarf, ohne dass der Heizwärmebedarf sinken muss. Die Aspekte der Solararchitektur, werden dadurch gefördert. Die Abbildung 2.1 zeigt den Wärmebedarf von Wohngebäuden un-

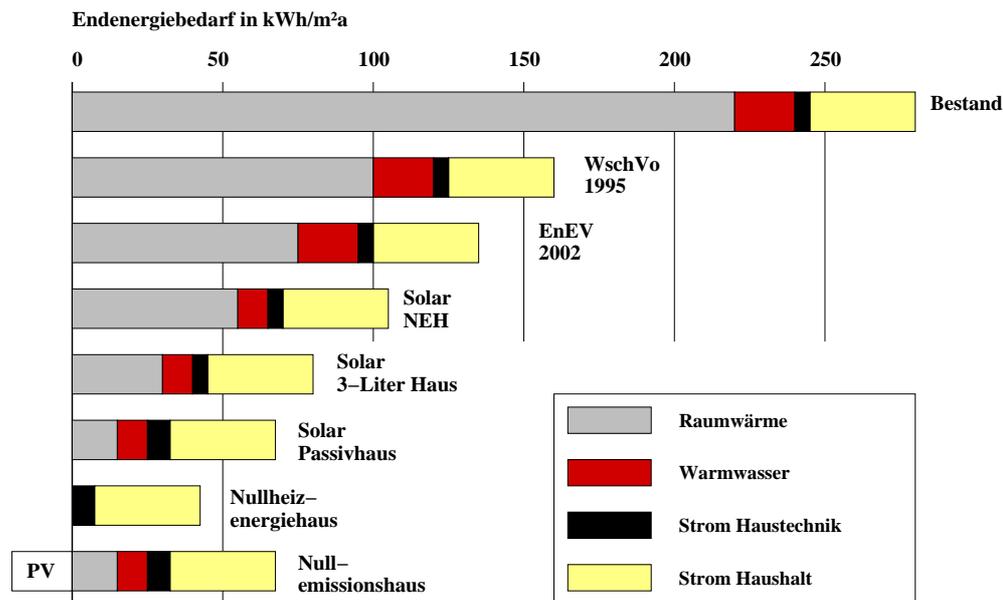


Abbildung 2.1: Der Wärmebedarf in kWh/m^2a von Wohngebäuden mit unterschiedlichen Dämmstandards und Solartechnik im Vergleich. (Quelle: Fraunhofer ISE)

terschiedlicher Standards. Die Darstellung zeigt den Wärmeenergieeinsatz im Gebäudebestand bis zu neuartigen Gebäuden, die durch neue Materialien und Technologien realisierbar geworden sind.

Der Erfolg der Wärme- und der elektrischen Energieversorgung von Gebäuden durch die Sonne, hängt stark von den klimatischen Bedingungen ab. Die Berücksichtigung der klimatischen Einflüsse und der Wechselwirkung zwischen natürlichem Energieangebot und dem Energiebedarf des Gebäudes, ist gerade aus Sicht des "Solaren Bauens", unerlässlich. Kenntnisse über die regionalen Klimadaten und die Wahl des Grundstücks sind für den Planungsprozess notwendig.

Im Folgenden werden Entwicklungen der aktuellen Forschungsarbeit im Bereich der passiven Solarenergienutzung dargestellt. Es werden jene Entwicklungen erläutert, die im Gegensatz zu aufwendigen Doppelfassaden oder Multifunktionsfassaden, auch mit verhältnismäßig niedrigem Aufwand im Wohnungsbau eingesetzt werden können.

Parallel zu den Entwicklungen im passiven Bereich werden aktive Solaranlagen nicht mehr ausschließlich zur Trinkwassererwärmung eingesetzt, sondern auch zur solaren Heizungsunterstützung. In der Kombination von aktiven und passiven Solarkomponenten liegt die Chance, den solaren Eintrag durch ein integrales Regelungskonzept dem Bedarf anzupassen.

2.1.1 Gebäudereaktion auf Sonneneinstrahlung

Während der Heizperiode wird traditionell der Wärmebedarf eines Gebäudes zur Aufrechterhaltung behaglicher Raumtemperaturen größtenteils durch die Gebäudeheizung gedeckt.

Zusätzliche Wärmequellen sind sogenannte innere Wärmequellen, wie Menschen und Elektrogeräte. Durch die Erhöhung der passiven solaren Gewinne mit zusätzlichen Baumaßnahmen¹ kann eine Reduktion, der für die Gebäudeheizung aufgewendeten Energie erreicht werden. Das Gebäude wird allerdings auch empfindlicher gegenüber Überhitzungseffekten.

Um den Einfluss der Solarstrahlung auf die Heizleistung eines Gebäudes zu verdeutlichen, zeigen die Abbildungen 2.2 und 2.3 Auswertungen von Messdaten unterschiedlicher Ge-

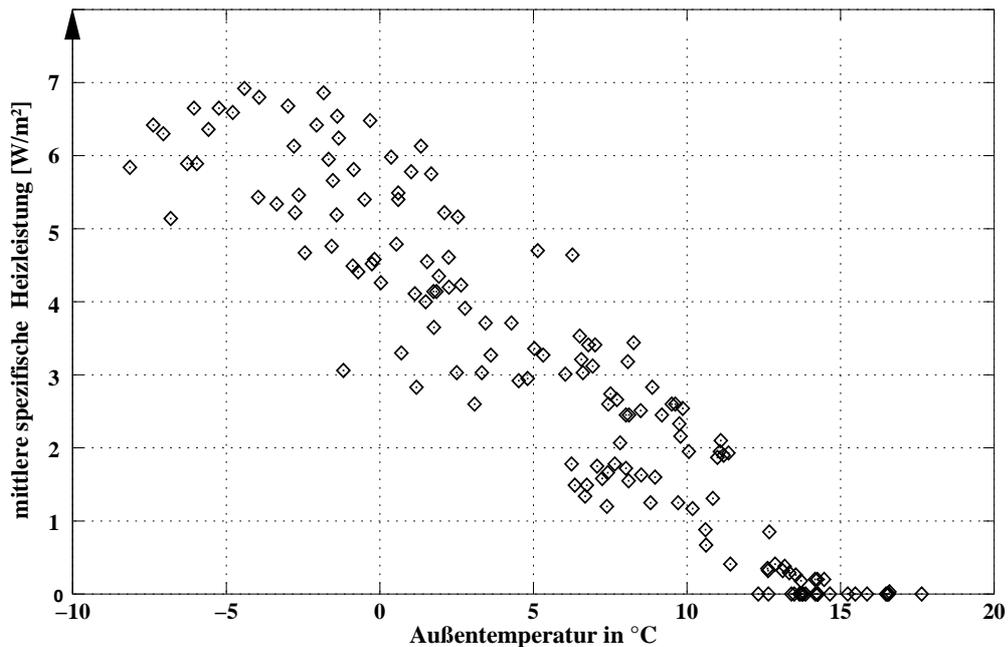


Abbildung 2.2: Gemessener Tagesheizenergiebedarf eines modernen sehr gut gedämmten Wohngebäudes mit **geringen** passiven solaren Gewinnen, in Abhängigkeit der Außentemperatur.

schosswohnungsbauten nach modernen planerischen Aspekten. Abbildung 2.2 zeigt ein Gebäude, welches nur geringe passive solare Gewinne realisiert. Man erkennt eine leichte Streuung der spezifischen Heizleistung (Ordinate) in Abhängigkeit der Außentemperatur (Abszisse). Es lässt sich ein klarer Zusammenhang zwischen Außentemperatur und aufgewendeter Heizenergie feststellen. Die Messdaten spiegeln die Heizkennlinie des Gebäudes wider.

Die Abbildung 2.3 zeigt den selben Zusammenhang für ein Mehrfamilienhaus, welches durch Einsatz von transparenter Wärmedämmung, einer optimalen Ausrichtung des Gebäudes und ohne größere Verschattungen der Südfassade durch die Umgebung mit erhöhten passiven Solargewinnen realisiert ist. Die Streuung der Heizleistung ist deutlich größer und die Regressionsgeraden für die täglichen Einstrahlungsklassen zeigen, dass an Tagen mit hoher Einstrahlung die Heizkennlinie flacher wird und die spezifische Heizenergie deutlich sinkt. Es fällt auf, dass Tage mit kalter Außentemperatur geringen Wärmebedarf haben.

¹beispielsweise durch große Glasflächen

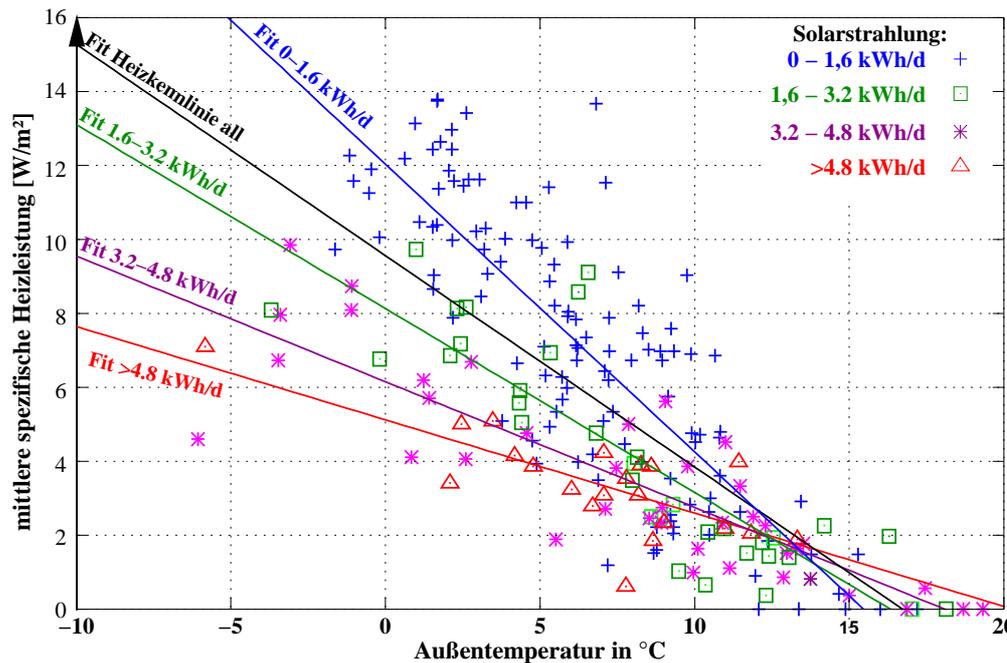


Abbildung 2.3: Gemessener Tagesheizenergiebedarf eines modernen sehr gut gedämmten Wohngebäudes mit **erhöhten** passiven solaren Gewinne, in Abhängigkeit der Außentemperatur und der Solarstrahlung.

Dies entspricht der Erfahrung, dass kalte Wintertage mit einem klaren Himmel und Sonnenschein einhergeht. Hier kann das solaroptimierte Gebäude den Heizenergieaufwand am deutlichsten reduzieren.

Aus den Diagrammen lässt sich ableiten, dass solaroptimierte Gebäude neben der Außentemperatur auch den Strahlungseintrag zur Heizungsregelung berücksichtigen sollte. Eine ausführlichere Auswertung zur Gebäudedynamik eines solaroptimierten Mehrfamilienhauses wird im Anhang C dargestellt.

2.1.2 Moderne Fassadenkonstruktionen

Wichtigste Aufgabe der Gebäudehülle ist in unseren Breitengraden neben dem Schall-, Licht-, Wetter-, und Sichtschutz der Wärmeschutz. Die Gebäudehülle mit ihren Fassadenkonstruktionen stellt die Schnittstelle von Innenraum und Außenumgebung dar. Sie kann zur Absorption, Speicherung und Verteilung der Solarenergie herangezogen werden. Abbildung 2.4 zeigt eine Kombinationsmöglichkeit für einen Raum mit modernen Fassaden- und Wandelementen. Die Darstellung dient der Ansicht, für die im Folgenden erläuterten Systeme.

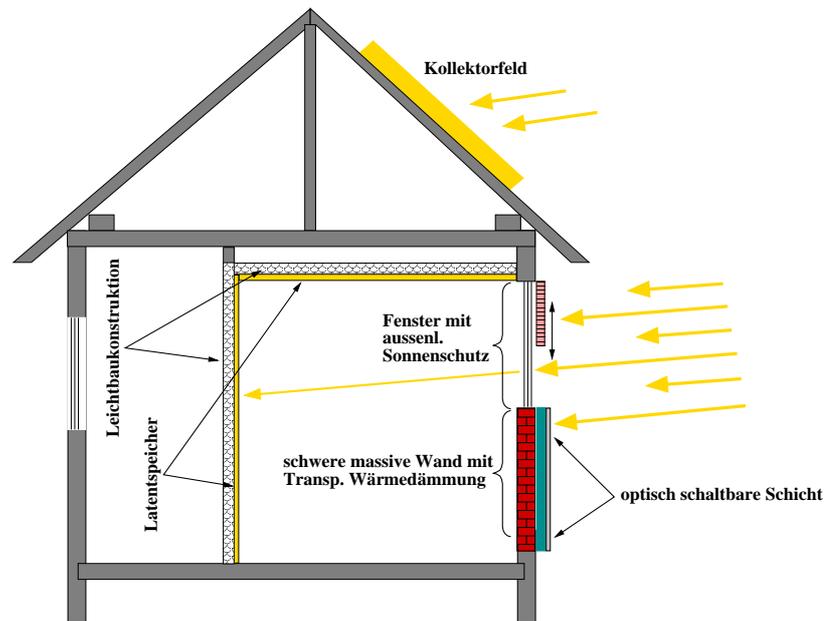


Abbildung 2.4: Vereinfachte Darstellung einer exemplarischen Kombination von transparenter Wärmedämmung (TWD), optisch schaltbarer Schicht, Phasenwechselmaterial (PCM) und Fenster mit außen liegendem Sonnenschutz.

2.1.2.1 Hochwertige Fenster

Fenster und Verglasung sind wesentliche Bestandteile eines Gebäudes. Hier treten bedeutende Transmissionsverluste auf. Im Allgemeinen ist der Wärmedurchgangskoeffizient U_w durch die Verglasungsqualität bestimmt, aber auch der Fensterrahmen hat einen bedeutenden Einfluss. So muss nach der neuen DIN EN ISO 10077 jeweils ein Wärmedurchgangskoeffizient für die Rahmenprofile (U_f) und die Verglasung (U_g) bestimmt werden. Daraus resultiert der U_w -Wert des gesamten Fensters. Dieser Wert ist von der Größe des Fensters abhängig. Bei modernen Fenstern wird ein niedriger U_w -Wert angestrebt. Je nach Gasfüllung und Anzahl der Glasschichten (2-fach oder 3-fach Verglasung) sowie der Qualität der Rahmenkonstruktion kann für Wärmeschutzverglasung ein U_w -Wert zwischen 1,3 und 0,7 W/(m²K) erreicht werden². Einfache Isolierverglasung erreicht nur einen Wert von 2,9 W/(m²K).

Die Transmission von Licht (sichtbarer Bereich) und Solarstrahlung (Energie zur Raumheizung) ist abhängig von den verschiedenen Verglasungsarten. Sie ist bestimmt durch die optischen Eigenschaften der Fenster. Der g-Wert (Gesamtenergiedurchlassgrad) gibt den Anteil der Solarstrahlung auf ein Fenster an, der zu passiv-solaren Energiegewinnen führt. Je nach Wärmeschutzbedarf ist dieser Faktor bei hochwertigen Fenstern kleiner 0,5, während er bei einfacher Isolierverglasung im Bereich von 0,7 - 0,8 liegt. Die Transmission von Licht im sichtbaren Bereich beschreibt der Parameter τ . Er bewegt sich im Bereich von 53 - 90 %. Die Tabelle 2.1 fasst die Kennwerte der Fenstertypen zusammen.

²Der geforderte Grenzwert für die Wärmeschutzverglasung von Passivhäusern ist 0,8 W/(m²K). Die Werte beziehen sich auf Fenster mit Außenabmessungen von 1480 mm x 1230 mm.

Fenstertyp	Wärmedurchgangswert U_w -Wert [$\frac{W}{m^2 K}$]	Lichttransmission τ	Gesamtenergiedurchlassgrad g-Wert
1-fachverglasung	> 5,0	0,94	0,90
Isolierverglasung	2,6 - 3,0	0,79	0,77
3-fachverglasung	2,0	0,71	0,60
Wärmeschutzvergl.	0,7 - 1,3	0,70	0,53 - 0,62

Tabelle 2.1: *Typische Kennwerte für Verglasungen.*

Die energetischen Eigenschaften moderner Verglasungen tragen nur noch im geringen Teil zum Verlust thermischen Komforts (Winterfall) bei. Die sogenannte Strahlungsasymmetrie, die bisher mit dem Plazieren eines Heizkörpers unter dem Fenster ausgeglichen wurde, tritt nicht mehr auf. Die großen Fensterflächen, die in jüngster Zeit im Trend der Architekten liegen, führen zu hohen Strahlungserträgen bei geringen Transmissionsverlusten. Im Sommer führt die großflächige Verglasung zu unerwünschten Temperaturerhöhung in den Räumen. Wirksame Sonnenschutzsysteme können diese Überhitzung verhindern.

2.1.2.2 Sonnenschutzsysteme

Der in der passiven Solararchitektur typische Einsatz großflächiger, transparenter Flächen, erfordert in der Regel (sofern Überhitzungen vor allem im Sommer vermieden werden sollen) einen wirksamen Sonnenschutz. Dieser Sonnenschutz kann in vielfältiger Weise ausgeführt werden. Je nach Bedarf und Ausführung wird zwischen starren und flexiblen Sonnenschutzsystemen unterschieden. Optische Systeme nutzen alternativ die Eigenschaft der Lichtlenkung oder der Lichtabsorption. In der Regel hängt die Auswahl des Systems von der zu reduzierenden Wärmemenge und der Kühllast im Sommer ab. Des Weiteren soll eine hohe Ausbeute des Tageslichtes, Vermeidung von Blendung und ein maximaler Energiegewinn im Winter erreicht werden.

Starre Verschattungssysteme sind oftmals durch Balkone, Dachvorsprünge oder Seitenwände gegeben. Es können aber auch extra Elemente sein, die horizontal oder vertikal über oder neben dem Fenster angebracht sind. Die Wirksamkeit solcher starrer Elemente ist abhängig von ihrer Ausladung im Verhältnis zur Fassadenöffnung[54]. Starre Blenden nutzen den jahreszeitlichen Sonnenlauf aus. Nachteil ist die einmal festgelegte Einschränkung der Sicht nach außen und das feste Verhältnis zwischen Verschattung und Lichteinfall.

Bei den flexiblen Verschattungssystemen wird zwischen außen und innenliegenden (auch Fensterzwischenraum) unterschieden. Die Ausführungen sind vielfältig. Zur weiteren Erläuterung und der Beschreibung der Einsatzgebiete wird auf weiterführende Literatur verwiesen. [42, 54]

Optisch schaltbare Verglasung

Optisch schaltende Schichten eröffnen die Möglichkeit, kostengünstiger, großflächiger optisch schaltbarer Fassadenelemente, die mechanisch verstellbare Verschattungseinrichtungen, wie z. B. Rollos oder Jalousien in punkto Zuverlässigkeit und Preisgünstigkeit bei wei-

tem übertreffen können. Dies macht die optische schaltbare Verglasung auch interessant für den Wohnungsbau.

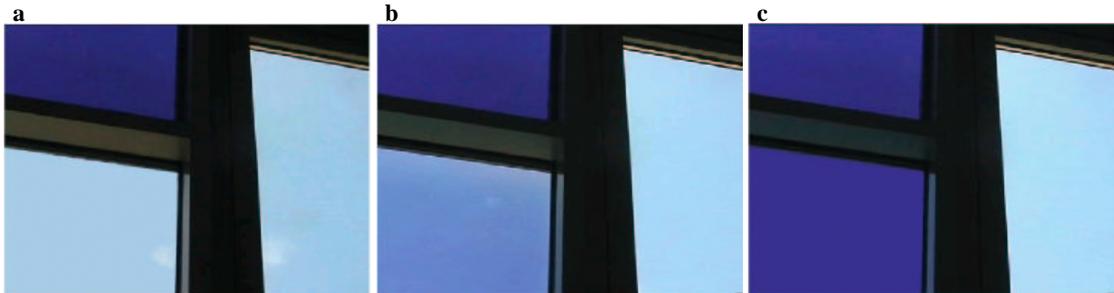


Abbildung 2.5: Gaschrome Verglasung in verschiedenen Schaltzuständen: Rechts jeweils eine unbeschichtete Standardverglasung, links oben jeweils die gaschrome Verglasung im maximal gefärbten Zustand, links unten die gaschrome Verglasung: a) klar, b) teilweise gefärbt, c) stark eingefärbt. (Quelle: Fraunhofer Gesellschaft-ISE)

Optisch schaltende Schichten sind (in der Regel auf Glas aufgebraute) Schichten, die ihre optischen Eigenschaften ändern, wenn sich Einstrahlung, Umgebungstemperatur oder eine angelegte Spannung verändert. Man unterscheidet zwischen photochromen, elektrochromen, gaschromen, thermochromen und thermotropen Schichten. In diesem Kontext wird auf elektro- und gasochrome Systeme eingegangen, da sie für Regelungssysteme relevant sind³: Abbildung 2.5 zeigt verschiedene Schaltzustände einer gaschrome Verglasung.

- Elektrochrome Schichten basieren auf Materialien, die durch reversible Einlagerungen von Ionen (H^+ , Li^+ , Na^+ , K^+) ihre optischen Eigenschaften ändern (z. B. Wolframoxyd). Die Absorption der vorher klar erscheinenden Schicht nimmt zu, die Schicht wird dunkler. Die Einlagerung erfolgt auf elektrochemischem Weg durch Anlegen einer Schaltspannung, die nur dann angelegt werden muss, wenn die optischen Eigenschaften sich ändern sollen.
- Bei gasochromen oder auch katalytisch schaltenden Schichten erfolgt diese Einlagerung durch die Reaktion mit atomarem, an einer Katalysatoroberfläche gespaltenen Wasserstoff. Die Funktionsschicht ist auch hier ein elektrochromes Material (Wolframoxyd). Die Eintrübung wird jedoch nicht durch Anlegen einer Spannung erzielt, sondern durch den Kontakt mit einem sauerstofffreien Wasserstoffgasgemisch. Die Rückreaktion erfolgt über ein wasserstofffreies Sauerstoffgasgemisch.⁴ Die Wasserstoff- und Sauerstoffversorgung kann als geschlossenes System -samt Recycling des Endproduktes Wasser- vollständig in die Fassadeneinheit integriert werden[5].

³Die anderen Schichten schalten aufgrund der Strahlungsintensität oder aufgrund der Temperatur. Ein aktives Schalten ist nicht möglich.

⁴Zum Färben wird Argon-Gas, welchem $H_2 < 2\%_{vol}$ zugesetzt ist, zum Entfärben Argon-Gas, welchem $O_2 < 2\%_{vol}$ zugesetzt ist, eingesetzt.

Mit diesen Techniken lässt sich die Transmission stufenlos verändern, wobei die Durchsicht immer erhalten bleibt. Prototypen am Fraunhofer-ISE verfügen über einen Schaltbereich der Lichttransmission von 14 % bis 74 %. Der Maximalwert entspricht beinahe dem typischer Klarverglasungen. Die Schaltung des g-Wertes bewegt sich im Bereich von 0,12 bis 0,5.⁵

2.1.2.3 Transparente Wärmedämmung

Der Entwicklung der „Transparenten Wärmedämmung“ (TWD) ging die sogenannte Trombé-Wand voraus. Das von Felix Trombé 1977 erstmals beschriebene Prinzip [67], besteht in der direkten Umwandlung von Solarenergie durch Absorption solarer Strahlung an der Außenwand eines Gebäudes. Durch eine Einfachverglasung hindurch trifft Sonnenstrahlung auf eine schwarze Fassade. Die auf der Wandoberfläche entstehende Wärme gelangt durch Wärmeleitung durch die Wand hindurch verzögert in den Wohnraum.

Die bei diesem System auftretenden hohen Wärmeverluste konnten durch die Entwicklung sogenannter *Transparenter Wärmedämmung* (TWD) stark vermindert werden. Diese Materialien basieren häufig auf Waben und Kapillarstrukturen, deren Aufbau senkrecht auf der Absorberebene steht. Sie werden von der Sonnenstrahlung durchdrungen, unterbinden aber Konvektions- und Strahlungswärmeverluste weitgehendst. Eine beispielhafte Darstellung zeigt Abbildung 2.6. Mit TWD-Elementen ausgerüstete Wände sind Nettogewinnflä-

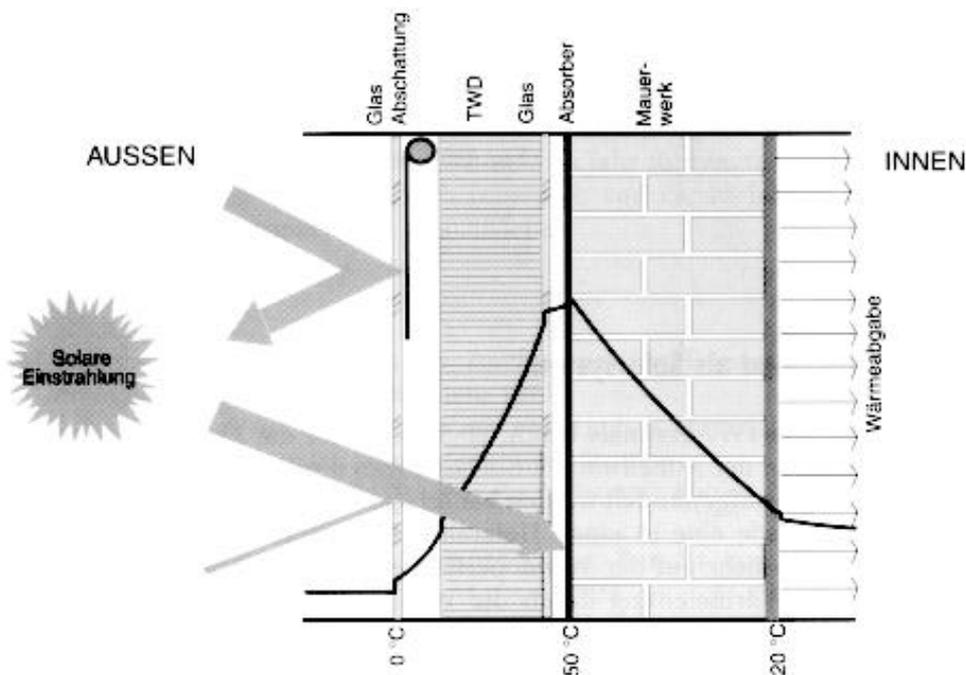


Abbildung 2.6: Aufbau einer Wand mit transparenter Wärmedämmung als passives Fassadenelement. (Quelle: [68])

⁵Diese Werte variieren bezüglich der Systemtechniken zur optischen Schaltung der Verglasung.

chen. Typischerweise trägt eine nach Süden orientierte TWD-Wand 50-150 kWh/m^2a zur Deckung der Verluste der anderen Bauteile und der Lüftungswärmeverluste bei.

TWD-Strukturen werden auch als Tageslichtelemente eingesetzt. Ihre streuende Eigenschaft sorgt für eine tiefe Ausleuchtung von Räumen, die mit Fenstern nicht erreicht wird. Somit kann der Kunstlicheinsatz reduziert werden⁶. Es besteht auch die Möglichkeit TWD-Elemente mit aktiven Systemen zu kombinieren. So gibt es einige Kombinationen mit diversen Kollektortypen wie z. B. Systeme zur Luftvorwärmung, Speicherkollektoren bis hin zur Erzeugung von Prozesswärme durch Flachkollektoren.

Weitere Möglichkeiten die TWD-Elemente konstruktiv in Bauteile zu integrieren und Beispiele zu deren Realisierung werden in [68] beschrieben.

2.1.2.4 Phasenwechselmaterial im Wandverbund

Phasenwechselmaterialien (PCM) oder auch Latentwärmespeicher finden zunehmend in unserer Umgebung Verbreitung⁷. Dieses Material nutzt die Enthalpieänderung beim Phasenübergang (z. B. fest -> flüssig) zur Speicherung von Wärme bei nahezu konstanter Temperatur. Dieser Vorgang ist reversibel, so dass auch beim umgekehrten Aggregatswechsel bei einer konstanten Temperatur wieder Wärme abgegeben wird.

Der bekannteste Wärmespeicher im tägliche Einsatz ist Wasser. Der Phasenwechsel von fest nach flüssig ist bekanntermaßen bei $0\text{ }^\circ\text{C}$. Die Tabelle 2.2 zeigt die hohen Speichereigenschaften von Wasser im Vergleich zu einem PCM (z. B. Paraffin) auf. (zur Beschreibung des Paraffins siehe auch Kap. 3.2.2)

Wärmezufuhr (latent)		Wärmezufuhr (sensibel)	
Wasser fest 1 kg; $0\text{ }^\circ\text{C}$	—> 335 kW s	Wasser flüssig 1 kg; $0\text{ }^\circ\text{C}$	—> 335 kW s $c_p = 4,2\text{ kW s}/(\text{kgK})$
Paraffin fest 1 kg; $26\text{ }^\circ\text{C}$	—> 180 kW s	Paraffin flüssig 1 kg; $26\text{ }^\circ\text{C}$; c_p	—> 180 kW s $c_p = 2,1\text{ kW s}/(\text{kgK})$
			Wasser flüssig 1 kg; $80\text{ }^\circ\text{C}$ Paraffin flüssig 1 kg; $112\text{ }^\circ\text{C}$

Tabelle 2.2: Vergleich der Speichereigenschaften von Wasser und Paraffin. Deutlich wird die hohe Speicherfähigkeit, die im Phasenwechsel begründet liegt. Während beim Phasenwechsel die Materialtemperatur nicht ansteigt, bedeutet eine entsprechende Wärmezufuhr im sensiblen, flüssigen Zustand eine deutliche Temperaturzunahme.

Ähnlich des Einsatzes von PCM in der schon auf dem Markt befindlichen Kleidung, liegt es nahe, das PCM im Wohnungsbau einzusetzen. Durch Anpassung der Schmelztemperatur an den Raumtemperaturbereich und durch Einbringung dieser Materialien in Baustoffe, wird

⁶Es ist zu beachten, dass es zu einer erhöhten Blendwirkung kommen kann, die durch geeignete Maßnahmen aber klein gehalten werden kann.

⁷So werden z. B. in Sport- und Outdoor-Kleider Phasenwechselmaterialien integriert, um einen Kühl- oder Wärmeeffekt entsprechend der Bedingungen zu erreichen. Ziel ist es, eine Komfortsteigerung durch Dämpfung von Temperaturspitzen zu erreichen.

gerade in Gebäuden in Leichtbauweise fehlende thermische Masse substituiert. Momentan werden zwei Konzepte verfolgt. Das sind zum einen mikroverkapselte Wachse (Paraffine), die beispielsweise dem Putz beigemischt werden, und zum anderen Systeme auf Basis von Salzhydraten. All diese Entwicklungen verfolgen das Ziel, hohe Speicherdichten⁸ und Wärmeflüsse⁹ bei hohem Sicherheitsstandard und mechanischer Belastbarkeit für den Einsatz im Baustoff zu erreichen. Hier zeigen die Paraffine einen Vorteil gegenüber den Salzhydratmischungen. Durch die Mikroverkapselung ist ein flexibler Einsatz in Baustoffen möglich und es wird sichergestellt, dass das Latentmaterial nicht in den Baustoff gelangt und dessen Eigenschaft beeinflusst. Durch die geringe Größe der Kapseln (zw. 5 und 12 μm) ist die Gesamtoberfläche des Paraffins sehr groß. Dies bewirkt einen guten Wärmeaustausch zwischen PCM und Baustoff.¹⁰

Die Abbildung 2.7 zeigt eine Rasterelektronenmikroskopaufnahme [57] von Gipsputz mit

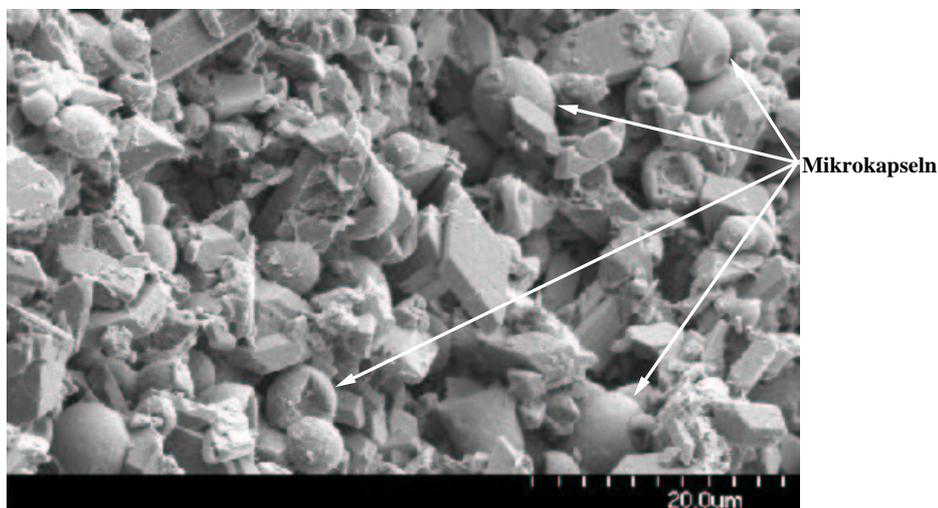


Abbildung 2.7: REM-Aufnahme von PCM-Kapseln im Gipsputz. (Quelle: Fraunhofer Gesellschaft-ISE)

mikroverkapseltem Paraffin. Die hohe mechanische Belastung der Mikroverkapseln durch die scharfkantigen Gipspartikel wird deutlich, dies stellt aber technisch kein Problem dar.

Die Erhöhung der effektiven Wärmespeicherfähigkeit¹¹ ("thermische Masse") im Gebäude in Leichtbauweise hat einige Vorteile:

- Der Temperaturverlauf in den Räumen wird gedämpft, was zu einer erhöhten thermischen Behaglichkeit führt. Insbesondere werden Temperaturspitzen geglättet.

⁸hohe Energiemenge bei geringem Volumen.

⁹großer Wärmetransport beim Be- und Entladen.

¹⁰Die Wärmeleitfähigkeit von reinen Paraffinen liegt im Bereich von $0,18 W/mK$. Dieser Wert ist für den Einsatz im Gebäude zu gering. Durch die Maximierung der Oberfläche kann diesem Problem entgegen gewirkt werden.

¹¹bei einer einstellbaren Temperatur

- Die Zeiträume mit unangenehm hohen Temperaturen werden verkürzt.
- Der Nutzungsgrad passiver solarer Gewinne wird erhöht: Da bei Sonneneinstrahlung nicht so schnell eine Überhitzung des Raumes eintritt, der man in der Regel durch Öffnen von Fenstern begegnen müsste. Die Wände speichern wesentlich mehr Wärme als normale Wände und geben sie verzögert (auch nach Sonnenuntergang) an den Raum ab. Dieser erhöhte Nutzungsgrad der solaren passiven Gewinne führt unmittelbar zum dritten Vorteil:
- Es muss weniger geheizt¹² und gekühlt werden, d. h. Energieeinsparungen sind zu erwarten.

Zu beachten ist, dass das Latentmaterial über Nacht wieder "entladen" werden muss, damit es für den nächsten Tag wieder bereit ist, "überschüssige" Wärme aufzunehmen. Baustoffe mit PCM stehen kurz vor der Markteinführung.

2.1.3 Solarunterstützte Heizanlagen

Die aktive solare Wärmeversorgung mittels Kollektor hat in den letzten Jahren zunehmend an Bedeutung gewonnen. Der Solarkollektor auf dem Dach eines Hauses zur Unterstützung der Trinkwassererwärmung ist seit langem im Einsatz und die Branche sieht einem weiter wachsenden Markt entgegen. Wurde bisher in Kleinanlagen die solare Wärme hauptsächlich zur Brauchwassererwärmung eingesetzt, so geht die Tendenz aufgrund der verbesserten und kostengünstigeren Systemtechnik und dem sinkenden Heizwärmebedarf moderner Wohngebäude hin zur solaren Heizungsunterstützung. Sogenannte "Solare Kombisysteme" steigern die solare Deckung des Wärmebedarfs weiter. Dieser zusätzliche solare Wärmefluss muss in der Wärmeflussoptimierung berücksichtigt werden.

Ein wichtiger Teil dieser Arbeit stellt daher die Wechselwirkung der Gebäuderesonanz mit der solarthermischen Heiz- und Trinkwasseranlage dar. Neben der Abbildung des thermischen Verhaltens eines Gebäudes, wird eine typische solare Heizungsanlage in das Gesamtmodell integriert und das Regelungssystem zur Wärmeflussregelung realisiert.

Zum Einsatz kommen bei solchen Anlagenkonzepten, im Gegensatz zur reinen Trinkwassererwärmung, größere Kollektorflächen und entsprechend größere Pufferspeicher. Abbildung 2.8 zeigt schematisch die Funktionsweise solcher solaren Kombisysteme. Ein zentrales Element ist der Speicher. Der Speicher ist Bindeglied aller Wärmequellen (Solarkollektor, Brenner, Wärmepumpe, ..) und Wärmeverbraucher (Trinkwasser, Heizkreis). Passend zur Anlagenkonzeption sind Speicher mit integrierten Wärmetauschern für Solarkreis und Brenner¹³ oder sogenannte Schichtenspeicher, die mittels einer Ladelanze das erwärmte Wasser entsprechend der Temperaturschichtung des Pufferspeichers einladen, am Markt verfügbar. Bei den Schichtenspeichern erfolgt die Erwärmung des Trinkwassers und der

¹²dies gilt nur, wenn die Sonnenwärme sonst nicht genutzt wird, z. B. herausgelüftet wird

¹³Dann erfolgt die Entnahme des Trinkwassers direkt aus dem Speicher. Das bedeutet, dass der Speicher aufgrund der Legionellenverordnung einmal pro Tag auf 60 °C erwärmt werden muss.

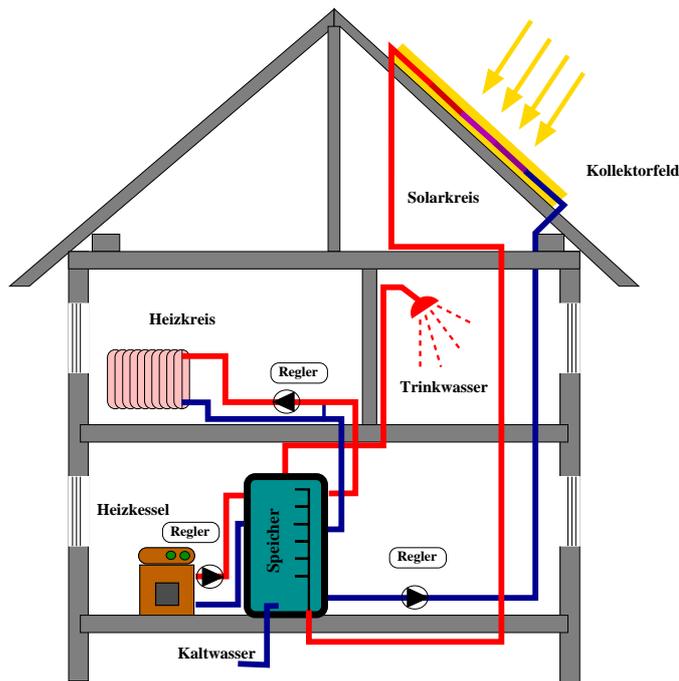


Abbildung 2.8: Vereinfachte schematische Darstellung zur Funktionsweise eines solaren Kombisystems. Entgegen der herkömmlichen Auslegung der Kollektoranlagen zur Trinkwassererwärmung werden zur Heizungsunterstützung Kollektor und Warmwasserspeicher größer ausgelegt.

Wärmeübertrag des Solarkollektors in der Regel über externe Wärmetauscher. Dieses Konzept hat zudem den Vorteil einer verbesserten Hygiene (keine Legionellengefahr), weil das Pufferwasser getrennt vom Trinkwasser ist.

Bei den Solarkollektoren werden bei diesen Konzepten in der Regel Flachkollektoren oder Vakuumkollektoren eingesetzt. Eine Beschreibung der Kollektortypen ist z. B. in [51, Kap.3.3] zu finden. Die Regelung und die Dimensionierung der Solaranlage trägt entscheidend zum solaren Deckungsanteil der Warmwassererzeugung bei.

Bei sogenannten "Low Flow"-Systemen wird der Durchsatz¹⁴ durch das Kollektorfeld deutlich (bis auf $8-10 \text{ l}/(\text{m}^2\text{h})$) abgesenkt. Dies bewirkt eine höhere Kollektoraustrittstemperatur (z. B. $75 \text{ }^\circ\text{C}$). Mit Einschichtung dieser hohen Temperaturen in den Schichtenspeicher resultieren höhere solare Deckungsraten. Entscheidend für den Nutzungsgrad des Kollektorfeldes ist das Einschaltverhalten der Umwälzpumpe, welches durch die untere Speichertemperatur bestimmt ist. Je niedriger diese ist, umso früher kann der Kollektor zur Wärmeerzeugung beitragen.

Bei Ausbleiben der Solarwärme wird die Nachheizung von einem modernen Brennwertkessel übernommen. Dieser Kesseltyp arbeitet mit einem optimierten Nutzungsgrad. Die entscheidende Größe für den Nutzungsgrad ist die Temperatur des Rücklaufs. Er kühlt das

¹⁴Zur Einstellung der Pumpendrehzahl werden zunehmend, statt der typischen Zweipunktregler, stetige Proportional- (P) und Proportional_Integral- (PI) Regler eingesetzt.

Abgas des Brenners. Nur wenn die Abgastemperatur unter den Taupunkt sinkt, kann der enthaltene Wasserdampf auskondensiert werden. Zusätzliche Energie wird nutzbar.

Im Allgemeinen hat jeder Kreis eine eigenständige Regelung. Erfahrungen und Auswertungen diverser Monitoring-Programme zeigen immer wieder ein mangelhaftes Zusammenspiel der Regelungen und damit der Systemkomponenten. Die reduzierten Lastanforderungen machen, relativ zum Gesamtverbrauch, Mängel in der Systemtechnik deutlicher. Die Qualität des Gesamtsystems Gebäude gilt es zu verbessern. Unter anderem können z. B. die Nutzungsbedingungen von niedriger Einlauftemperatur für Solarkreis und Brennwertkessel mit in der übergeordneten Regelung integriert werden, um solare Einstrahlung besser zu nutzen. (vgl. Kap. 5.2.1)

In dem Abschlussbericht des Institutes für Thermodynamik und Wärmetechnik der Universität Stuttgart [37] werden Grundlagen, Dimensionierungsfragen und Einsatzgebiete solarer Kombisysteme erörtert. "Solar Combisystems" ist ebenfalls Thema der TASK 26 der IEA-SHC¹⁵ [64]. Eine typische Auslegung für ein Einfamilienhaus nach Niedrigenergiestandard (ca. $60 \text{ kWh/m}^2 \text{ a}$ Heizwärmebedarf) mit ca. 140 m^2 Wohnfläche ist z. B. eine Flachkollektoranlage mit 15 m^2 und einem zentralen Pufferspeicher mit 1000 l .

2.1.4 Thermische Behaglichkeit und Raumluftqualität

Thermische Behaglichkeit

Die thermische Behaglichkeit ist ein Faktor, der Einfluss auf den Heiz- und Kühlbedarf von Gebäuden hat. In der Regel erfolgt die Versorgung der Räume über Regelungen, die den Raum innerhalb eines Behaglichkeitsfeldes konditionieren. Es tritt zwischen der energetischen Optimierung und dem Einhalten der Behaglichkeit ein Konflikt auf. Die Wärmeflussregelung im modernen Wohngebäude hat zum Ziel, optimale Nutzung der Solarstrahlung bei Erfüllung entsprechender Komfortkriterien zu realisieren.

Der Mensch selbst ist nicht in der Lage, die Temperatur seiner Umgebung direkt wahrzunehmen. Er empfindet jedoch den Wärmetransport, der ihm durch die Temperaturdifferenz zwischen der eigenen Körpertemperatur und den Oberflächentemperaturen der Umschließungsflächen sowie der Umgebungslufttemperatur entzogen wird. Die thermische Behaglichkeit hängt somit im Wesentlichen von den mittleren Temperaturen der umgebenden Flächen, der Raumlufttemperaturen und der Raumluftfeuchte ab. Der Bereich, in dem sich der Mensch am wohlsten fühlt, kann durch folgende Werte des Raumzustandes beschrieben werden:

- Raumlufttemperatur
- mittlere Temperatur der Umschließungsflächen (einschließlich Fenster und Heizkörper)
- Raumluftfeuchte
- Raumluftbewegung
- Körperliche Betätigung und Bekleidung

¹⁵International Energy Agency-Solar Heating & Cooling

Untersuchungen zur thermischen Behaglichkeit sind in zahlreichen Arbeiten (z. B.: [75, 18, 23]) beschrieben. Es ergeben sich zwei wesentliche Kennfelder. So lässt sich ein Behaglichkeitsfeld in Abhängigkeit der mittleren Strahlungstemperatur aller Umgebungsflächen und der Raumlufthtemperatur definieren (vgl. Abb. 2.9 a). Das Behaglichkeitsfeld bewegt sich in engen Grenzen, mit minimal 16 °C und maximal 26 °C für die mittlere Strahlungstemperatur der Umschließungsflächen und ca. 19 °C bis 23 °C für die Raumlufthtemperatur. Gerade Fenster, die immer großflächiger zum Einsatz kommen, können bei einem schlechten U_w -Wert als Wärmesenken auftreten und die Behaglichkeit reduzieren.

Abbildung 2.9 b) beschreibt eine weitere Behaglichkeitsstudie nach Leusden und Freymark [39] mit einem Kennfeld in Abhängigkeit der Raumlufthtemperatur und der relativen Luftfeuchtigkeit. Beide Diagramme unterscheiden sich für das Band der Raumlufthtemperatur nur unwesentlich. Der Bereich für die relative Feuchte ist mit 35 % bis 75 % deutlich ausgeprägt.

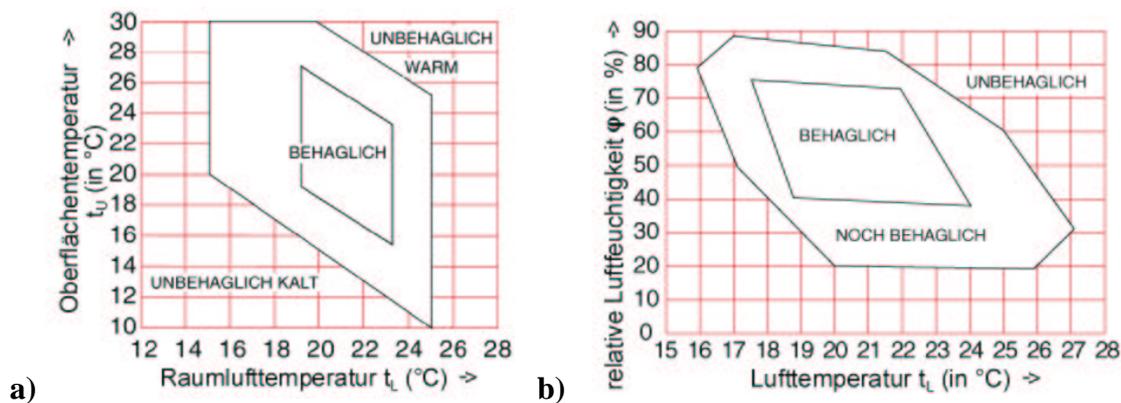


Abbildung 2.9: **a)**: Behaglichkeitskennfeld in Abhängigkeit der mittleren Oberflächentemperatur und der Raumtemperatur (nach Frank [23]).

b): Behaglichkeitskennfeld in Abhängigkeit der Raumtemperatur und der relativen Luftfeuchtigkeit (nach Leusden und Freymark [39]).

Die Aussagen dieser Behaglichkeitsfelder sind jedoch nicht absolut, vielmehr ist das Komfortempfinden individuell ausgeprägt, abhängig u.a. von der Kultur, der Gesundheit, der Art der Bekleidung und natürlich auch vom Bewegungsumfang (vgl. Tabelle 2.3). Dennoch beschreiben die Felder notwendige Rahmenbedingungen. So zeigen sie z. B., dass moderne Gebäude mit guter Dämmung und hochwertigen Fenstern, eine niedrigere Raumlufthtemperatur bei gleichem Komfort zulassen. Dies ist die Folge geringerer Zugscheinungen und wärmerer Wand- wie Fensterflächen. Eine Energieeinsparung kann infolgedessen nicht nur durch die reduzierten Transmissionsverluste erreicht werden, sondern auch durch das Herabsetzen der Raumlufthtemperatur. Diese Energieeinsparung erfolgt ohne Beeinträchtigung des Komforts.

Die Untersuchungen zu den Behaglichkeitskriterien haben auch ihren Weg in die Norm DIN EN ISO 7730 [34] gefunden¹⁶. So kann nach der DIN EN ISO 7730 bei Luftgeschwindigkei-

¹⁶insbesondere die Untersuchungen durch Fanger [18].

Physiologische Bedingungen	Physikalische Bedingungen	Intermediäre Bedingungen
Konstitution	Lufttemperatur	Kleidung
Körperverfassung	Temperatur der Umschließungsflächen	Tätigkeitsgrad
Geschlecht	Luftgeschwindigkeit	Adaption
Alter	Luftfeuchte	Akklimatisation
Ethnische Einflüsse	Luftdruck	Tagesrhythmus
Nahrungsaufnahme	Luftzusammensetzung	Jahresrhythmus
	Luftelektrizität	Raumbesetzung
	Akustische Einflüsse	Psychosoziale Faktoren
	Optische Einflüsse	

Tabelle 2.3: Einflussgrößen auf die Behaglichkeit nach Frank [23]. Die nach Fanger [18] wesentlichen Einflussgrößen sind die Lufttemperatur, die Temperatur der Umschließungsflächen, die Luftgeschwindigkeit, die Luftfeuchte, der Aktivitätsgrad und die Art der Bekleidung.

ten $< 0,2\text{ m/s}$ und einer Luftfeuchtigkeit von 50 %¹⁷ eine operative Empfindungstemperatur als Mittelwert von Lufttemperatur T_{luft} und Strahlungstemperatur T_{str} der Umschließungsflächen bestimmt werden.

$$T_{empf} = 0,5 * (T_{luft} + T_{str}) \quad (2.1)$$

T_{empf} sollte im Normalfall bei ca. 20 °C liegen und längerfristig 26 °C nicht überschreiten.

Die Strahlungswirkung der umgebenden Flächen haben wesentlichen Einfluss auf den Wärmehaushalt des Körpers. Die mittlere Strahlungstemperatur der Umschließungsflächen definiert sich als die flächengewichtete Temperatur aller beteiligen Flächen:

$$T_{str} = \frac{\sum_i A_i T_i}{\sum_i A_i} \quad (2.2)$$

Dabei bezeichnet A_i die Größe der i -ten Wandfläche und T_i deren mittlere Temperatur. Zu Bemerkem ist hier, dass größere Strahlungsasymmetrien hinsichtlich einer Abkühlung des Körpers zu Zugerscheinungen führt und als unbehaglich empfunden wird.

Luftqualität

Zusätzlich gibt es noch Faktoren, die die Qualität der Luft beschreiben und einen Luftaustausch im Raum erforderlich machen.:

- Reinheit der Luft (CO_2 -Konzentration / Stäube)
- Geruchsfreiheit der Luft

¹⁷Bei einem Lufttemperaturbereich von 18-20 °C wird von einem geringen Einfluss der Luftfeuchtigkeit ausgegangen, und im Weiteren nicht berücksichtigt.

Um Zugerscheinungen und Lüftungswärmeverluste zu vermeiden, werden die Gebäude zunehmend abgedichtet. So haben Wohngebäude durch dichtere Bauweise und verbesserte Fenster einen freien Fugenluftwechsel¹⁸ kleiner $0,1 \text{ h}^{-1}$ erreicht, während undichte Häuser bei ungünstiger Witterung eine Fugenluftwechselrate von weit über 3 h^{-1} aufweisen.

Niedrigenergiegebäude und Passivhäuser mit aktiver Lüftungsanlage sollten durch einen *Blower Door-Test* auf Luftdichtheit geprüft werden. Hierbei wird im Gebäude mit einem Gebläse ein Überdruck von 50 Pa aufgebaut. Gemessen wird der Luftvolumenstrom, der durch die Leckagen geht. Der Wert n_{50} beschreibt die entsprechende Luftwechselrate für 50 Pa Druckdifferenz. Nach [20] ist ab $n_{50} = 3,0 \text{ h}^{-1}$ mit erhöhten Wärmeverlusten durch Leckageströmungen zu rechnen. Passivhäuser sollten einen n_{50} -Wert von etwa $0,3 \text{ h}^{-1}$ aufweisen [49].

Ein ausreichender Austausch der Raumluft durch Frischluft ist aber aus hygienischen, bauphysikalischen (Feuchteproblematik) und Wohlbefindungsgründen notwendig. Pettenkofer [50] hat den CO_2 -Gehalt der Raumluft als Maßstab für die gasförmigen Luftverunreinigungen eingeführt [53]. Er schlug bereits 1858 einen Grenzwert von 1000 ppm (entspricht $0,1$ Vol.-Prozent) für die Luft in Aufenthaltsräumen vor¹⁹. Die CO_2 -Konzentration der Außenluft liegt heute je nach Standort zwischen 300 ppm und 700 ppm . Die ausgeatmete Luft eines Menschen hat beispielsweise eine CO_2 -Konzentration von 50000 ppm .

Aus den Überlegungen zu Feuchte, CO_2 und Körpergerüchen lassen sich als Richtwert für den hygienisch notwendigen Volumenstrom 30 m^3 Frischluft je Person und Stunde ableiten [20]. Dies bedeutet je nach personeller Belegung der Wohnfläche eine Luftwechselrate von $0,3 \text{ h}^{-1}$ bis $0,8 \text{ h}^{-1}$. Die Erneuerung der Raumluft erfolgt je nach Gebäudestandard und -technik "unkontrolliert" durch Fugenlüftung, "nutzerbestimmt" durch Fensterlüftung oder "kontrolliert" durch eine Lüftungsanlage.

¹⁸Der Luftwechsel gibt an, welcher Anteil des Raumvolumens pro Stunde durch frische Luft ersetzt wird. Je höher der Luftwechsel, desto höher der Energieverbrauch, da Luft mit Raumtemperatur durch kalte Außenluft ersetzt wird, die wieder erwärmt werden muss.

¹⁹Dieser Wert wurde auch in die DIN 1946 (Raumlufttechnik, Gesundheitstechnische Anforderungen) übernommen.

2.2 Thermische Prozesse im Gebäude

Das thermische System eines Gebäudes umfasst Wärmetransportvorgänge zwischen und innerhalb von Bauteilen und Raumluftvolumina. Das System ist nicht adiabat, es steht in Wärmeaustausch mit der Umgebung und internen Quellen oder Senken. Daneben wird Energie in bedeutendem Maße über solare Strahlung zugeführt. Zur Erhaltung der thermischen Behaglichkeit wird ein Gleichgewicht der Wärmeströme hergestellt. Die hierbei auftretenden Vorgänge des Wärmetransportes sind sehr vielfältig [36].

2.2.1 Wärmetransportvorgänge

Wärmetransport durch Wärmeleitung

Wärmeleitung ist der Austausch kinetischer Energie, der durch Schwingungen und Eigenbewegungen der Moleküle übertragen wird. Wärmeleitung findet in festen und fluiden Medien statt, wobei das Medium selbst sich in Ruhe befindet. In Festkörpern dominiert meist die reine Wärmeleitung. Bei porösen Bau- und Wärmedämmstoffen kommt Wärmetransport durch Konvektion und Strahlung hinzu.

Der Wärmestrom durch Wärmeleitung erfolgt in Abhängigkeit des Temperaturgefälles. Fourier stellte diesen Zusammenhang in Form einer partiellen Differentialgleichung dar. Diese lässt sich als Energiebilanz eines infinitesimalen Volumenelementes im kartesischen Koordinatensystem verstehen.

$$\rho \cdot c_p \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \cdot \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + \dot{q}_{\text{intern}} \quad (2.3)$$

Unter Voraussetzung konstanter Stoffeigenschaften, wie Dichte ρ , spezifische Wärmekapazität c_p und Wärmeleitfähigkeit λ ist die Gleichung linear. Die partielle Differentiation nach der Ortskoordinate ist zweiter Ordnung, da ein Wärmeaustausch jeweils mit dem vorhergehenden und nachfolgenden Volumenelement in jeder Koordinatenrichtung stattfindet. Der Summand \dot{q}_{intern} beschreibt den Wärmestrom aus einer internen Wärmequelle.

Ein Gebäudeelement ist ein Bauteil, das sich i. d. R. durch seine Geometrie ein-dimensional hinreichend genau beschreiben lässt. Solche Bauteile werden im Folgenden allgemein als Wände bezeichnet, unabhängig von ihrer tatsächlichen Funktion als Decke, Dach, Fußboden oder Wand. Die Temperaturverteilung auf jeder Seite dieser Bauteile ist im Vergleich zum Temperaturunterschied zwischen beiden Seiten gleichmäßig. Daher kann bei der Betrachtung des Wärmetransportes in Wänden vereinfachend von eindimensionaler Wärmeleitung ausgegangen werden. Die Fourier'sche Wärmeleitungsgleichung vereinfacht sich dann zu:

$$\rho \cdot c_p \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \dot{q}_{\text{intern}} \quad (2.4)$$

Wärmetransport durch Konvektion

Als Konvektion wird der Wärmeübergang zwischen bewegten Fluiden (Gas oder Flüssig-

keit) und der Oberfläche von Festkörpern bezeichnet. Sie ist eine Kombination aus Wärmeleitung und Enthalpietransport nahe der Festkörperoberfläche.

Es wird zwischen freier Konvektion auf Grund von Dichteunterschieden²⁰ und erzwungener Konvektion durch eine von außen aufgeprägte Fluidgeschwindigkeit unterschieden. Der Wärmeübergang an den Innenoberflächen von Wänden beruht im Allgemeinen auf freier Konvektion, angetrieben durch die Temperaturdifferenz zwischen Wand und Luft.²¹ Bei der freien Konvektion ist die Strömung somit abhängig von der treibenden Temperaturdifferenz und der Geometrie des Festkörpers.

An den Außenoberflächen dominiert wegen der Windgeschwindigkeit die erzwungene Konvektion. Zudem hängt der Wärmeübergang von den Stoffeigenschaften des Fluids, der Strömungsform (laminar oder turbulent) und der Strömungsgeschwindigkeit sowie den Eigenschaften der Festkörperoberfläche ab.

Man unterscheidet somit:

- bzgl. der auslösenden Kraft: erzwungene (äußere Kraft) und freie (Dichteunterschied) Strömung
- bzgl. der Strömungsform: laminar und turbulente Strömung
- bzgl. der beströmten Flächen: Überströmung und Durchströmung

Allgemein wird der übertragene Wärmestrom mit einem bereits von Newton angegebenen Ansatz

$$\dot{Q} = \alpha_{\text{conv}} \cdot A \cdot \Delta T \quad (2.5)$$

beschrieben [36]. A ist die wärmeabgebende oder aufnehmende Fläche, α_{conv} ist der konvektive Wärmeübergangskoeffizient und ΔT die Temperaturdifferenz zwischen der Austauschfläche und dem strömenden Medium. Der Proportionalitätsfaktor α_{conv} wird empirisch ermittelt und ist abhängig von den oben beschriebenen Strömungsformen.

Massengebundener Energietransport

Der Massenstrom \dot{m} eines Fluids mit der Enthalpie h bewirkt einen Enthalpietransport:

$$\dot{Q} = \dot{m} \cdot h \quad (2.6)$$

Dieser wird von Wärmeleitungsvorgängen innerhalb des Fluids überlagert. Einen bedeutenden Enthalpietransport bei Gebäuden stellen die Lüftungswärmeverluste dar. Gezielt eingesetzt wird der massengebundene Energietransport in Luft- und Warmwasserheizungen.

²⁰Bei Temperaturunterschieden (Dichteunterschied) von fluiden Medien wird eine freie Strömung infolge von Auf- oder Abtriebskräften ausgelöst.

²¹Die Konvektionswalze vor einer Wand, die sich aufgrund von Dichteunterschieden einstellt, heißt freie Konvektion. Die Temperaturdifferenz zwischen Scheibenoberfläche und Luft führt auch zu freier Konvektion, die sich mit der Anströmung von der Wand überlagert.

Wärmetransport durch Strahlung

Jeder Festkörper einer Temperatur oberhalb des absoluten Nullpunktes emittiert und absorbiert Energie durch Strahlung, wodurch sich ein Wärmetransport zwischen Oberflächen unterschiedlicher Temperatur ergibt (vgl. VDI Wärmeatlas [71]). Weiße Oberflächen reflektieren auftreffende Strahlung vollständig, graue absorbieren bei jeder Wellenlänge den gleichen Anteil und schwarze Oberflächen absorbieren die auftreffende Strahlung vollständig.

Transparente Körper werden von einem Teil der Strahlung durchdrungen, im Gegensatz zu nichttransparenten Körpern, die man auch opak nennt. Für reale Oberflächen sind der spektrale Absorptionsgrad α_λ , Transmissionsgrad τ_λ und Reflexionsgrad r_λ Funktionen der Wellenlänge λ . Die Integration über λ liefert für reale Oberflächen temperaturabhängige $\alpha(T)$, $\tau(T)$ und $r(T)$. Für graue Körper sind α , τ und r konstant. Nach dem Energieerhaltungssatz gilt für Strahlung, die auf eine Oberfläche trifft: $\alpha(T) + \tau(T) + r(T) = 1$, für graue Strahler entsprechend $\alpha + \tau + r = 1$.

Eine Oberfläche heißt spiegelnd, wenn sie die auftreffende Strahlung im selben Winkel zur Flächennormalen reflektiert, matt, wenn sie die auftreffende Strahlung vollständig diffus reflektiert. Dies entspricht der gleichmäßigen Streuung mit einer Richtungsverteilung nach dem Lambertschen Kosinusetz.

Das Verhältnis der Ausstrahlungsdichte \dot{E} eines realen Körpers zur Ausstrahlungsdichte eines schwarzen Körpers gleicher Temperatur heißt Emissionsverhältnis ϵ . Dies beschreibt das Stefan-Bolzmannsche Gesetz:

$$\dot{E} = \epsilon \cdot \sigma \cdot T^4 \quad (2.7)$$

mit der Strahlungskonstante des schwarzen Körpers:

$$\sigma = 5,670 \cdot 10^{-8} \frac{W}{m^2 K^4}$$

Es gilt das Kirchhoffsche Gesetz:

$$\epsilon_\lambda(T) = \alpha_\lambda(T) \quad (2.8)$$

Die Strahlung von Oberflächen mit in Gebäuden üblichen Temperaturen hat ihr spektrales Maximum im Wellenlängenbereich um 10000 nm und ist damit im Vergleich zur Solarstrahlung (um 500 nm) langwellig. Man spricht vom langwelligen Strahlungsaustausch der Bauteiloberflächen. Die auf die Außenoberflächen treffende oder durch das Fenster ins Gebäude gelangende kurzwellige Solarstrahlung wird absorbiert oder reflektiert.

Für den langwelligen Strahlungsaustausch im Raum kann von grauen Körpern ausgegangen werden. Die Abstrahlung wird als vollständig diffus angenommen. Es gilt für den Wärmestrom von der Fläche A_1 auf die Fläche A_2 unter Vernachlässigung der Reflexion:

$$\dot{Q}_{12} = \sigma \cdot A_1 \cdot \phi_{12} \cdot \epsilon_1 \cdot \epsilon_2 \cdot (T_1^4 - T_2^4) \quad (2.9)$$

mit der Einstrahlzahl²²

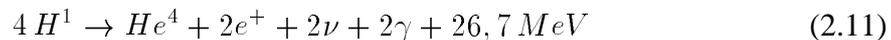
$$\phi_{12} = \frac{1}{\pi \cdot A_1} \int_{A_1} \int_{A_2} \frac{\cos \beta_1 \cdot \cos \beta_2}{s^2} dA_1 dA_2 \quad (2.10)$$

2.2.2 Solarstrahlung

Wie in Kapitel 2.1.1 bereits beschrieben, zeigen solaroptimierte Gebäude einen erhöhten Einfluss auf Solarstrahlung. Die Einstrahlung der Sonne ist eine bedeutende Größe im Wärmehaushalt des solaroptimierte Gebäudes. Aus diesem Grund folgt eine kurze, grundlegende Betrachtung zur Solarstrahlung.

Grundlagen

Die Sonne bezieht ihre Energie aus Kernfusionsprozessen. Die Fusion von Wasserstoff zu Helium



setzt eine Energie von 26,731 MeV frei. Dies ist keine kleine Energiemenge für eine atomare Reaktion und angesichts der hohen Zahl an verschmelzenden Kernen summiert sich die freiwerdenden Energie in jeder Sekunde auf ca. $4 * 10^{23} kW_s$. Die Sonne wird dabei pro Sekunde um etwa vier Millionen Tonnen leichter. Die Zeit bis der gesamte Wasserstoff der Sonne verbraucht ist, lässt sich auf $6 * 10^{10}$ Jahre abschätzen [28]. Damit ist die Zeit, mit der uns die Sonne als Energielieferant zur Verfügung stehen wird, nach menschlichem Ermessen, unbegrenzt.

Da man bei der Sonne von einer Oberflächentemperatur²³ von etwa $T_S = 5790 K$ ausgeht und man sie näherungsweise als schwarzen Strahler betrachtet, ergibt sich nach dem Stefan-Boltzmann-Gesetz die spezifische Ausstrahlung der Sonne zu

$$M_S = \sigma T_S^4 = 6,3 * 10^7 \frac{W}{m^2}. \quad (2.12)$$

Jeder Quadratmeter der Sonnenoberfläche gibt die Strahlungsleistung von 63 MW ab. Von dieser Energie erreicht jedoch nur ein kleiner Teil die Erde. Es wird nochmals zwischen extraterrestrischer und terrestrischer Bestrahlungsstärke unterschieden.

$E_0 = 1367 \pm 2 \frac{W}{m^2}$ wird als Solarkonstante bezeichnet und ist der Mittelwert der Bestrahlungsstärke der Sonne²⁴ auf die Erde ohne atmosphärische Reduktion (Weltall).

Solarstrahlung auf der Erde

Mit dem Durchdringen der Atmosphäre erfährt die Solarstrahlung eine Reduktion. Man unterscheidet zwischen:

²²Winkelverhältnis

²³Die Strahlung geht hauptsächlich von der 200 km dicken "Oberflächenhülle" aus.

²⁴Der Mittelwert bestimmt sich aus der schwankenden Bestrahlungsstärke infolge des sich ändernden Abstandes der Erde zur Sonne. Die Erde beschreibt eine Ellipsenbahn um die Sonne.

- Reduktion durch Reflexion an der Atmosphäre
- Reduktion durch Absorption der Atmosphäre (hauptsächlich bedingt durch O_2 , H_2O , O_3 , CO_2)
- Reduktion durch Rayleigh-Streuung²⁵
- Reduktion durch Mie-Streuung²⁶

Das Maß der Reduktion hängt entscheidend von der Weglänge des Lichtes durch die Atmosphäre ab. Der Sonnenhöhenwinkel (Altitudenwinkel α_S) bestimmt diese Weglänge. Abbildung 2.10 zeigt vergleichend die Spektren des Sonnenlichtes im Weltall und auf der Erde am

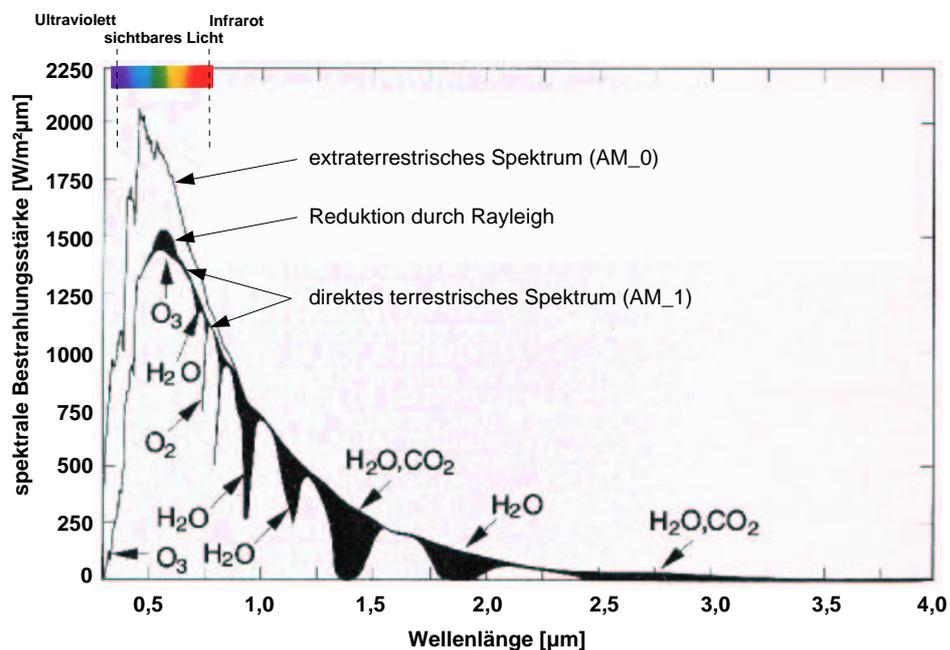


Abbildung 2.10: Wellenlängenabhängige Bestrahlungsstärke für das extraterrestrische Spektrum (AM_0) und für das direkte terrestrische Spektrum (AM_1) (Quelle: [14]) Die schwarzen Flächen kennzeichnen die Reduktion der Solarstrahlung durch Absorption und Streuung, verursacht durch Luftmoleküle. (Die AM-Zahl (Air Mass) ist ein Maß für die Weglänge des Sonnenlichtes durch die Atmosphäre. Je größer die AM-Zahl ist, umso länger der Weg der Strahlung durch die Atmosphäre, umso intensiver die Schwächung. [14, S.65ff])

Beispiel eines gewählten Sonnenstandes²⁷. Mit der Abbildung wird auch die Zusammensetzung des Lichtes aus den verschiedenen Wellenlängen verdeutlicht.

²⁵Die Reduktion durch Rayleigh-Streuung erfolgt an molekularen Bestandteilen der Luft, deren Durchmesser deutlich kleiner als die Wellenlänge des Lichtes ist [51].

²⁶Die Reduktion durch Mie-Streuung erfolgt an Staubteilchen oder Verunreinigungen der Luft. Der Durchmesser der Teilchen ist dabei größer als die Wellenlänge des Lichtes [51]. Sie ist stark abhängig vom Standort. Die Reduktion ist im klaren Hochgebirge am geringsten, in urbanen Gebieten mit hoher Luftverschmutzung am größten.

²⁷Das hier gewählte Spektrum gilt für den Sonnenstand im Zenit für einen völlig klaren Tag in Meereshöhe.

Die Strahlung auf die Erdoberfläche (E_{global}), die zum solaren Heizen (passiv oder aktiv) genutzt werden kann, setzt sich aus der Direktstrahlung E_{direkt} (Einstrahlung, die direkt aus der Richtung der Sonnenscheibe auf die Oberfläche trifft) und der Diffusstrahlung E_{diffus} zusammen. Die Diffusstrahlung besteht zum einen Teil aus der in der Atmosphäre gestreuten Strahlung $E_{atmosphre}$, die aus jedem beliebigen Winkel auf die Erde trifft und der reflektierten Strahlung $E_{reflexion}$, die von umgebenden Gegenständen reflektiert wird. Damit summiert sich die Globalstrahlung E_{global} auf eine Oberfläche zu:

$$E_{global} = E_{direkt} + E_{atmosphre} + E_{reflexion} = E_{direkt} + E_{diffus} \quad (2.13)$$

2.3 Thermisches Gebäudemodell innerhalb *ColSim*

Da in dieser Arbeit die aktiven thermischen Anlagenteile und das thermische Gebäudeverhalten aufgrund von Solarstrahlung und Regelung untersucht wird, ist zu diesem Zweck in der Simulationsumgebung *ColSim* ein Gebäudemodell, mit dem Ziel der Abbildung einer möglichst realistischen Gebäuderesonanz, implementiert worden. *ColSim* ermöglicht die Kopplung des Gebäudemodells an erprobte und validierte Modelle der Solar- und Heizungstechnik. Es bietet Vorteile gegenüber etablierten Simulationsprogrammen. Die Verwendung der finiten Differenzentechnik²⁸ ermöglicht die problemlose Abbildung temperaturabhängiger Stoffeigenschaften und den Zugriff auf innere Zustände von Bauteilen. Es bietet zudem den Vorteil, die üblichen Zeitschrittweiten von einer Stunde bis in den Sekundenbereich zu verkleinern. Damit erfüllt es die genannte Forderung nach einer hohen zeitlichen Auflösung der Systemdynamik zur regelungstechnischen Untersuchung.

*ColSim*²⁹ ist im Rahmen einer Dissertation [79] zur Untersuchung und Optimierung von Regelungskonzepten in solarthermischen Anlagen entwickelt worden. Man kann es als Derivat zum Programm TRNSYS betrachten, da es sinnvolle Konzepte, wie den modularen Aufbau der Komponenten übernommen hat.

Eine ausführlichere Beschreibung zum Lösungsverfahren, Konzept und Anwendung von *ColSim* ist im Anhang A zu finden. Grundlage für die beschriebenen Simulationsrechnungen ist die Entwicklung mathematischer Modelle. Im Anhang A.4 wird die Methode zur Modellbildung durch das thermische Ersatzschaltbild (in Anlehnung an das elektrische Schaltbild) beschrieben. Sie bildet den Ausgangspunkt für die Entwicklung und Beschreibung der Modelle.

Im Folgenden wird die Modellbildung mit Hilfe des thermischen Ersatzschaltbildes, sowie Validierungssequenzen zum Gebäudemodell und von Wand- und Anlagenkomponenten dargestellt.

2.3.1 Raummodell

Das thermische System eines Raumes umfasst die Oberflächen der ihn begrenzenden Bauteile und das umschlossene Luftvolumen. Das Luftvolumen trägt eine Kapazität, die Wandoberflächen sind dagegen masselos.

Die Wandoberflächen stehen untereinander in Strahlungsaustausch. Daneben findet ein konvektiver Wärmeübergang zwischen den Oberflächen und dem Luftvolumen statt. Die Kapazität der Luft wird zudem über interne Quellen, den konvektiven Anteil der Heizung und den Luftwechsel be- und entladen. Die Wärmeströme sind in Abbildung 2.11 dargestellt.

²⁸Das numerische Lösungsverfahren, sowie die erforderliche Stabilitätsbetrachtung wird in Kapitel A.3 näher betrachtet.

²⁹<http://www.colsim.org>

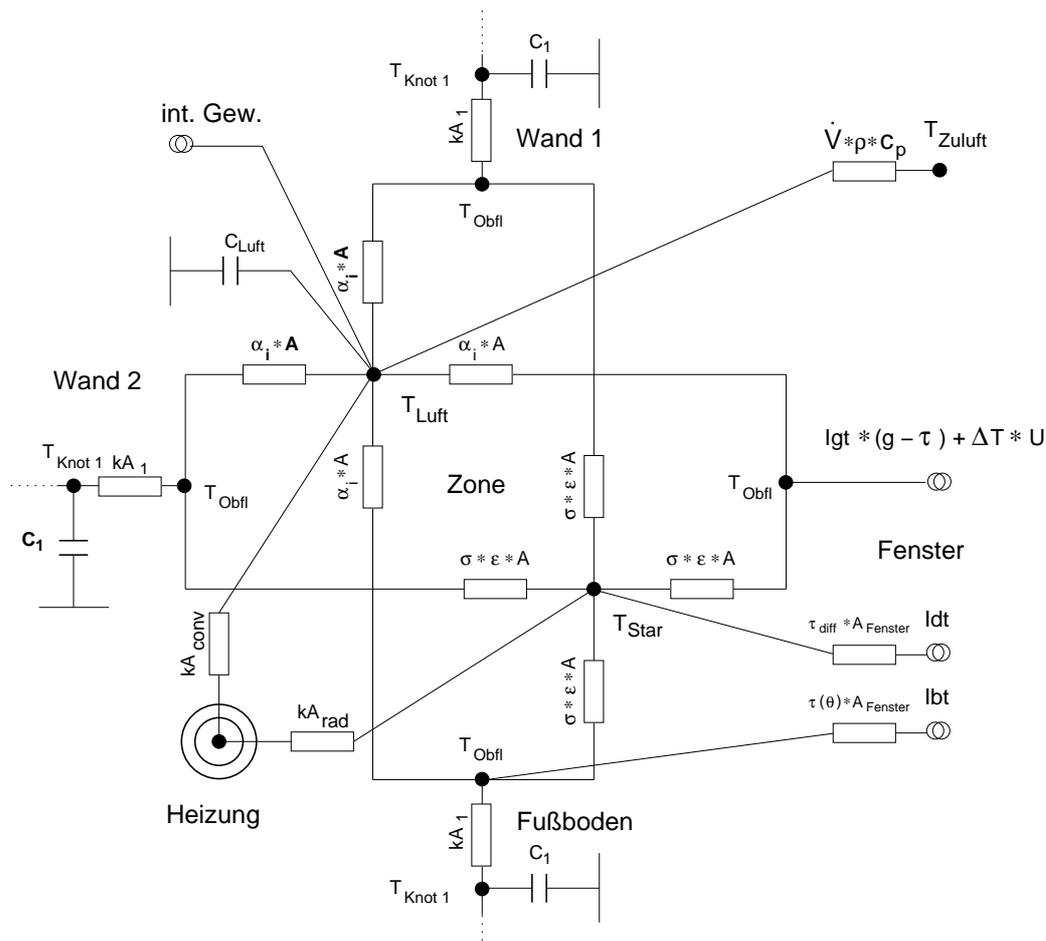


Abbildung 2.11: Thermisches Ersatzschaltbild zur Darstellung der Wärmeströme im Raummodell.

2.3.1.1 Konvektiver Wärmeübergang

Im *ColSim* Raummodell wird zu Grunde gelegt, dass die konvektiven Wärmeübergänge an den einzelnen Oberflächen entkoppelt sind. Das Luftvolumen wird jenseits der Grenzschichten als isotherm und unbewegt angenommen. Für jede Oberfläche errechnet sich dann ein Wärmestrom durch Konvektion an das Luftvolumen:

$$\dot{Q}_{conv} = \alpha_{conv} \cdot A \cdot (T_{Obfl} - T_{Luft}) \quad (2.14)$$

Der konvektive Wärmeübergangskoeffizient α_{conv} lässt sich nach [71] mittels Anströmlänge l und Wärmeleitfähigkeit des Fluids λ auf einen dimensionslosen Wärmeübergangskoeffizienten zurückführen, die Nußelt-Zahl.

$$\alpha_{conv} = \frac{Nu \lambda}{l} \quad (2.15)$$

Sie ist eine Funktion der Grashof-Zahl Gr und der Prandtl-Zahl Pr .

$$Nu = f(Gr \cdot Pr) \quad (2.16)$$

Dichteunterschiede aufgrund der treibenden Temperaturdifferenz $\Delta T = |T_{Luft} - T_{Oberfl.}|$ setzen eine Konvektionswalze in Bewegung. Die Grashof-Zahl bezieht diese Dichteänderung auf die hemmende Wirkung der kinematischen Viskosität ν :

$$Gr = \frac{g l^3}{\nu^2} \beta \Delta T \quad (2.17)$$

Die Dichte wird als lineare Funktion der Temperatur angenommen. Der isobare Volumenausdehnungskoeffizient wird für die Temperatur der ungestörten Luft ermittelt:

$$\beta = \frac{1}{T_{Luft}} \quad (2.18)$$

Die übrigen Stoffwerte werden als konstant angenommen und für die mittlere Grenzschichttemperatur $T_m = \frac{1}{2}(T_{Luft} + T_{Oberfl.})$ berechnet.

Die Prandtl-Zahl ist das Verhältnis aus kinematischer Viskosität und Temperaturleitfähigkeit a :

$$Pr = \frac{\nu}{a} = \frac{\nu \rho c_p}{\lambda} \quad (2.19)$$

Das Produkt aus Grashof-Zahl und Prandtl-Zahl heißt Rayleigh-Zahl:

$$Gr \cdot Pr = Ra \quad (2.20)$$

Die Bestimmung der Nußelt-Zahl aus Grashof- und Prandtl-Zahl erfolgt nach empirisch ermittelten Formeln, die in der Literatur variieren. Feist [19] vergleicht verschiedene Modelle des konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten für senkrechte Wände. In *ColSim* wird die Nußelt-Zahl nach den in [71, Kap. Fa] angegebenen Verfahren bestimmt, da dort neben vertikalen auch horizontale und geneigte Flächen beschrieben sind.

Vertikale Flächen

Für vertikale Flächen gilt laut *Churchill* und *Chu* [12] sowohl für den laminaren wie auch den turbulenten Bereich:

$$Nu = \left(0,825 + 0,387 [Ra \cdot f_1(Pr)]^{1/6}\right)^2 \quad (2.21)$$

Die Funktion f_1 beschreibt den Einfluss der Prandtl-Zahl:

$$f_1(Pr) = \left[1 + \left(\frac{0,492}{Pr}\right)^{9/16}\right] \quad (2.22)$$

Die Anströmlänge ist für senkrechte Wände gleich ihrer Höhe: $l = h$. Der Wärmeübergangskoeffizient senkrechter Flächen ist unabhängig von der Richtung des Wärmetransportes. Bei einem Wärmestrom von der Wand an das Luftvolumen strömt die Luft in der Grenzschicht

aufwärts, bei einem Wärmestrom von der Luft in die Wand abwärts.

Horizontale Flächen

Bei horizontalen Flächen beeinflusst die Richtung des Wärmestroms den Wärmeübergangskoeffizienten, da sich die Konvektionswalze nur beim Wärmetransport nach oben ungehindert ausbilden kann. Dies entspricht der Wärmeabgabe eines Fußbodens oder der Wärmeaufnahme einer Decke. Es gilt nach *Stewartson* [61] für den laminaren Bereich:

$$Nu = 0,766 [Ra \cdot f_2(Pr)]^{1/3} \quad (2.23)$$

mit

$$f_2(Pr) = \left[1 + \left(\frac{0,322}{Pr} \right)^{11/20} \right]^{-20/11} \quad (2.24)$$

Die Strömung ist laminar für $Ra \cdot f_2(Pr) < 7 \cdot 10^4$. Dies trifft für in Gebäude üblicherweise auftretende Temperaturen zu.³⁰

Für abwärtsgerichtete Wärmeströme dominiert bei geringen Temperaturdifferenzen die Wärmeleitung. Für diesen Bereich lässt sich der Wärmeübergangskoeffizient nicht verlässlich bestimmen. Erst für eine laminare Strömung mit $10^3 < Ra \cdot f_1(Pr) < 10^{10}$ gilt nach *Churchill* [11]

$$Nu = 0,6 [Ra \cdot f_1(Pr)]^{1/5} \quad (2.25)$$

mit f_1 nach Gleichung 2.22. Der Bereich $Ra \cdot f_1(Pr) < 10^3$ tritt nur bei Temperaturdifferenzen $\Delta T < 1,7\text{K}$ auf.³¹ Der konvektive Wärmestrom ist dann relativ gering, so dass die Verwendung der Gleichung 2.25 geringe Fehler erwarten lässt. Der turbulente Bereich für $Ra \cdot f_1(Pr) > 10^7$ tritt bei in Gebäuden üblichen Temperaturen nicht auf.

Für die Anströmlänge waagerechter Flächen der Länge L und der Breite B gilt:

$$l = \frac{L \cdot B}{2(L + B)} \quad (2.26)$$

Geneigte Flächen

Beim konvektiven Wärmeübergang an geneigten Flächen wird ebenfalls zwischen aufwärts und abwärtsgerichtetem Wärmestrom unterschieden: Beim Wärmestrom nach unten liegt die Grenzschicht an der Fläche an. Beim Wärmestrom nach oben löst sie sich nach einer gewissen Lauflänge ab.

Bei aufwärtsgerichteten Wärmeströmen fördern die Strömungsablösungen das Umschlagen in den turbulenten Bereich. Für die Nußelt-Zahl einer um den Winkel α zur Horizontalen

³⁰Für eine Fläche mit $L \times B = 3,5\text{m} \times 5\text{m}$ mit Oberflächentemperaturen von 0°C und 40°C , bei einer Lufttemperatur von 20°C wurde $Ra \cdot f(Pr)$ berechnet. Liegen diese Extremwerte im Gültigkeitsbereich der Formel, so wird sie als gültig für übliche in Gebäuden auftretende Temperaturen betrachtet.

³¹Für eine Fläche von $L \times B = 3,5\text{m} \times 5\text{m}$.

geneigten Ebene besteht nach *Fujii* und *Imura* [24] die folgende Beziehung:

$$\text{Nu} = 0,56 (\text{Ra}_c \cdot \sin \alpha)^{1/4} + 0,13 (\text{Ra}^{1/3} - \text{Ra}_c^{1/3}) \quad (2.27)$$

mit der kritischen Rayleigh-Zahl

$$\text{Ra}_c = 10^{[8,9 - 0,00178 \cdot (90 - \alpha)^{1,82}]} \quad (2.28)$$

Für geneigte Flächen mit Wärmestrom nach unten wird die Nußelt-Zahl analog zu Gleichung 2.21 für senkrechte Wände berechnet, mit f_1 nach Gleichung 2.22.

$$\text{Nu} = \left(0,825 + 0,387 [\text{Ra}_\alpha \cdot f_1 (\text{Pr})]^{1/6} \right)^2 \quad (2.29)$$

Dabei wird Ra durch Ra_α ersetzt, da die Erdbeschleunigung nur mit der zur Fläche parallelen Vektorkomponente wirksam ist:

$$\text{Ra}_\alpha = \text{Ra} \cdot \sin \alpha \quad (2.30)$$

Die Wände in ColSim werden anhand ihrer Steigung unterschieden: 0° kennzeichnet eine Decke, 90° eine Wand und 180° einen Fußboden. Die Zwischenwerte bedeuten geneigte Flächen, 60° steht beispielsweise für die Innenoberfläche eines steilen Daches, 170° wäre ein schiefer Fußboden.

2.3.1.2 Strahlungsaustausch

Der Strahlungsaustausch im Raum bedeutet für eine betrachtete Oberfläche einen Energiestrom zu jeder anderen ihr zugewandten Oberfläche, unter Berücksichtigung von Reflexion auch zu ihr nicht zugewandten Oberflächen. Für einen durch n Flächen begrenzten Raum sind damit $\frac{1}{2} \cdot n \cdot (n - 1)$ Wärmeströme durch Strahlung zu berechnen. Für einen quaderförmigen Raum mit zwei Teilflächen, entsprechend sechs Wänden und zwei Fenstern, ergibt das 28 Wärmeströme.

Die Beschreibung des Strahlungswärmeaustausches kann wesentlich vereinfacht werden, indem die Wärmeübertragung sternförmig mit Zwischenabsorption am sogenannten Strahlungsknoten dargestellt wird. Anschaulich ist dies ein Körper, der den ganzen Raum ausfüllt und keine thermische Masse besitzt. Seine Wärmeleitfähigkeit ist unendlich und die Oberfläche ideal schwarz. Mit diesem sogenannten Zweisternmodell³² sind für einen n -flächigen Raum nur noch n Wärmeströme zu berechnen, für den Quader mit zwei Fenstern also acht [19, Kap 6.6.2].

Für einen Raum mit nur drei Umschließungsflächen, wie bei einem unendlich langen Spitzboden, lässt sich das Strahlungsnetzwerk mathematisch exakt in den Strahlungsknoten um-

³²Der zweite Knoten stellt die Kapazität des Luftvolumens dar, er heißt Raumlufknoten.

rechnen, entsprechend der Maschen-Stern-Umrechnung aus der Elektrotechnik.

$$r_i = \frac{R_{i+1} \cdot R_{i+2}}{R_1 + R_2 + R_3} \quad (2.31)$$

Für einen realen Raum mit mehr als vier Wänden gibt es keine exakte Lösung. Die einfachste Näherung erhält man durch Gewichtung mit den Flächenanteilen.

Feist zeigt in einer Parameterstudie mit dem Programm JULOTTA, dass die Approximation des Strahlungsnetzwerks durch den Strahlungsknoten für die Bewertung der dort untersuchten Einflussgrößen nur einen Fehler von etwa 1% ausmacht. Der Wärmestrom zwischen zwei Oberflächen weicht durch die "Mischung" im Strahlungsknoten zwar erheblich vom Netzwerkmodell ab, die resultierende Wärmeabgabe oder Aufnahme einer Oberfläche wird jedoch so genau wiedergegeben, dass sich die betrachteten Oberflächentemperaturen um maximal 1/10 Kelvin unterscheiden.

Das *ColSim* Raummodell nutzt diese Vereinfachung. Der Wärmestrom durch langwellige Strahlung an eine Fläche i errechnet sich damit zu:

$$\dot{Q}_{\text{radi}} = \sigma \cdot \epsilon_i \cdot A_i \cdot (T_{\text{Stra}}^4 - T_{\text{Obff}i}^4) \quad (2.32)$$

mit der mittleren Strahlungstemperatur der Oberflächen

$$T_{\text{Stra}} = \frac{\sum_{i=1}^n \epsilon_i \cdot A_i \cdot T_{\text{Obff}i}}{\sum_{i=1}^n \epsilon_i \cdot A_i} \quad (2.33)$$

2.3.1.3 Energiebilanz an der Innenoberfläche

Da die Oberflächen im *ColSim* Gebäudemodell masselos sind, gilt $\dot{Q}_{\text{zu}} = \dot{Q}_{\text{ab}}$. So gilt mit den Richtungen der Wärmestromvektoren nach Abbildung 2.12 für die Innenoberfläche folgende Gleichung:

$$\dot{Q}_{kA} + \dot{Q}_{\text{conv}} = \dot{Q}_{\text{rad}} + \dot{Q}_{\text{dir}}$$

Mit den Ausdrücken für die Wärmeströme nach Kapitel 2.3.1.1 und 2.3.1.2 ergibt sich eine Potenzfunktion in der Form:

$$f(T_{\text{Obff}}) = a_1 \cdot T_{\text{Obff}}^4 + a_2 \cdot T_{\text{Obff}} = b$$

mit

$$\begin{aligned} a_1 &= \sigma \cdot A \cdot \epsilon_{\text{Obff}} \\ a_2 &= \alpha_{\text{conv}} \cdot A + kA \\ b &= \dot{Q}_{\text{dir}} + kA \cdot T_{\text{Knot}} + a_1 \cdot T_{\text{Stra}}^4 + \alpha_{\text{conv}} \cdot A \cdot T_{\text{Luft}} \end{aligned}$$

Wie für die Außenoberfläche in Kapitel 2.3.2.4 beschrieben, wird die Temperatur T_{Obff} iterativ bestimmt, da das nichtlineare Gleichungssystem nicht explizit auflösbar ist.

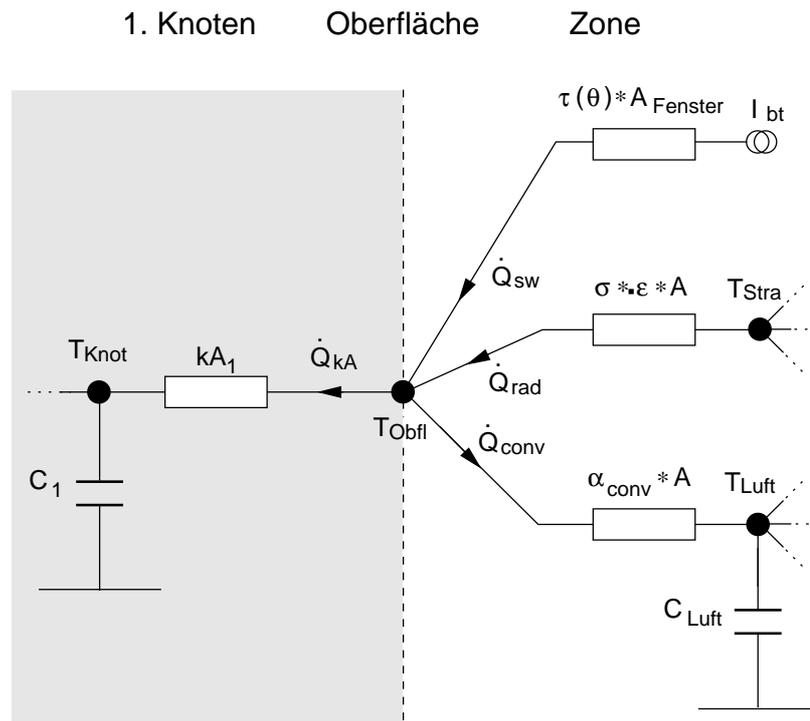


Abbildung 2.12: Wärmeströme an der Innenoberfläche

2.3.2 Wandmodell

2.3.2.1 Dynamischer Wärmetransport in Wänden

Unter den in Kapitel 2.2.1 genannten Bedingungen kann in Wänden von eindimensionaler Wärmeleitung ausgegangen werden. Die Gleichung 2.4 ist für bestimmte Randbedingungen analytisch lösbar:

1. Für eine Wand gleichmäßiger Ausgangstemperatur T_0 wird die beidseitige Umgebungstemperatur sprunghaft von T_0 auf T_∞ geändert (Sprungantwort). In [71, Kap. Ec] ist ein Verfahren beschrieben, nach dem zunächst dimensionslose Kennzahlen berechnet werden, mit deren Hilfe dann die Temperatur an jedem beliebigen Ort der Wand zu jedem beliebigen Zeitpunkt bestimmt werden kann. Das Verfahren erfordert konstante Wärmeübergangskoeffizienten und einen homogenen Wandaufbau mit konstanten Stoffwerten, es ist somit nur für einschichtige Wände geeignet.
2. Ebenfalls analytisch lösbar ist die Wärmeleitungsgleichung für einen sinusförmigen Verlauf der Umgebungstemperaturen an beiden Oberflächen (harmonische Randbedingung). Die sinusförmige Temperaturschwingung zieht sich mit einer gewissen Phasenverschiebung und Amplitudendämpfung durch die gesamte Wand. Folglich ist an den Grenzflächen mehrschichtiger Wände erneut die harmonische Randbedingung erfüllt. Damit gilt die beschriebene Lösung auch für mehrschichtige Wände. Sie führt auf ein lineares Gleichungssystem für den eingeschwungenen Zustand [19, Kap. 4.5.1].

Die beschriebenen analytischen Lösungen sind zur Abbildung realistischer Zustände in Gebäuden kaum geeignet, da die Lufttemperaturen nicht den in den Randbedingungen geforderten Verläufen folgen und die Wärmeübergangskoeffizienten in bedeutendem Maße temperaturabhängig sind.

Hier erweist sich das Diskretisierungsverfahren mit finiten Differenzen (vgl. Kap. A.3) als vorteilhaft. BEUKEN beschreibt 1936 in seiner Dissertation [4], wie der Zusammenhang der eindimensionalen Wärmeleitung nach Fourier (vgl. Gl. 2.4) durch eine räumliche Diskretisierung, d. h. eine Einteilung in endlich viele Schichten approximiert werden kann. Die Schichten tragen Teilkapazitäten der Wand, sie haben jeweils eine homogene Temperatur und sind über Widerstände aneinander gekoppelt. Dadurch lässt sich das partielle Differential zweiter Ordnung $\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}$ in zwei Differenzen $\frac{\Delta T}{\Delta x}$ überführen. Man erhält als Energiebilanz für die Schicht k folgende Zustandsgleichung:

$$\rho \cdot V \cdot c_p \cdot \frac{dT_k}{dt} = A \cdot \frac{\lambda}{d} (T_{k-1} - T_k) - A \cdot \frac{\lambda}{d} (T_k - T_{k+1}) + \dot{Q}_{\text{intern}} \quad (2.34)$$

Darin bezeichnet A die Fläche der Wand, $k - 1$ und $k + 1$ die angrenzenden Schichten, d die Dicke jeder Schicht und V das Volumen einer Schicht. Das verbleibende zeitliche Differential $\frac{dT_k}{dt}$ ist numerisch lösbar.

Die thermischen Zusammenhänge können durch elektrotechnische Ersatzschaltbilder dargestellt werden. Ein Ohmscher Widerstand steht dabei für einen Wärmeleitwiderstand, eine elektrische Kapazität repräsentiert eine Wärmekapazität und eine Stromquelle eine Wärmequelle. Die diskreten Schichten werden durch einen Knotenpunkt repräsentiert. Daher werden sie im Folgenden zur Unterscheidung von den physikalischen Schichten des Wandaufbaus als Knotenschichten bezeichnet.

2.3.2.2 Diskretisierungsschema für mehrschichtige Wandbauteile

Kriterium für die Diskretisierung eines mehrschichtigen Wandaufbaus mit m Wandschichten ist im *ColSim* Wandmodell die Wärmekapazität. In Wandschichten mit hoher Wärmekapazität werden relativ viele Knoten platziert. Die Einteilung innerhalb einer Wandschicht erfolgt äquidistant. Die Anzahl der Knoten n ist für jede Wand als Parameter vorgegeben. Die Diskretisierung erfolgt nach folgendem Ablaufplan:

1. Für jede Wandschicht i wird aus ihrer spezifischen Wärmekapazität c_i , Dichte ρ_i , Schichtdicke s_i und der Wandfläche A ihre Kapazität C_i berechnet. Jede Wandschicht erhält zunächst einen Knoten ($n_i = 1$).
2. Es wird die Wandschicht i ermittelt, für die der Ausdruck $\frac{C_i}{n_i}$ maximal ist. Für diese Wandschicht wird die Anzahl der Knotenschichten n_i um eins erhöht. Die Wärmekapazität der Knotenschichten dieser Wandschicht $\frac{C_i}{n_i}$ ist dadurch verringert worden.
3. Schritt zwei wird solange wiederholt, bis alle n Knoten vergeben sind, d.h.

$$\sum_{i=1}^m n_i = n.$$

Damit sind n Knotenschichten erzeugt. Jede Knotenschicht k ist eindeutig einer Wandschicht i zugeordnet, es gibt keine Überschneidungen. Alle n_i Knoten einer Wandschicht i haben die gleiche Wärmekapazität

$$C_k = \frac{C_i}{n_i} \quad (2.35)$$

Für die Wärmekapazitäten der Knoten unterschiedlicher Wandschichten ergeben sich durch dieses Verfahren ähnliche Werte.

Diese Methode der Modellierung ist zur Abbildung bestimmter Eigenschaften einer Wandschicht notwendig. Nichtlineares und zeitvariantes Verhalten wie das einer transparenten Wärmedämmung oder Latentspeicher müssen eindeutig einer (oder mehreren) Knotenschichten zuweisbar sein. Es darf daher keine Überschneidungen zwischen Wand- und Knotenschichten geben.

Für die Berechnung der Wärmeübertragung zwischen zwei benachbarten Knoten k und $k+1$ ist die Kenntnis des Widerstandes $R_{k,k+1}$ bzw. des Wärmedurchgangswertes $kA_{k,k+1} = 1/(R_{k,k+1})$ erforderlich. Aus Wärmeleitfähigkeit λ_i , Fläche A_i und Schichtdicke s_i wird zunächst der Wärmedurchgangswert kA_i jeder Wandschicht i bestimmt:

$$kA_i = A \cdot \frac{\lambda_i}{s_i} \quad (2.36)$$

Für benachbarte Knoten gilt aufgrund des Reziprokwertes zum Widerstandes $R_{k,k+1}$ in der selben Wandschicht i :

$$kA_{k,k+1} = n_i kA_i \quad (2.37)$$

Für den Wärmedurchgangswert von der Innenoberfläche zum innenliegenden Knoten gilt der doppelte Wert:

$$kA_{\text{innen},1} = 2n_1 kA_1 \quad (2.38)$$

Vom außenliegenden Knoten zur Außenoberfläche ergibt sich entsprechend:

$$kA_{n,\text{ausßen}} = 2n_n kA_n \quad (2.39)$$

Das Diskretisierungsschema am Beispiel einer Wand mit zweischichtigem Aufbau und fünf Knoten zeigt Abbildung 2.13 als thermisches Ersatzschaltbild.

Die alleinige Verwendung der Wärmekapazität als Diskretisierungskriterium kann bei Wandschichten unterschiedlicher Materialien zu sehr unterschiedlichen Zeitkonstanten führen. Da die Zeitschrittweite h zur Bestimmung guter Näherungen wegen des verwendeten numerischen Lösers deutlich unterhalb der kleinsten Zeitkonstanten τ_{\min} liegen soll (vgl. Kap. A.3), kann die Zeitkonstante ebenfalls als sinnvolles Diskretisierungskriterium verwendet werden. Dies führt dann bei mehrschichtigen Wandaufbauten zu einer höheren Diskretisierungstiefe für das "schwere" Material. Das "leichte" Material wird auf weniger Knoten verteilt³³.

³³Minimum ist ein Knotenpunkt

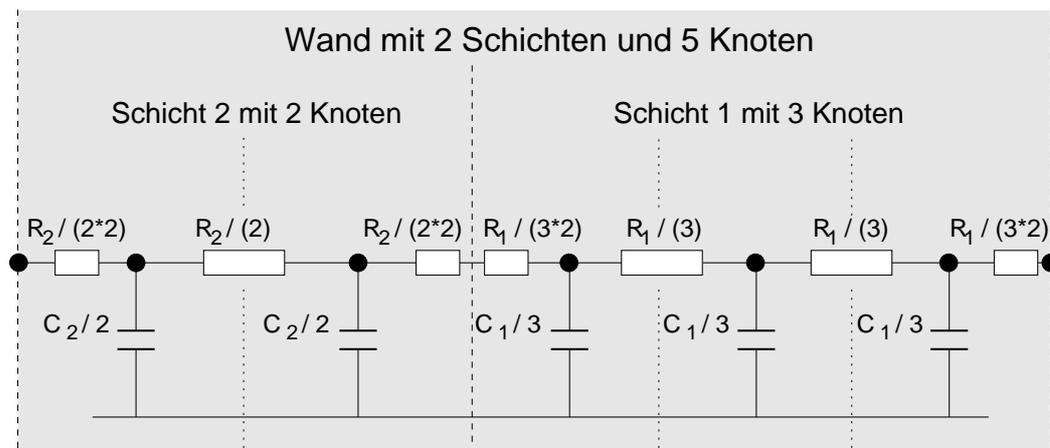


Abbildung 2.13: Diskretisierungsschema einer mehrschichtigen Wand

2.3.2.3 Wärmeübertragung an Außenflächen

Unter Außenflächen werden hier die äußeren Oberflächen der opaken Gebäudebauteile ($\tau = 0$) verstanden. Diese stehen in langwelligem Strahlungsaustausch mit der Umgebung und in konvektivem Wärmeaustausch mit der Außenluft. Daneben absorbieren sie solare Strahlung. Einen Sonderfall bilden erdreichberührende Bauteile, sie tauschen Wärme nur über Wärmeleitung aus. Da die Wärmeströme mit Ausnahme der Absorption Funktionen der Oberflächentemperatur sind, können sie nicht unabhängig voneinander bestimmt werden. Es wird daher eine Energiebilanzgleichung für die Außenoberfläche aufgestellt, in der die Temperatur implizit enthalten ist.

Konvektiver Wärmeübergang

Der konvektive Wärmeübergang von einer Außenoberfläche an die Umgebungsluft wird durch die folgende Gleichung beschrieben:

$$\dot{Q}_{\text{conv}} = \alpha_{\text{conv}} \cdot A \cdot (T_{\text{Obl}} - T_{\text{Luft}}) \quad (2.40)$$

Der Wärmeübergangskoeffizient lässt sich nach der im VDI-Wärmeatlas beschriebenen Ähnlichkeitstheorie auf die dimensionslose Nußelt-Zahl zurückführen [71]:

$$\alpha_{\text{conv}} = \frac{\text{Nu} \lambda}{l} \quad (2.41)$$

Er wird von zahlreichen Größen beeinflusst:

- Windgeschwindigkeit und -richtung zur betreffenden Oberfläche
- Eigenschaften der Oberfläche wie Rauigkeit, Form und Neigungswinkel
- Temperaturdifferenz zwischen Oberfläche und Luft
- Feuchtigkeit der Luft und der Oberfläche

Die Komplexität der Faktoren erschwert eine verlässliche Beschreibung. Im Gegensatz zu den raumseitigen Oberflächen kann die Konvektion an den Außenoberflächen nicht auf freie Konvektion reduziert werden, weil die Außenluft fast immer bewegt ist. Für die Nußelt-Zahl gilt dann:

$$\text{Nu} = f(\text{Re}, \text{Pr}, \text{Gr})$$

Die Prandtl-Zahl zählt zu den Stoffdaten während die Grashof-Zahl eine Größe zur Charakterisierung der freien Konvektion ist. Beide wurden im Rahmen des Wärmeübergangs an Innenoberflächen beschrieben (vgl. Kap. 2.3.1.1). Die Reynoldszahl Re charakterisiert den Strömungszustand der durch Wind mit der Geschwindigkeit v erzwungenen Luftbewegung:

$$\text{Re} = \frac{v \cdot l}{\nu} \quad (2.42)$$

Darin ist l die Anströmlänge der Festkörperoberfläche und ν die dynamische Viskosität des Fluids. Unter der Prämisse, dass der erzwungene Anteil bei der Konvektion überwiegt, erhält man folgenden Ansatz für empirische Formeln:

$$\text{Nu} = C \cdot \text{Re}^p \text{Pr}^q \quad (2.43)$$

Für die Kombination eines bestimmten Mediums mit bestimmten Oberflächeneigenschaften, z. B. Luft und glatter Putz, kann man Korrelationsformeln direkt für den Wärmeübergangskoeffizienten aufstellen:

$$\alpha_{\text{conv}} = A + B \cdot v^n \quad (2.44)$$

Da Wärmeübergangskoeffizienten selbst nicht gemessen werden können, ermittelt man sie aus Messungen von Wärmeströmen. Die Tatsache, dass die vermessene Oberfläche auch im Strahlungsaustausch mit der Umgebung steht, erschwert dabei die verlässliche Bestimmung von α_{conv} . Die Werte sind daher mit erheblichen Unsicherheiten behaftet. Der Vergleich mehrerer Korrelationsformeln zeigt mit zunehmender Windgeschwindigkeit deutliche Unterschiede im Kurvenverlauf [19, Kap. 9.1]. Die in *ColSim* verwendete Formel nach [14] liegt im mittleren Bereich:

$$\alpha_{\text{conv}} = 2,8 + 3,0 \cdot v \quad (2.45)$$

Langwelliger Strahlungsaustausch mit der Umgebung

Die Außenoberfläche eines Bauteils steht in langwelligem Strahlungsaustausch mit dem Himmel und den Oberflächen in der Umgebung, bei denen Erdboden und Verschattungselemente überwiegen. Die Rückreflexionen von Erdbodenoberfläche (Index *Erdb*) und Himmel (Index *Him*) werden vernachlässigt³⁴, sie werden als schwarze Strahler behandelt. Für die Verschattungselemente (Index *Schat*) reduziert sich die absorbierte Strahlung um das Emissionsverhältnis für den langwelligigen Bereich. Der zwischen Bauteiloberfläche (Index *Obfl*) und Umgebung (Index *Umg*) ausgetauschte Wärmestrom lässt sich dann gemäß

³⁴Dies ist zulässig, da die Einstrahlzahlen für die Rückreflexion sehr viel kleiner sind als für die Abstrahlung der Wand: $\phi_{\text{Him Obfl}} \ll \phi_{\text{Obfl Him}}$ und $\phi_{\text{Erdb Obfl}} \ll \phi_{\text{Obfl Erdb}}$.

Gleichung 2.9 beschreiben zu:

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{\text{Obfl Umg}} = \sigma \cdot A \cdot \epsilon_{\text{Obfl}} \cdot & \left[\phi_{\text{Obfl Him}} \cdot (T_{\text{Obfl}}^4 - T_{\text{Him}}^4) \right. \\ & + \phi_{\text{Obfl Erdb}} \cdot (T_{\text{Obfl}}^4 - T_{\text{Erdb}}^4) \\ & \left. + \epsilon_{\text{Schat}} \cdot \phi_{\text{Obfl Schat}} \cdot (T_{\text{Obfl}}^4 - T_{\text{Schat}}^4) \right] \end{aligned} \quad (2.46)$$

Der Himmel stellt keine Oberfläche eines Körpers dar. Er strahlt jedoch mit der atmosphärischen Gegenstrahlung E_{Him} auf das betrachtete Bauteil, so dass die äquivalente Himmelstemperatur T_{Him} als die Temperatur eines schwarzen Körpers mit der gleichen Strahlungsdichte definiert wird:

$$\sigma \cdot T_{\text{Him}}^4 = E_{\text{Him}} \quad (2.47)$$

Die atmosphärische Gegenstrahlung oder die äquivalente Himmelstemperatur werden in empirischen Korrelationsformeln üblicherweise als Funktion der Lufttemperatur und der Taupunkttemperatur angegeben. Zur Beschreibung eines bewölkten Himmels kommen Bewölkungsgrad, Höhe der Wolkenbasis und das Wolkenemissionsverhältnis hinzu. Die in *ColSim* implementierte Formel nach [13] liegt im Mittelfeld in den in [19, Kap. 9.2] verglichenen empirischen Formeln. Danach gilt für den klaren Himmel:

$$T_{\text{Him klar}} = \left(\frac{5,31}{\sigma} \cdot T_{\text{Luft}}^6 \right)^{\frac{1}{4}} \quad (2.48)$$

Dieser Ansatz setzt die Temperatur der Wolken mit der Lufttemperatur gleich, so dass sich für einen teilbewölkten Himmel ergibt:

$$T_{\text{Him bew}} = (1 - cc) \cdot T_{\text{Him klar}} + cc \cdot T_{\text{Luft}} \quad (2.49)$$

Dabei ist cc der Bewölkungsgrad (engl.: cloud-cover). Dieser wird subjektiv über Betrachtung des Himmels bestimmt. Liegen hierzu keine Daten vor, wird er in *ColSim* mit 0,5 angenommen.

Die betrachteten Oberflächen der Umgebung spannen zusammen einen Halbraum über der ebenen Bauteiloberfläche auf, so dass für die Summe der Einstrahlzahlen gilt:

$$\phi_{\text{Obfl Him}} + \phi_{\text{Obfl Erdb}} + \phi_{\text{Obfl Schat}} = \phi_{\text{Obfl Umg}} = 1 \quad (2.50)$$

Durch Einführung der mittleren Umgebungstemperatur T_{Umg} lässt sich der Klammerausdruck in Gleichung 2.47 zusammenfassen. Es gilt:

$$\dot{Q}_{\text{rad}} = \sigma \cdot A \cdot \epsilon_{\text{Obfl}} \cdot (T_{\text{Obfl}}^4 - T_{\text{Umg}}^4) \quad (2.51)$$

Die Temperaturen der Erdoberfläche T_{Erdb} und der Verschattungselemente können in erster Näherung mit der Außenlufttemperatur T_{Luft} gleichgesetzt werden. Dann ergibt sich:

$$T_{\text{Umg}}^4 = \phi_{\text{Obfl Him}} \cdot T_{\text{Him}}^4 + (\phi_{\text{Obfl Erdb}} + \epsilon_{\text{Schat}} \cdot \phi_{\text{Obfl Schat}}) \cdot T_{\text{Luft}}^4 \quad (2.52)$$

Bei einem unverschatteten Horizont und waagrechttem Erdboden ergeben sich die Extremfälle für eine senkrechte Wand und eine horizontale Dachfläche: Für die Wand gilt $\phi_{\text{ObflHim}} = 0,5$ und $\phi_{\text{ObflErdb}} = 0,5$, für die Dachaußenfläche gilt $\phi_{\text{ObflHim}} = 1$ und $\phi_{\text{ObflErdb}} = 0$. Kommen Verschattungselemente mit $\phi_{\text{ObflSchat}}$ nach hinzu, reduzieren sich die Einstrahlzahlen an Himmel und Erdboden entsprechend.

Einkopplung der solaren Strahlung

Die auf die äußere Wandoberfläche treffende Solarstrahlung I_{gt} wird von der Wand zum Anteil α_{kw} absorbiert. Eine Winkelabhängigkeit dieses Absorptionsgrades wird nicht angenommen, da die Wandoberfläche bezogen auf die kurzwellige Solarstrahlung rau ist. Für die Energieeinkopplung in die Wand durch Absorption ergibt sich:

$$\dot{Q}_{\text{sol}} = \alpha_{kw} \cdot A \cdot I_{gt} \quad (2.53)$$

Erdreichberührende Bauteile

Eine Sonderstellung nehmen erdreichberührende Bauteile ein, da sie über Wärmeleitung an das Erdreich gekoppelt sind. Im Gegensatz zur Außenlufttemperatur, die im Wetterdatensatz angegeben wird, stellt die Temperatur des angrenzenden Erdreichs eine unbekannte Größe dar. Die Temperatur des ungestörten Erdreichs folgt einer Sinusschwingung mit einer Periodendauer von einem Jahr. Mittelwert, Amplitude und Phasenverschiebung können für eine bestimmte Wetterbeaufschlagung auf einen Boden mit bekannten Stoffdaten als Funktion der Tiefe berechnet werden. Die Phasenverschiebung nimmt mit der Tiefe zu und die Amplitude sinkt bis zu einer bestimmten Tiefe, darunter herrschen konstante Temperaturen.

Die Beschreibung des ungestörten Erdreichs verliert durch den Wärmeaustausch mit angrenzenden Bauteilen ihre Gültigkeit, besonders wenn diese beheizt sind. In einem unbeheizten, belüfteten Keller sind die Raumtemperaturen noch relativ eng an die Außenluft gekoppelt. Die Beeinflussung des Erdreichs besteht daher hauptsächlich in einer Verschiebung der Isothermen in tiefere Schichten, wobei diese gleichzeitig zusammengestaucht werden. Grenzen dagegen Fußböden beheizter Räume direkt an das Erdreich, so wird dessen Temperaturschwingung stark gedämpft. Eine korrekte Ermittlung des Wärmeverlustes erdreichberührender Bauteile erfordert die Modellierung der Wärmeleitungsvorgänge im Erdboden. Die in Kap. 2.2.1 beschriebenen Voraussetzungen für die Approximation durch eindimensionale Wärmeleitung treffen auf den Erdboden nicht zu, er müsste daher dreidimensional berechnet werden.³⁵ Im *ColSim* Gebäudemodell ist dies bisher nicht realisiert. Hier wird eine Bodenschicht bestimmter Dicke entsprechend eindimensionaler Wärmeleitung über einen Wärmeleitwiderstand kA_{Erde} an die Bodenplatte gekoppelt. Die Temperatur darunter muss

³⁵Für ein Mittelhaus einer langen Reihenhauseszeile reduziert sich das Problem auf zweidimensionale Wärmeleitung [19, Kap. 4.4]. Feist berechnet die Wärmeleitung des Erdreichs für ein unterkellertes Reihemittelhaus zunächst einmalig mit einem eigenen Programm. Der dabei ermittelte Temperaturverlauf einer Bodenschicht in einem geringen Abstand unter der Kellersohle wird in den Wetterdatensatz aufgenommen. Bei den anschließenden Gebäudesimulationen wird die Kellersohle über eindimensionale Wärmeleitung an die Schicht nun bekannter Temperatur gekoppelt.

vorgegeben werden. Sie ist in den folgenden Betrachtungen auf einen festen Wert gesetzt, es kann jedoch auch ein variabler Wert eingelesen werden.

2.3.2.4 Energiebilanz an der Außenoberfläche

Die Oberflächen im *ColSim* Gebäudemodell sind masselos. Dementsprechend muss ihre Energiebilanz stets ausgeglichen sein $\dot{Q}_{\text{zu}} = \dot{Q}_{\text{ab}}$. Analog zur Innenoberfläche gilt mit den Richtungen der Wärmestromvektoren nach Abbildung 2.14 folgende Gleichung:

$$\dot{Q}_{\text{rad}} + \dot{Q}_{\text{conv}} = \dot{Q}_{\text{sol}} + \dot{Q}_{\text{kA}}$$

Mit den Ausdrücken für die in im Kapitel 2.3.2.3 beschriebenen Wärmeströme und zur Bestimmung der Oberflächentemperatur ergibt sich eine Potenzfunktion in der Form:

$$f(T_{\text{Obff}}) = a_1 \cdot T_{\text{Obff}}^4 + a_2 \cdot T_{\text{Obff}} - b$$

mit

$$\begin{aligned} a_1 &= \sigma \cdot A \cdot \epsilon_{\text{Obff}} \\ a_2 &= \alpha_{\text{conv}} \cdot A + kA \\ b &= \dot{Q}_{\text{sol}} + kA \cdot T_{\text{Knot}} + a_1 \cdot T_{\text{Umg}}^4 + \alpha_{\text{conv}} \cdot A \cdot T_{\text{Luft}} \end{aligned}$$

Mit der Oberflächentemperatur aus dem letzten Zeitschritt als Startwert lässt sich der neue Wert für T_{Obff} iterativ bestimmen. In *ColSim* wird dazu das Newtonsche Verfahren verwendet, danach gilt für eine Funktion $f(x) = 0$ folgende Iterationsvorschrift [7, 48]:

$$x_n = x_{n-1} - \frac{f(x_{n-1})}{f'(x_{n-1})}, \quad f'(x_{n-1}) \neq 0, \quad (n = 1, 2, 3, \dots) \quad (2.54)$$

Für die Oberflächentemperatur gilt entsprechend:

$$T_{\text{Obff}_{\text{neu}}} = T_{\text{Obff}_{\text{alt}}} - \frac{a_1 \cdot T_{\text{Obff}_{\text{alt}}}^4 + a_2 \cdot T_{\text{Obff}_{\text{alt}}} - b}{4 \cdot a_1 \cdot T_{\text{Obff}_{\text{alt}}}^3 + a_2} \quad (2.55)$$

Da die in *ColSim* verwendeten Zeitschrittweiten nur einige Sekunden betragen, sind die Temperaturänderungen meistens so gering, dass die geforderte Genauigkeit von $\Delta T = \pm 0,01 K$ schon nach dem zweiten Iterationsschritt erreicht wird. Die Iteration wird demnach mit der Schrittweite der numerischen Integration durchgeführt und nicht innerhalb eines Zeitschrittes.

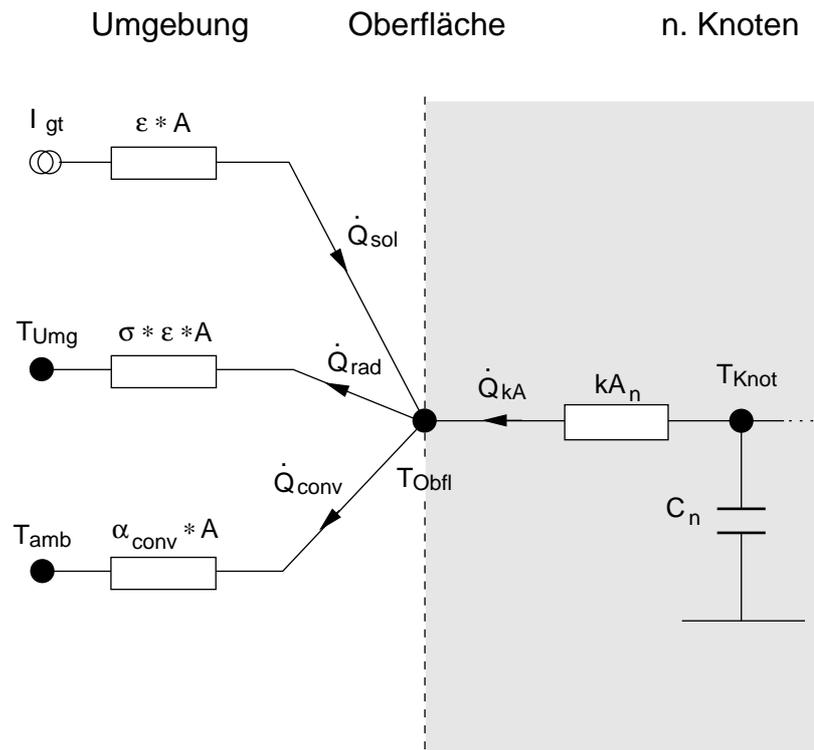


Abbildung 2.14: Wärmeströme an der Außenoberfläche

Analytischer Vergleich zur Wärmeleitung im Wandmodell

Unter bestimmten Randbedingungen ist die dynamische Wärmeleitung mit analytischen Verfahren lösbar. In der Arbeit [8] wird solch ein Verfahren zur Berechnung des Sprungantwortverhaltens für eine einschichtige Wand beschrieben. Das Verfahren folgt den Bedingungen aus [71]. Die Analyse zeigt, dass das *ColSim*-Wandmodell schon nach zehn Minuten eine Abweichung der Knoten- und Oberflächentemperaturen zwischen 0,3 und 4 % erreicht. Nach einer Stunde ist die Abweichung kleiner 1 %. Hiermit ist gezeigt, dass der explizite numerische Löser für die Wärmeleitung eine ausreichende Genauigkeit aufweist.

2.3.3 Fenstermodell

Eine thermisch korrekt modellierte Mehrfachverglasung umfasst Spaltkonvektion in den Scheibenzwischenräumen, Absorption der kurzwelligigen Solarstrahlung in den Scheiben und langwelligigen Strahlungsaustausch zwischen den Scheibenoberflächen. Die Zeitkonstanten der Scheiben sind so klein, dass viele Simulationsprogramme die Scheiben nicht dynamisch abbilden können. Die Wärmeströme durch die Verglasung werden dann stationär gerechnet, die Wärmekapazität der Scheiben wird vernachlässigt. Für eine Zweifachverglasung mit vier unbekanntenen Scheibenoberflächentemperaturen erhält man ein Gleichungssystem mit vier Gleichungen. Diese sind nichtlinear, da in den Strahlungswärmeaustausch die vierte Potenz der Temperatur eingeht. Nach Linearisierung kann das Gleichungssystem iterativ gelöst werden. In *ColSim* ist ein solches detailliertes Fenstermodell bisher nicht implementiert.

Statt dessen wird mit den Bauteilkennwerten Wärmedurchgangskoeffizient U , Transmissionsgrad τ und Gesamtenergiedurchlassgrad g gerechnet. Diese Größen werden von den Herstellern der Verglasungen für Normbedingungen angegeben. Sie können aber auch mit externen Programmen in Abhängigkeit der Temperatur und des Einfallswinkels bestimmt werden. Der Einfluss des Einfallswinkels auf g und τ ist für Verglasungen rotationssymmetrisch, er kann vereinfachend mit dem Winkelkorrekturfaktor iam (engl.: *incidence angle modifier*) angegeben werden:

$$\begin{aligned} g(\theta) &= g_0 \cdot iam(\theta) \\ \tau(\theta) &= \tau_0 \cdot iam(\theta) \end{aligned}$$

mit

$$iam(\theta) = 1 + b_0 \cdot \left(\frac{1}{\cos \theta} - 1 \right) \quad (2.56)$$

Aus den Fensterkennwerten ergeben sich die drei folgenden Wärmeströme durch die Verglasung. Die Direktgewinne aufgrund transmittierter Strahlung betragen:

$$\dot{Q}_{\text{dir}} = I_{bt} \cdot \tau(\theta) + I_{dt} \cdot \tau_{\text{diff}}$$

Die transmittierte Direktstrahlung wird in den Fußboden eingekoppelt, die Diffusstrahlung wird auf alle Wandflächen verteilt. Aufgrund der Absorption der einzelnen Scheiben erwärmt sich die innere Oberfläche des Verglasungsstapels. Daraus resultieren die Sekundär Gewinne:

$$\dot{Q}_{\text{sek}} = I_{bt} \cdot (g(\theta) - \tau(\theta)) + I_{dt} \cdot (g_{\text{diff}} - \tau_{\text{diff}})$$

Die Wärmeverluste aufgrund der treibenden Temperaturdifferenz betragen:

$$\dot{Q}_{UA} = U \cdot A \cdot (T_{\text{innen}} - T_{\text{außen}})$$

Der U_w -Wert ist der äquivalente Wärmeleitwiderstand des Verglasungsstapels einschließlich der Wärmeübergangskoeffizienten. Der Widerstand liegt also nicht zwischen den Oberflächen. Die Innentemperatur T_{innen} ist das Mittel aus T_{Stra} und T_{Luft} .

Die Sekundär Gewinne und die Verluste auf den langwelligen Strahlungsaustausch mit den Wandoberflächen sowie der konvektive Wärmeaustausch mit der Raumluft werden aufgeteilt. Die Verteilung hängt von der inneren Oberflächentemperatur der Verglasung ab (siehe Abb. 2.15). Diese wird über eine Energiebilanzgleichung bestimmt:

$$\dot{Q}_{\text{conv}} + \dot{Q}_{UA} = \dot{Q}_{\text{rad}} + \dot{Q}_{\text{sek}}$$

Mit den Ausdrücken für die Wärmeströme ergibt sich eine Potenzfunktion der Form:

$$f(T_{\text{Obfl}}) = a_1 \cdot T_{\text{Obfl}}^4 + a_2 \cdot T_{\text{Obfl}} - b$$

mit

$$a_1 = \sigma \cdot A \cdot \epsilon_{\text{Obfl}}$$

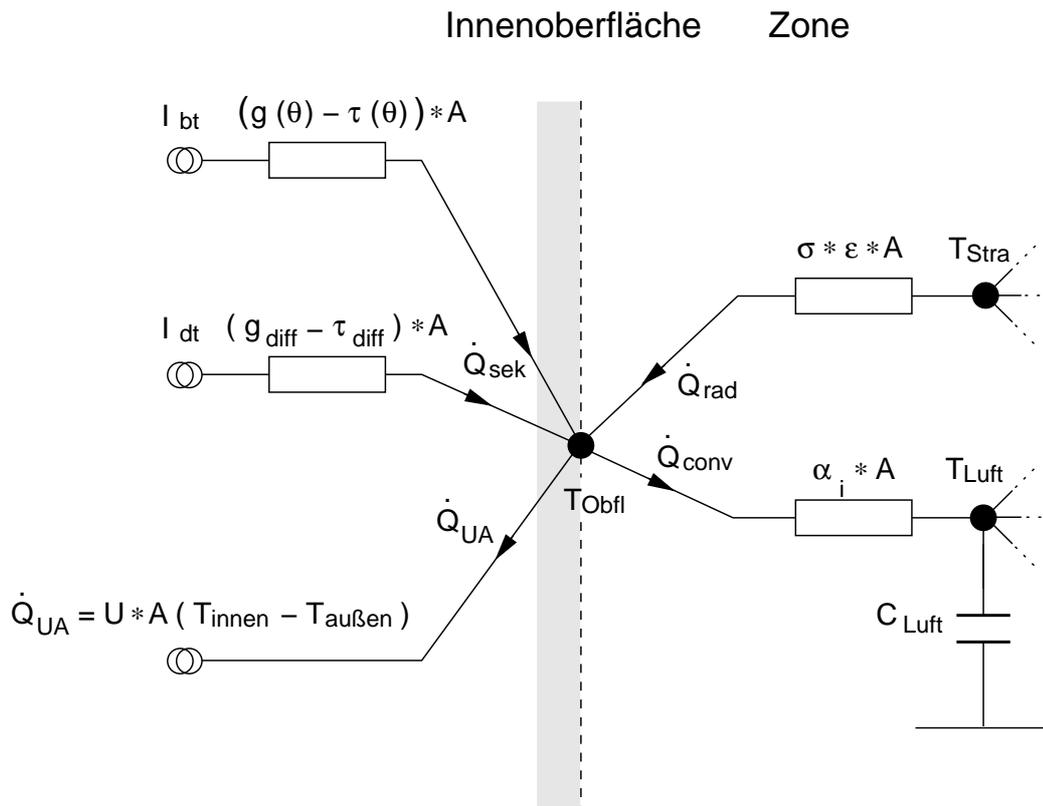


Abbildung 2.15: Energiebilanz an der inneren Verglasungsoberfläche.

$$a_2 = \alpha_{\text{conv}} \cdot A$$

$$b = \dot{Q}_{\text{sek}} - \dot{Q}_{UA} + a_1 \cdot T_{\text{Stra}}^4 + \alpha_{\text{conv}} \cdot A \cdot T_{\text{Luft}}$$

Die Temperatur der Innenoberfläche der Verglasung lässt sich daraus analog zur Außenoberfläche iterativ bestimmen (vgl. Kap. 2.3.2.4).

2.3.4 Solarstrahlung und Himmelsmodell

Die Solarstrahlung bewirkt die sogenannten passiven Gewinne im Gebäude. Ihrer Bedeutung wird in diesem Kapitel mit einer kurzen Beschreibung zur Berechnung der winkelabhängigen Strahlungsdaten aus den Wetterdatensätzen Rechnung getragen. Zur ausführlichen Beschreibung von Solarstrahlungskalkulationen auf orientierte Flächen zur Gebäudesimulation und von diversen Himmelsmodellen wird auf weiterführende Literatur verwiesen. [14, 70, 28, 43].

Bei der Solarstrahlung auf eine Fläche wird zwischen Strahlung direkt von der Sonne (Direktstrahlung), vom Himmel gestreuter Strahlung (diffuser Himmelsstrahlung) und durch den Erdboden reflektierter Strahlung unterschieden. Die reflektierte Strahlung kann eine Direktkomponente enthalten, bei spiegelnder Oberfläche, z. B. Gewässern. In thermischen Simulationsprogrammen wird jedoch in der Regel von vollständig diffuser Reflexion aus-

gegangen. Die reflektierte Strahlung kann dann mit der diffusen Himmelsstrahlung zusammengefasst werden.

Zur Charakterisierung der Solarstrahlung nach diffuser und direkter Strahlung wird in Wetterdatensätzen ein Wertepaar angegeben. Zwei übliche Fälle sind zu unterscheiden und können von *ColSim* verarbeitet werden:³⁶

- Die Angabe der auf die Horizontale fallenden gesamten Einstrahlung I_{gh} (engl.: *irradiation global horizontal*) und der Einstrahlung der auf die Horizontale fallenden diffusen Himmelsstrahlung I_{dh} (engl.: *irradiation diffus horizontal*).
- Die Angabe der auf die Horizontale fallenden gesamten Einstrahlung I_{gh} und der Intensität der Direktstrahlung auf eine der Sonne nachgeführte Fläche I_{bn} (engl.: *irradiation beam normal*).

Da Direktstrahlung gerichtete Strahlung ist, erhält man die Intensität auf eine nicht nachgeführte Fläche aus der trigonometrischen Projektion des Strahlungsvektors auf die Flächennormale.

Die relative Position der Sonne zu einer Fläche wird mit folgenden Winkeln beschrieben:

- ϕ Latitüde, geographische Breite, nord positiv; $-90^\circ \leq \phi \leq 90^\circ$
- δ Deklination, Winkel zwischen der Linie zur Sonne und der Ebene in welcher der Äquator liegt, nord positiv; $-23,45^\circ \leq \delta \leq 23,45^\circ$
- β Neigung, Winkel zwischen der Ebene einer Fläche und der Horizontalen, mit Aufwärtskomponente $< 90^\circ$, vertikal 90° , mit Abwärtskomponente $> 90^\circ$; $0 \leq \beta \leq 180^\circ$
- γ Azimutwinkel einer Oberfläche, Abweichung der Projektion einer Flächennormalen auf die Horizontale vom lokalen Meridian, ost negativ, süd 0, west positiv; $-180^\circ \leq \gamma \leq 180^\circ$
- ω Stundenwinkel, Winkelverschiebung der Sonne östlich oder westlich vom lokalen Meridian, durch die Erdrotation um 15° pro Stunde, Vormittag negativ, Nachmittag positiv
- θ Einfallswinkel, Winkel zwischen der Direktstrahlung und einer Flächennormalen

Weitere Winkel beschreiben den Stand der Sonne am Himmel:

- θ_z Zenitwinkel, Winkel zwischen der Vertikalen und der Linie zur Sonne, d. h. der Einfallswinkel der Direktstrahlung auf eine horizontale Fläche
- α_s Altitudenwinkel der Sonne, Winkel zwischen der Horizontalen und der Linie zur Sonne, d. h. der Komplementärwinkel zum Zenitwinkel
- γ_s Azimutwinkel der Sonne, Abweichung der Projektion der Direktstrahlung auf die Horizontale vom lokalen Meridian

Die Position der Sonne am Himmel und die Ausrichtung der Empfängerfläche sind in Abbildung 2.16 dargestellt.

³⁶Neben den üblichen Wertepaaren aus Wetterdatensätzen kann *ColSim* die Gesamtstrahlung auf die geneigte Fläche I_{gt} (engl.: *irradiation global tilted*) verarbeiten. Dieser Wert wird beispielweise in Fassadentestständen aufgezeichnet, so dass das vermessene thermische Verhalten der Fassadenkonstruktionen mit der tatsächlichen Einstrahlung durch Simulation evaluiert werden kann. Die Gesamtstrahlung wird dazu nach einer empirischen Funktion in einen diffusen und einen direkten Anteil zerlegt.

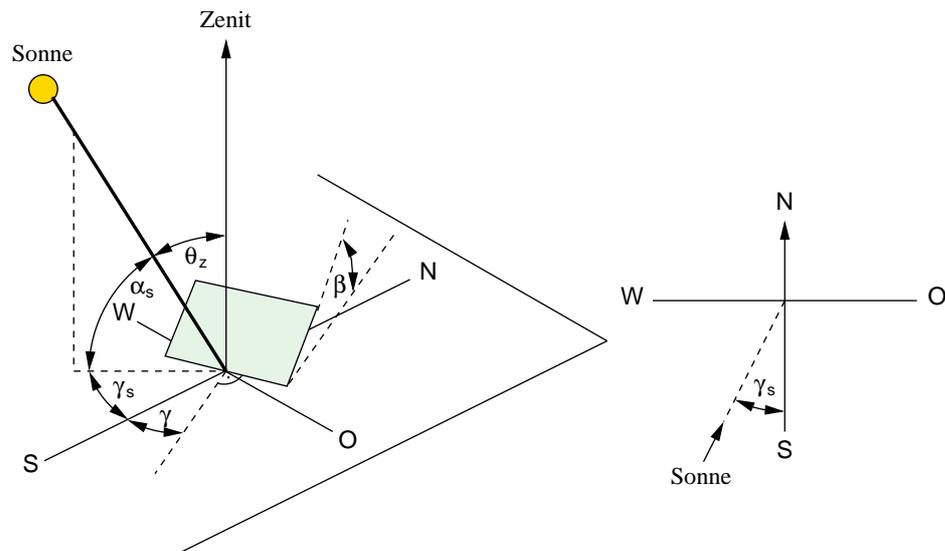


Abbildung 2.16: links: Zenitwinkel, Neigung, Azimutwinkel der Oberfläche und Azimutwinkel der Sonne für eine geneigte Oberfläche; rechts: Azimutwinkel der Sonne im Grundriss (Quelle: [14, S. 14]).

Mit den definierten Winkeln³⁷ gilt für die Direktstrahlung auf geneigte Flächen:

$$I_{bt} = I_{bn} \cdot \cos \theta \quad (2.57)$$

Für die Direktstrahlung auf die Horizontale gilt entsprechend:

$$I_{bh} = I_{bn} \cdot \cos \theta_z \quad (2.58)$$

Für die Einstrahlung auf die Horizontale gilt die Summenbeziehung: $I_{gh} = I_{dh} + I_{bh}$. Damit sind Gesamt-, Direkt- und Diffusstrahlung auf die Horizontale bekannt.

Himmelsmodelle

Verschiedene empirische Modelle definieren die Behandlung der Diffusstrahlung:

- o *Isotropes Himmelsmodell:*



Hier wird von einer Gleichverteilung der einfallenden diffusen Strahlung aus-

³⁷Für den Einfallswinkel auf eine geneigte Fläche gilt:

$$\begin{aligned} \cos \theta = & \sin \delta \sin \phi \cos \beta - \sin \delta \cos \phi \sin \beta \cos \gamma + \cos \delta \cos \phi \cos \beta \cos \omega \\ & + \cos \delta \sin \phi \sin \beta \cos \gamma \cos \omega + \cos \delta \sin \beta \sin \gamma \sin \omega \end{aligned}$$

Der Zenitwinkel entspricht dem Einfallswinkel auf eine horizontale Fläche ($\beta = 0$). Es folgt daraus:

$$\cos \theta_z = \cos \phi \cos \delta \cos \omega + \sin \phi \sin \delta$$

gegangen. Die gesamte Himmelsfläche strahlt mit gleicher Intensität. Mit eingeführt wird oftmals der Bewölkungsgrad und der atmosphärische Klarheitsindex, der z. B. den Dunst- bzw. Smoggrad über Städten berücksichtigt.

○ *Anisotrope Himmelsmodelle:*

-  *HDKR-Modell* (nach Hay, Davies, Klucher, Reindl)
Das Modell nimmt in der Nähe der Sonnenposition eine erhöhte Intensität der Diffusstrahlung an.
-  Aus detaillierten Untersuchungen zur Helligkeitsverteilung resultiert das *Perez-Modell*.
Zusätzlich zur Zirkumsolarstrahlung (*HDKR-Modell*) wird eine Horizontaufhellung berücksichtigt.

Mit dem Perez-Modell errechnen sich die größten Einstrahlungen auf die geneigte Fläche. Nach dem isotropen Himmelsmodell errechnen sich die geringsten Einstrahlungen, man nennt es daher konservativ. In *ColSim* findet das isotrope Himmelsmodell Verwendung, da seine Aussagekraft bezüglich der Intensität auf geneigte Flächen für die thermische Gebäudesimulation ausreichend ist. Da mit der Näherung über das isotrope Himmelsmodell, die Reflexion durch den Erdboden vollständig diffus erfolgt und keine Mehrfachreflexionen stattfinden, resultiert für den einfachsten Fall eines unverschatteten Horizontes die Lösung des Integrals aus der Gleichungen 2.10:

$$\phi_{\text{Obfl Him}} = \frac{1}{2} (1 + \cos \beta) \quad (2.59)$$

$$\phi_{\text{Obfl Erdb}} = \frac{1}{2} (1 - \cos \beta) \quad (2.60)$$

Man erhält damit für die diffuse Einstrahlung auf eine geneigte Fläche:

$$I_{dt} = \phi_{\text{Obfl Him}} \cdot I_{dh} + \phi_{\text{Obfl Erdb}} \cdot I_{gh} \cdot r_{\text{Erdb}} \quad (2.61)$$

r_{Erdb} , dieser Faktor heißt auch *Albedo*, er beschreibt den Reflexionsgrad³⁸ der vom Erdboden reflektierten Gesamtstrahlung.

³⁸Der Reflexionsgrad ist zeitlich (z. B. frisch verschneite Flächen) und räumlich starken Schwankungen unterworfen. Vereinfachte Ansätze (wenn keine Messungen vorliegen) gehen von $r_{\text{Erdb}} = 0,2$ aus. [28]

Kapitel 3

Validierung und Modifikation des Gebäudemodells

Bevor auf die Modellierung einzelner Systemkomponenten eingegangen werden kann, soll das bisher beschriebene Gebäudemodell einer Überprüfung unterzogen werden. Die Validierung des Modellverhaltens kann durch Vergleich mit Messwerten aus Experimenten oder aus mathematisch analytischen Rechenverfahren sowie aus dem Vergleich mit bereits validierten Modellen erfolgen.

Nach der Evaluation des *ColSim*-Gebäudemodells wird durch Integration geeigneter Teilmodelle eine Abbildung bezüglich der in Kapitel (2.1.2) beschriebenen Fassadenkonstruktionen realisiert. Die Modellentwicklung wird wiederum mit Hilfe von Messwerten validiert.

3.1 Kreuz-Validierung des Gebäudemodells

Bei einer Bewertung des Gebäudemodells mit seinen komplexen thermischen Zusammenhängen, wird man schnell feststellen, dass die übliche Validierung über Messwerte an Grenzen stößt. Man behilft sich im Bereich der thermischen Gebäudesimulation dann mit den vergleichenden Validierungsmethoden. Im Folgenden ist das ColSim-Gebäudemodell zum einen dem BESTEST¹-Verfahren und zum anderen mit dem aktuellen Referenzgebäude aus dem IEA-SHC TASK 26² einer Kreuz-Validierung unterzogen worden.

3.1.1 BESTEST - Cross Validation

Laut Internationaler Energie Agentur (IEA) gab es 1985 über 200 rechnergestützte Programme und Werkzeuge für die thermische Gebäudesimulation. Dabei zeigte auch eine Studie der IEA, die TASK 8 (Passive Low Energy Buildings), dass zum Teil sehr große Unterschiede

¹Building Energy Simulation TEST and Diagnostic Method

²International Energy Agency - Solar Heating & Cooling TASK 26

in den Ergebnissen von diversen computerunterstützten Simulationsprogrammen existieren. Gleichzeitig arbeitete das National Renewable Energy Laboratory (NREL) an einer umfassenden Validierungsmethode für thermische Gebäudesimulationsprogramme.

Mit diesen Erkenntnissen wurde von NREL im Auftrag der IEA ein Verfahren entwickelt, thermische Gebäudesimulationsprogramme zu überprüfen. Diese Methode wurde Building Energy Simulation TEST and Diagnostic Method (BESTEST) genannt. BESTEST gehört zu den vergleichenden Validierungsmethoden. Bei vergleichenden Test wird das Ergebnis eines Programmes mit sich selbst oder mit den Ergebnissen der anderen Programme³ verglichen. Diese Tests beinhalten auch Sensivitätstests und Vergleiche mit unterschiedlichen Modellen.

In einer Arbeit von Chen [10] wurde 1999 das ColSim-Gebäudemodell dem BESTEST-Verfahren unterzogen. Das ColSim Gebäudemodell ist seither in zahlreichen Details modifiziert und um neue Eigenschaften ergänzt worden. Buschmann [8, 9] nahm die doch grundlegenden Veränderungen zum Anlass, das Gebäudemodell erneut dem BESTEST-Verfahren zu unterziehen.

Die Abbildung 3.1 zeigt den dynamischen Verlauf zum Heiz- und Kühlbedarf aller Programme für einen kalten Januartag. Es zeigt sich, dass die Ergebnisse aller Simulationsumgebungen ein gewisses Band aufbreiten, innerhalb dessen sich die Ergebnisse vom ColSim-Gebäudemodell bewegen.

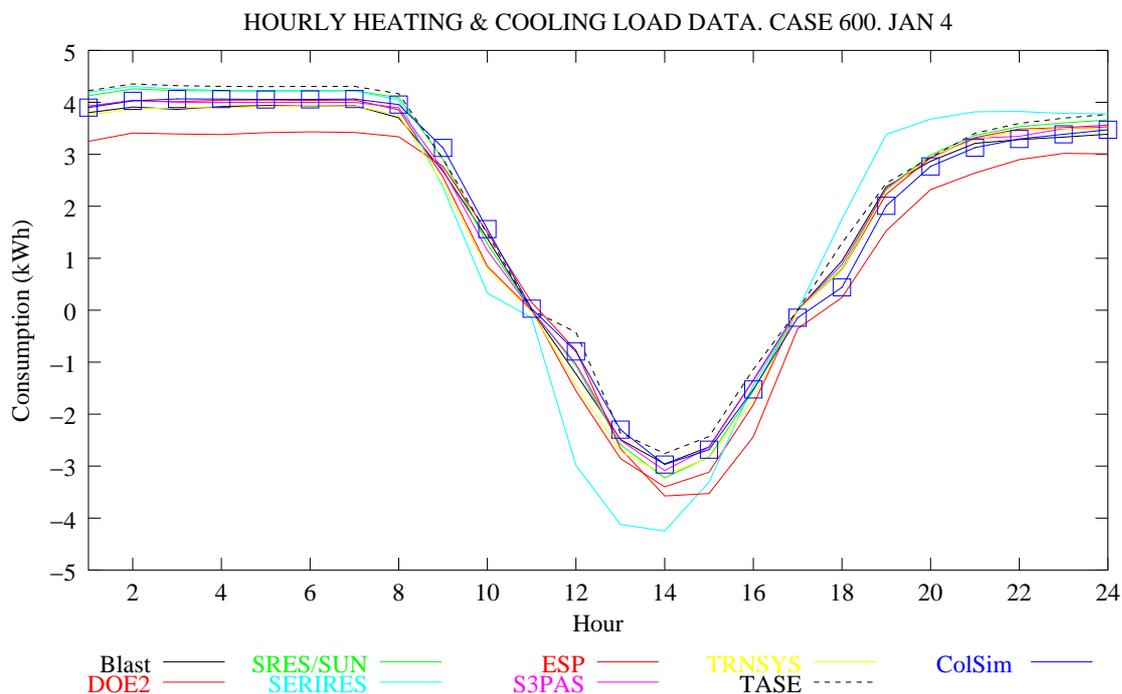


Abbildung 3.1: Vergleich der ColSim-Ergebnisse mit den Ergebnissen der BESTEST-Referenzprogrammen zum Heiz- und Kühlbedarf eines leichten Gebäudes für einen ausgewählten Wintertag mit hoher Einstrahlung.

³Es stehen Ergebnisse von acht Referenzprogrammen zur Verfügung

Die Tabelle 3.1 zeigt den Jahresendenergiebedarf für Heizwärme für ein Testgebäude in

in kWh Typ:	Program:	ColSim	ESP	BLAST	DOE	SUNCODE	SERIRES	S3PAS	TRNSYS	TASE
Leichtbau	(Fall 600)	4843	4296	4773	5709	5226	5596	4882	4872	5362
Massivbau	(Fall 900)	1672	1170	1610	1872	1897	1988	1730	1655	2042

Tabelle 3.1: *Jahresheizwärmebedarf im Vergleich mit den Referenzprogrammen. Die jeweils höchsten und niedrigsten Verbräuche sind “fett” geschrieben. (Weitere Erläuterungen sind im Anhang B zu finden.)*

leichter und schwerer Bauweise. Auch hier zeigt sich eine teilweise recht breite Streuung der Ergebnisse, in deren Mittelfeld sich die *ColSim*-Ergebnisse eingliedern.

Im Anhang B wird ausführlicher auf Systematik und den Ablauf der BESTEST-Methode eingegangen. Auch zeigen weitere Schaubilder *ColSim*-Ergebnisse im Vergleich zu anderen Simulationsprogrammen.

3.1.2 TASK 26 - Referenzgebäude

IEA-SHC TASK 26 ist ein Forschungsprojekt im Rahmen des “Solar Heating and Cooling Program”, an dem sich 26 Experten und elf Solartechnikunternehmen aus neun europäischen Ländern und den USA beteiligen. Es werden Systeme zur solaren Warmwasserbereitung und Raumheizung (solare Kombianlagen) in den teilnehmenden Ländern systematisch erfasst und auf ihre Eignung in verschiedenen Anwendungsbereichen und klimatischen Bedingungen untersucht [76]. Um Optimierungspotentiale und Anwendungsgrenzen der diversen Kombianlagenkonzepte bestimmen zu können, wurden detaillierte Referenzgebäude als Wärmesenke zur Simulation von solaren Kombisystemen definiert [63]. Diese Modellbeschreibungen sind in der Simulationsumgebung TRNSYS realisiert. Parametrierung und Ergebnisse dienen als Referenz für die *ColSim*-Simulationsmodelle. Eine Kreuz-Validierungssequenz ist in [9] beschrieben. Abbildung 3.2 zeigt den dynamischen Verlauf

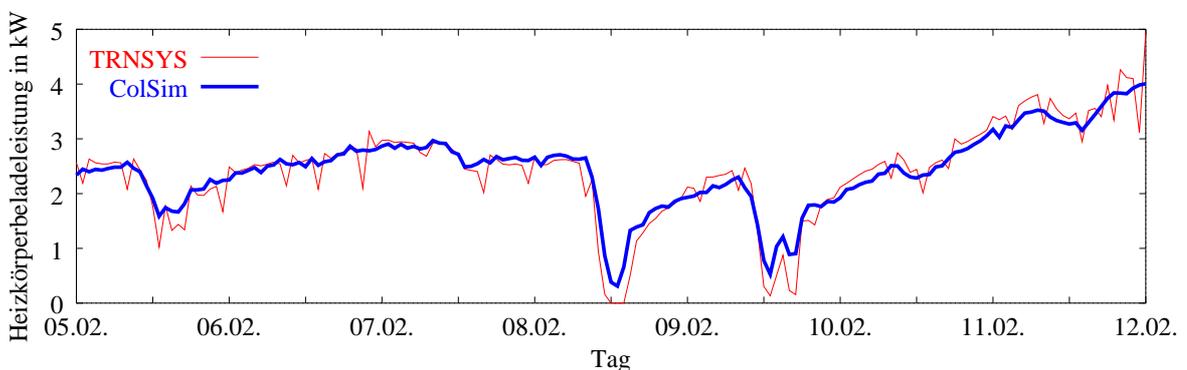


Abbildung 3.2: *Stundenmittelwerte der Heizkörperbeladeleistung für ein Einfamilienhaus nach TASK 26 mit dem Dämmstandard von $60 \text{ kWh/m}^2\text{a}$ und der Klimaregion Zürich (Quelle: [9]).*

der Heizkörper-Beladeleistung über einen Zeitraum von mehreren Tagen im Winter. Es zeigt sich eine sehr gute Übereinstimmung mit dem TRNSYS Ergebnis. Eine wichtige Vergleichsgröße ist auch der Jahresheizenergiebedarf: $8,53 \text{ MWh/a}$ (TRNSYS) gegenüber $8,87 \text{ MWh/a}$ (*ColSim*). Jahresverbrauch und Lastverlauf zeigen eine gute Übereinstimmung, womit *ColSim* auch für ein typisches Wohngebäude aus unserer Klimaregion⁴ seine Aussagekraft untermauert.

Dieses Simulationsmodell wird im Weiteren als Grundlage herangezogen werden. Durch Erweiterung des Modells mit den modernen Fassadensystemen und dem Anschluss einer typischen solaren Kombianlage wird das für diese Untersuchung notwendige solarsensible Wohngebäude realisiert. Eine genaue Beschreibung erfolgt in Kapitel 3.4.1.

⁴Im TASK 26 sind Einfamilienhäuser im Dämmstandard zwischen 30 und $100 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \text{a})$ gewählt worden. Als Klimaregion wurde der Datensatz für Zürich (Schweiz) gewählt.

3.2 Moderne Fassadensysteme

Die in Kapitel 2.1.2 dargestellten Entwicklungen erfahren in diesem Abschnitt die notwendige Modellbildung zur Integration in die Simulationsumgebung *ColSim*. Sofern entsprechende Messdaten im Rahmen dieser Arbeit aufgenommen werden konnten, erfolgt eine Validierung mit Messdaten.

3.2.1 Transparente Wärmedämmung

Die Transparente Wärmedämmung vereint die Eigenschaft einer Dämmung, d. h. dem Wärmefluss einen hohen Widerstand entgegen zu setzen und gleichzeitig den Energiefluss von außen nach innen in Form von Strahlungsenergie zu ermöglichen. Hieraus resultieren die wichtigsten Parameter der TWD, der k -Wert (Wärmedurchgangskoeffizient) und der g -Wert (Gesamtenergiedurchlass).

Modellbildung

Das Modell zur Abbildung der Eigenschaften der TWD baut auf dem diskretisierten Modell der Wand auf. Die Möglichkeit die Wand aus unterschiedlichen Layern zusammen zu setzen, wird genutzt, und es wird die äußerste Schicht des Wandaufbaues als Transparente Wärmedämmung definiert. Hierzu erfährt das in Kapitel 2.3.2.2 beschriebene Wandmodell eine Erweiterung. Sie ist in der Abbildung 3.3, dem thermischen Ersatzschaltbild einer Wand mit Transparenter Wärmedämmung, ersichtlich. Da die Wärmekapazität einer TWD im Ver-

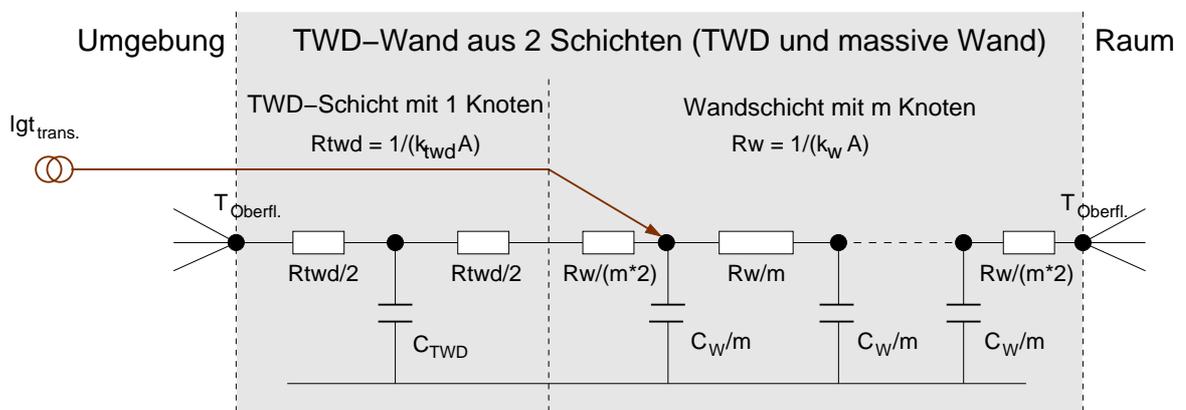


Abbildung 3.3: *Thermisches Ersatzschaltbild einer TWD-Wand. Die Transparente Wärmedämmung erhält im Wandaufbau einen Knoten, während die restliche Wand sich aus mehreren Layern (Baustofftyp) mit m Knoten zusammensetzen kann. Die k -Werte müssen für die jeweilige Schicht angepasst sein.*

gleich zu der folgenden massiven Wand sehr klein ist, wird der TWD-Schicht einer solchen Wandkonstruktion im thermischen Ersatzschaltbild eine einzige Wärmekapazität C_{TWD} zugewiesen. Die TWD erhält einen der n Knoten. Dieser Knoten ist über den Wärmedurchgangswert $2 * k_{ATWD}$ mit dem benachbarten Knoten und der Wandoberfläche verbunden.

Die Sonnenenergie $I_{gt_{trans}}$, die von der TWD auf den Absorber durchgelassen wird, wird in den Knoten hinter der ersten Wandschicht (TWD) eingekoppelt. Hierzu wird die vom Strahlungsprozessor berechnete orientierte Globalstrahlung I_{gt} durch den g -Wert der TWD reduziert:

$$I_{gt_{trans}} = I_{gt} * g_{TWD} \quad (3.1)$$

Validierung des TWD-Modells

Die Datenbasis eines Testraumes in einem Mehrfamilienwohnhaus mit großflächigerer transparenter Wärmedämmung wurde genutzt, um das Modell bezüglich seiner Antwort zu evaluieren. Die Messsequenz beinhaltet mehrere Tage, an denen auch thermografischen Untersuchungen zur Innenwand gemacht worden sind. Somit sind folgende Messwerte aus der Messdatenerfassung und der thermografischen Untersuchung vorhanden.:

- Unmittelbar hinter der äußeren Oberfläche der Kalksandsteinwand ist eine Wärme-flussplatte installiert. Der **Wärmefluss** an diesem Punkt der Wand wird gemessen. Parallel wird an diesem Punkt die Temperatur erfasst. Dies entspricht der **Absorber-temperatur** auf der Außenwand.
- Die **Raumtemperatur** wird über eine zentrale Wohnungstemperatur ermittelt, die wegen der hohen Gebäudeträgheit eine Näherung für den hinter der Fassade liegenden Raum liefert. Aus den thermografischen Aufnahmen kann die **Oberflächentemperatur der Innenwand** abgeleitet werden.
- **Einstrahlung** auf die Südfassade (I_{gt}).
- Aus der **zeitlichen Abfolge** der Solarstrahlung und der gemessenen Innen- und Außenwandoberflächentemperaturen kann die Verzögerung der Wanderwärmung zeitlich bestimmt werden.

Diese Informationen über mehrere Tage ermöglichen einen umfangreichen, dynamischen Vergleich zwischen Simulationsergebnissen und Messwerten. Der reale Aufbau der TWD-Wand ergibt sich wie folgt: (Diese Werte stammen aus Materialdatenbanken oder sind Herstellerdaten.)

- **TWD:** (kapillarstrukturiert von Okalux)
 Dicke: 7 cm (5 cm starke TWD mit 2 cm Luftspalt zur Wand)
 Dichte : 100 kg/m³
 Kapazität: 1000 J/(kg K)
 Wärmeleitfähigkeit: 0,1 W/(m K)
 Gesamtenergiedurchlasswert: 0,8 (für die senkrecht einfallende Strahlung)
- **Kalksandsteinwand + Putz:**
 Dicke: 18 cm

Dichte : 1800 kg/m^3
 Kapazität: 1000 J/(kg K)
 Wärmeleitfähigkeit: $1,3 \text{ W/(m K)}$

Diese Werte werden in die Parameterliste des Modells übernommen. Ein TWD-Wand-Modul entsprechend der Abbildung 3.4 ist dem modularen Gebäudemodell (vgl. Abb. A.1) hinzu-

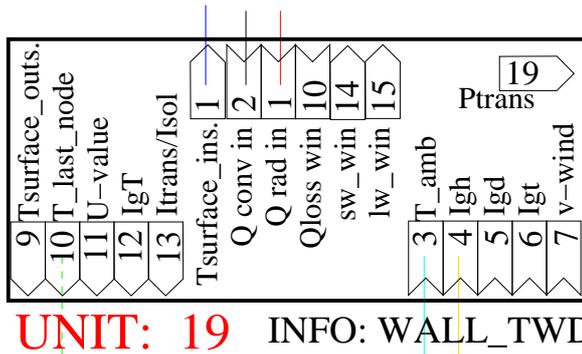


Abbildung 3.4: Vergrößerte Darstellung des TWD-Wand-Moduls in ColSim.

gefügt. Die Messsequenzen zur Einstrahlung auf die Südfassade werden herausgenommen und dem erweiterten dynamischen Multi-Layer-Wandmodell aufgeprägt.

Das Ergebnis der dynamischen Simulation⁵ und den Verlauf der gemessenen Temperaturen zeigt Abbildung 3.5. Die schwarze Linie zeigt den Verlauf der solaren Einstrahlung, gemes-

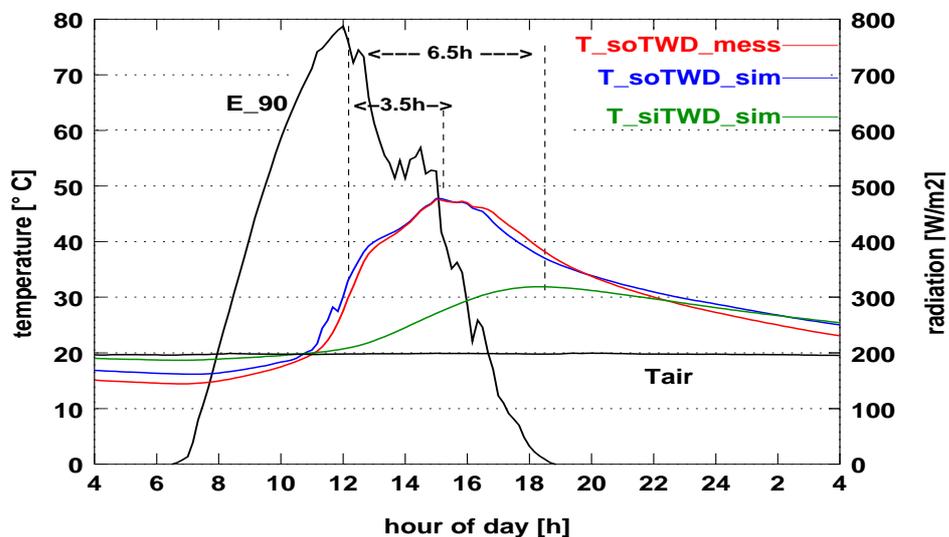


Abbildung 3.5: Ergebnis eines Vergleiches von dynamischer Simulation einer TWD-Wand mit Messwerten für einen Zeitabschnitt von 24 h.

sen und gerichtet auf die Südfassade. Es handelt sich um einen sonnigen Tag, der auf einige

⁵bei Anpassung der Modellparameter

trübe Tage folgte. Die gemessene Einstrahlung wurde direkt dem Simulationsmodell aufgeprägt. Die rote Kurve (T_{soTWD_mess}) zeigt den Temperaturverlauf der Messung und spiegelt die Antwort des TWD-Absorbers auf die Einstrahlung wider. Die weiteren Temperaturkurven zeigen die Ergebnisse der Simulation. Die blaue Kurve (T_{soTWD_sim}) ist die simulierte Absorbtemperatur. Man erkennt die gute Übereinstimmung mit der gemessenen Temperatur. Die grüne Kurve ($T_{si_TWD_sim}$) zeigt die Innenwandoberflächentemperatur. Sie ist ebenfalls das Ergebnis der Simulation. Vergleichend dazu gibt es Messwerte, die über Thermografiemessungen von der Innenwand ermittelt wurden. Diese Aufnahmen werden im Anhang C näher dargestellt, sie belegen, dass sich Teile der Innenwand auf über 30 °C erwärmt haben. Dieses Ergebnis liefert auch die Simulation, wobei dem Simulationsmodell ein 1-dimensionaler Charakter zur Grunde liegt. Die Thermografieaufnahmen wurden als Zeitreihe aufgenommen, sie zeigen auch die Verzögerung der Maximaltemperaturen auf Absorber und Innenwand. Wie Abbildung 3.5 zu entnehmen ist, erreicht der Absorber 3 1/2 h nach maximaler solarer Einstrahlung seine Höchsttemperatur. Nach weiteren 3 h hat auch die Innenwandtemperatur ihr Maximum erreicht. Wie diese Ausführung erkennen lässt, ist durch 1-dimensionale Modellbildung das thermische dynamische Verhalten einer TWD-Fassade abbildbar.

Der Einfluss des 3-dimensionalen Wärmeflusses lässt sich in Abbildung 3.6 erkennen. Die TWD-Innenwand erwärmt sich nicht homogen. Der Fehler des 1-dimensionalen Modells lässt sich durch den effektiven Wärmeübergang ($\alpha_{i_{conv}}$) der inneren Mauerschicht an die Raumluft an die Realität annähern. Die Bestimmung der Modellparameter auf Basis von effektiven Kennwerten, in die die typischen Umgebungsbedingungen eingehen, ist grundlegend für eine korrekte Abbildung.

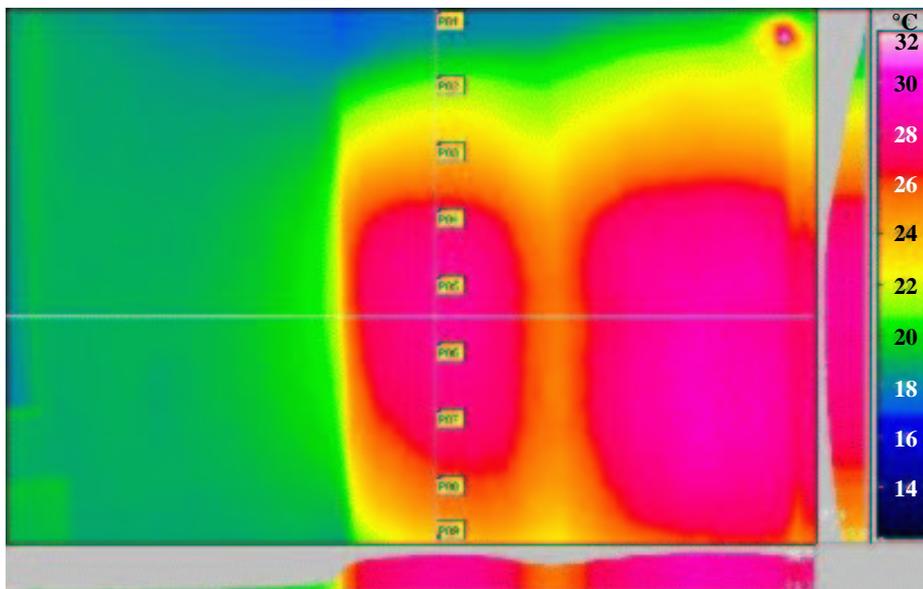


Abbildung 3.6: IR-Aufnahme der inneren Wandoberfläche einer Wand mit zwei TWD-Elementen (15:00 Uhr). Erkennbar ist der drei-dimensionale Wärmeleitungseffekt.

3.2.2 Phasenwechselmaterial im Wandverbund

Der Latentwärmespeicher im Wandverbund verfolgt die Idee im Phasenwechsel solare Wärme zu nutzen und das Wohnhaus damit zu klimatisieren. So kann in Wintermonaten solare Energie gespeichert werden, die zeitverzögert wieder an den Raum abgegeben wird, während im Sommer durch die Absorption der Wärme in der Wand, die Zahl der Überhitzungsstunden reduziert werden kann. Genutzt wird die Wärmespeicherung bei konstanter Temperatur, welche durch die Enthalpieänderung beim Phasenübergang (z. B. fest \rightarrow flüssig) bewirkt wird. Dieser Vorgang ist reversibel. In diesem Kapitel wird die Implementierung des PCM-Modells und die Integration in das dynamische multilayer Wandmodell beschrieben.

Abbildung 3.7 zeigt das Verhalten eines Aggregatswechsels von fest nach flüssig in einem

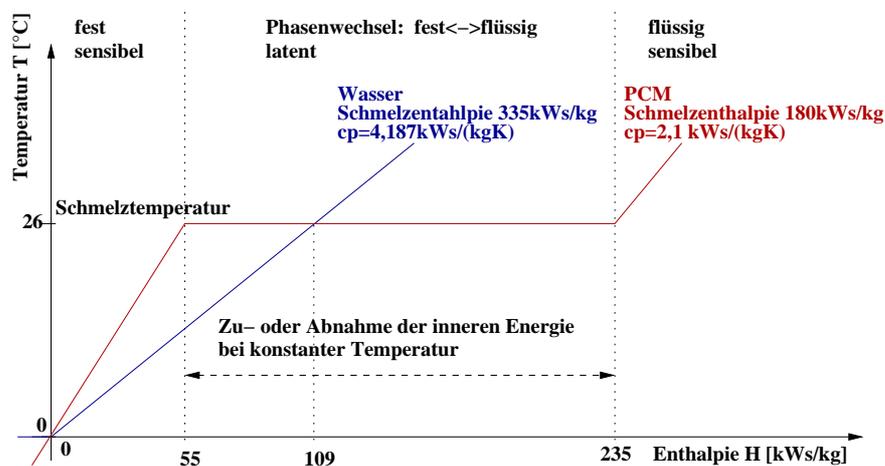


Abbildung 3.7: Beispiel eines Temperatur/Enthalpiediagrammes für ein Kilogramm reines Paraffin (PCM) mit einer Schmelztemperatur von ca. $26\text{ }^{\circ}\text{C}$. Die Kennlinie für Wasser ist zum Vergleich mit aufgetragen.

Temperatur/Enthalpie-Diagramm auf. Die Kennlinie für Wasser ist zum Vergleich mit aufgetragen. Als Beispiel wurde ein Kilogramm Paraffin mit einer Schmelztemperatur⁶ von ca. $26\text{ }^{\circ}\text{C}$ und einer Schmelzenthalpie⁷ von 180 kW s/kg gewählt. Die spezifische Wärmekapazität für Wachse liegt typischerweise bei $c_p = 2,1\text{ kW s/kgK}$, die Wärmeleitfähigkeit bei $\lambda = 0,18\text{ W/mK}$.

Mit dem Einbringen des Latentmaterials in den Baustoff nimmt das Gemisch in etwa die Kennwerte des Baustoffs an. Die Mikroverkapselung und die damit verbundene große Oberfläche des Materials bewirkt einen guten Wärmeübergang der Wärme an das PCM. Insgesamt lässt sich heute eine Schmelzenthalpie des PCM-Baustoffs von ca. 10 bis 30 kW s/kg realisieren.

⁶Dieser Wert ist flexibel und wird von der Molekülkettenlänge der Kohlenwasserstoff-Verbindungen bestimmt.

⁷Bei reinen Paraffinen liegt die Schmelzenthalpie zwischen 180 und 230 kW s/kg .

Modellbildung

Wie aus Abbildung 3.7 ersichtlich, spielen für den betrachteten Temperaturbereich innerhalb einer Wohnung drei Bereiche eine Rolle:

- PCM im Baustoff ist fest (sensibler Bereich),
- mit Erreichen der Schmelztemperatur beginnt der Phasenwechsel (latenter Bereich).
- PCM im Baustoff ist flüssig (sensibler Bereich).

Grundlage des Modells ist wieder das diskretisierte $1 \times n$ -Wandmodell. Es wird ein Knoten als PCM-Element definiert. Die Wahl des Knotens wird durch die Reihenfolge im Wandaufbau bestimmt. In der Regel wird es aber der erste Knoten nach der Innenwandoberfläche der PCM-Knoten sein. Dies ist dadurch bedingt, dass das Material optimal aktiviert wird, wenn es im Innenbereich eingesetzt wird.

Unterhalb der Schmelztemperatur definiert sich der Energieinhalt der PCM-Schicht gemäß der Gleichung:

$$Q_1 = m \cdot c_{p1} \cdot T \quad (3.2)$$

Die Zufuhr von Wärme bewirkt eine Zunahme der Temperatur um ΔT :

$$\Delta T = \frac{\Delta Q}{m \cdot c_{p1}} \quad (3.3)$$

Wird die Schmelztemperatur im PCM-Knoten erreicht, beginnt der Phasenwechsel. Es gilt: $T = T_{Schmelz}$. Der Wärmeinhalt der PCM-Schicht definiert sich wie folgt:

$$Q_2 = m \cdot c_{p1} \cdot T_{Schmelz} + \Delta Q \quad (3.4)$$

Ist die Enthalpie des PCM

$$Q_2 \geq m \cdot c_{p1} \cdot T_{Schmelz} + \text{Schmelzenthalpie} (m \cdot \Delta H_{Schmelz}) \quad (3.5)$$

ist das Material vollständig geschmolzen und die flüssige Phase tritt ein, die wie folgt beschrieben werden kann. Der Energieinhalt ist:

$$Q_3 = m \cdot c_{p1} \cdot T_{Schmelz} + m \cdot \Delta H_{Schmelz} + m \cdot c_{p2} \cdot (T - T_{Schmelz}) \quad (3.6)$$

Die Zufuhr von Wärme bewirkt nun wieder eine sensible Erwärmung um ΔT :

$$\Delta T = \frac{\Delta Q}{m \cdot c_{p2}} \quad (3.7)$$

In dem hier zugrunde gelegten Modell wird die Schmelztemperatur als konstant angenommen, der sich während der latenten Phase nicht ändert. Testzellen haben gezeigt, dass die Schichttemperatur während des Schmelzvorganges nicht konstant bleibt [57]. In einem Bereich von ca. 2 K ist der Schmelzvorgang erkennbar. Die Vereinfachung im Modell erscheint jedoch plausibel, da nach Einspeicherung der gesamten Schmelzenthalpie entsprechende Wandtemperaturen erreicht werden.

Einige PCM-Materialien zeigen in der Erstarrungsphase ein anderes Verhalten wie in der Schmelzphase. Die Erstarrungstemperatur liegt unterhalb der Schmelztemperatur. Eine Hysterese im Temperatur/Enthalpie-Diagramm tritt auf (vgl. Abb. 3.8).

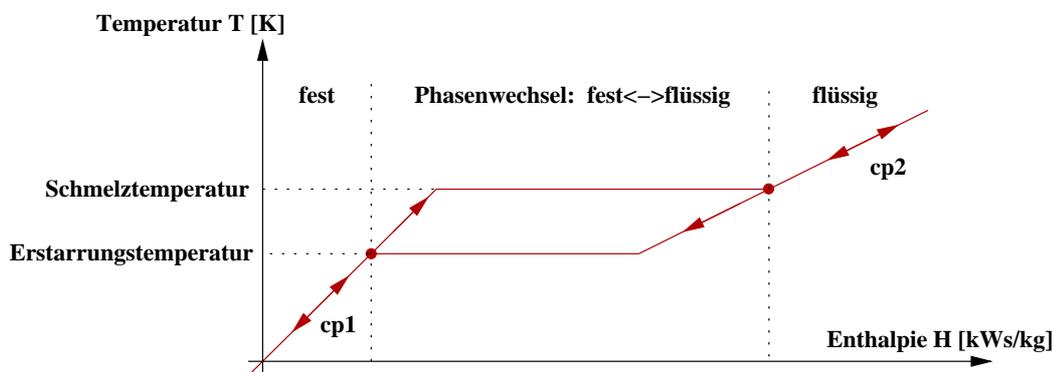


Abbildung 3.8: Wenn Schmelztemperatur und Erstarrungstemperatur sich unterscheiden, ergibt sich im Temperatur/Enthalpie-Diagramm eine Kennlinie mit Hysterese.

Zur Darstellung der PCM-Eigenschaften im Wandmodell zeigt die Abbildung 3.9 Simulationsrechnungen mit dem nach BESTEST beschriebenen und validierten Gebäude in Leichtbauweise (Basisfall 600FF; vgl. Anhang B). Das BESTEST-Verfahren impliziert auch eine sogenannte „FreeFloat“-Sequenz⁸ (des Weiteren mit FF gekennzeichnet), bei der weder geheizt noch gekühlt wird. Die Raumtemperatur kann frei einschwingen. Die Abbildung zeigt einen Vergleich dieser „FreeFloat“-Sequenz mit einer *ColSim*-Rechnung des gleichen Gebäudes, jedoch mit integriertem PCM im Innenputz aller vier Wände. Beispielfhaft wurde ein PCM-Putz mit einer Schmelzenthalpie von $20 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$ und der Schmelztemperatur von 22 °C gewählt. Das Latentmaterial wird deutlich aktiviert. Die maximale Raumtemperatur von ca. 32 °C für den Raum ohne PCM (Troom_FF) wird durch den Einsatz von PCM um ca. 4 Kelvin reduziert (Troom_FFpcm). Am Verlauf der Temperatur des PCM-Innenputzes der Nordwand (Tnode1_north_FFpcm) sieht man, dass das Material bei Erreichen der Schmelztemperatur bei dieser verharrt, bis das Material vollständig geschmolzen ist. Danach steigt die Temperatur wieder an. Bei der Abkühlung ab 16.00 Uhr verhält sich das Material entsprechend umgekehrt. Der Wärmespeichereffekt kommt zur Geltung. Die Raumtemperatur im

⁸Das BESTEST-Verfahren schreibt ein 1-Zonenmodell mit $8\text{ m} \times 6\text{ m}$ Grundfläche vor. Die Südseite beinhaltet eine 12 m^2 große Fensterfläche. In dem hier eingesetzten 600FF-Fall hat der Wandaufbau eine sehr leichte Bauweise. Die Raumtemperaturen bewegen sich an dem Referenztag für den FreeFloat-Fall im Bereich von -18 °C und $+32\text{ °C}$.

„PCM-Raum“ ist nach 18.00 Uhr höher als im Raum mit herkömmlichem Putz, da der PCM-Innenputz und die Oberflächentemperaturen der Innenwände noch deutlich größer sind als die Umgebungstemperatur. Weitere Kurven ($T_{\text{surface_north_FF}}$) zeigen die Oberflächentemperaturen der Innenwand.

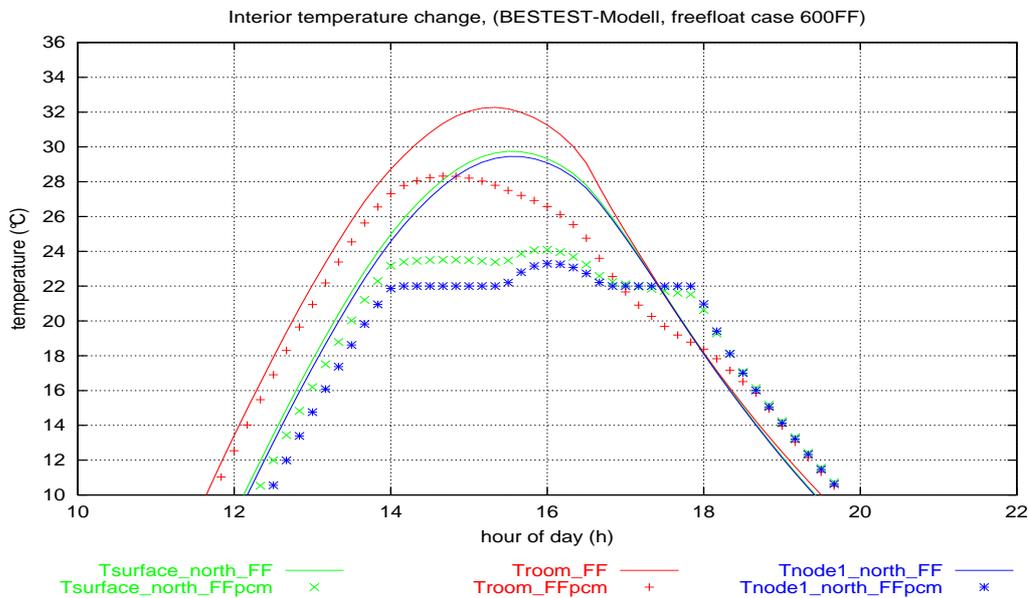


Abbildung 3.9: Simulationsrechnungen eines 1-Zonenmodells mit und ohne Phasenwechselmaterial im Innenputz der vier Wände. (Die durchgezogenen Kurven zeigen den Verlauf ohne PCM, die Marker den entsprechenden Verlauf mit PCM.)

Das Beispiel zeigt, dass die Integration des latenten Kennlinienmodells in das Wandmodell von *ColSim* zum gewünschten Temperaturverlauf im PCM-Raum führt. Im Weiteren wird durch eine Messreihe aus realen Testzellen das Modell geprüft und validiert.

Validierung des PCM-Modells

Zwei fast identische Versuchsräume⁹ im Leichtbau (eine mit PCM-Innenputz und eine mit einem herkömmlichen Referenzputz) vom Fassadenteststand des Fraunhofer ISE, wurden vermessen. Auf Basis der Messwerte von mehreren Tagen im Sommer wird das Modell bezüglich seiner Antwort evaluiert. Hierzu wird die Raumeometrie, sowie der Aufbau der Wände und der Fenster in die Parameterliste des *ColSim*-Gebäudemodells eingetragen. Die Tabelle 3.2 beschreibt die charakteristischen Kenndaten des Innenputzes der jeweiligen Testräume. Entsprechend der Realität, werden die Simulationsmodelle unter Einfluss der

Referenzraum							
0,06	21	0,7	0,92	1400	—	—	0,7
Dicke	Fläche	λ	c_p	δ	T_{melt}	ΔH_{melt}	Luftwechsel
[m]	[m ²]	[W/mK]	[kJ/s/kgK]	[kg/m ³]	[°C]	[kJ/s/kg]	[1/h]
0,06	21	0,7	0,92	1400	26	25	0,7
PCM-Raum							

Tabelle 3.2: Beschreibung des Innenputzes für den Referenzraum ohne PCM und die identische Kabine mit mikroverkapselten Paraffin im Putz.

gemessenen Umgebungstemperaturen und der solaren Einstrahlung berechnet. Ebenso wird der freie Luftwechsel, der durch Messungen bestimmt worden ist, dem Modell aufgeprägt.

Die Abbildungen 3.10 und 3.11 zeigen die Ergebnisse der dynamischen Simulationen im Vergleich mit den Messwerten. Ausgehend von dem Versuchsraum **ohne** Latentmaterial (vgl. Abb. 3.10) wird zuerst gezeigt, dass die Simulation des Referenzraums durch Parameteranpassung zu einer guten Abbildung der realen Messwerte führt. Das oberste Diagramm stellt die Raumtemperaturkurve dar. Während die rote Kurve die gemessenen Werte darstellt, zeigt die schwarze Kurve die dynamische Modellantwort der Simulation. Es zeigt sich eine gute Übereinstimmung der Kurven. In der Auskühlungsphase verhält sich die simulierte Raumtemperatur etwas dynamischer. Die Aufwärmphase bedingt durch Einstrahlung und Außentemperatur zeigt dagegen eine sehr gute Übereinstimmung mit den Messwerten. Das zweite Diagramm stellt die Temperaturverläufe in dem PCM-Putz dar. Auch hier ergibt sich eine gute Übereinstimmung der Simulationsergebnisse mit den Messwerten. Die unteren zwei Diagramme zeigen den Verlauf der Klimabedingungen zur entsprechenden Zeit.

Nachdem eine erfolgreiche Abbildung des Referenzraumes gezeigt wurde, wird die Putzschicht in der Parameterliste des Wandaufbaus durch Setzen der spezifischen Kennwerte für den PCM-haltigen Innenputz neu charakterisiert (vgl. Tab. 3.2). Eine erneute Simulation unter gleichen Klimabedingungen und Störeinflüssen (Luftwechsel) ergeben Simulationsergebnisse, die mit den Messwerten aus dem Versuchsraum **mit** PCM-Putz in der Abbildung 3.11 miteinander verglichen werden. Wieder zeigt sich eine gute Übereinstimmung der Temperaturverläufe für Raumluft- und Putztemperatur. Während des Aggregatswechsels ist die Übereinstimmung nicht so deutlich. Das Modell geht von einer konstanten Schmelztemperatur aus. Die Messwerte zeigen jedoch, dass der Phasenwechsel in einem Temperaturbereich

⁹ca. 4,3 m² große Kabinen mit Südfenster

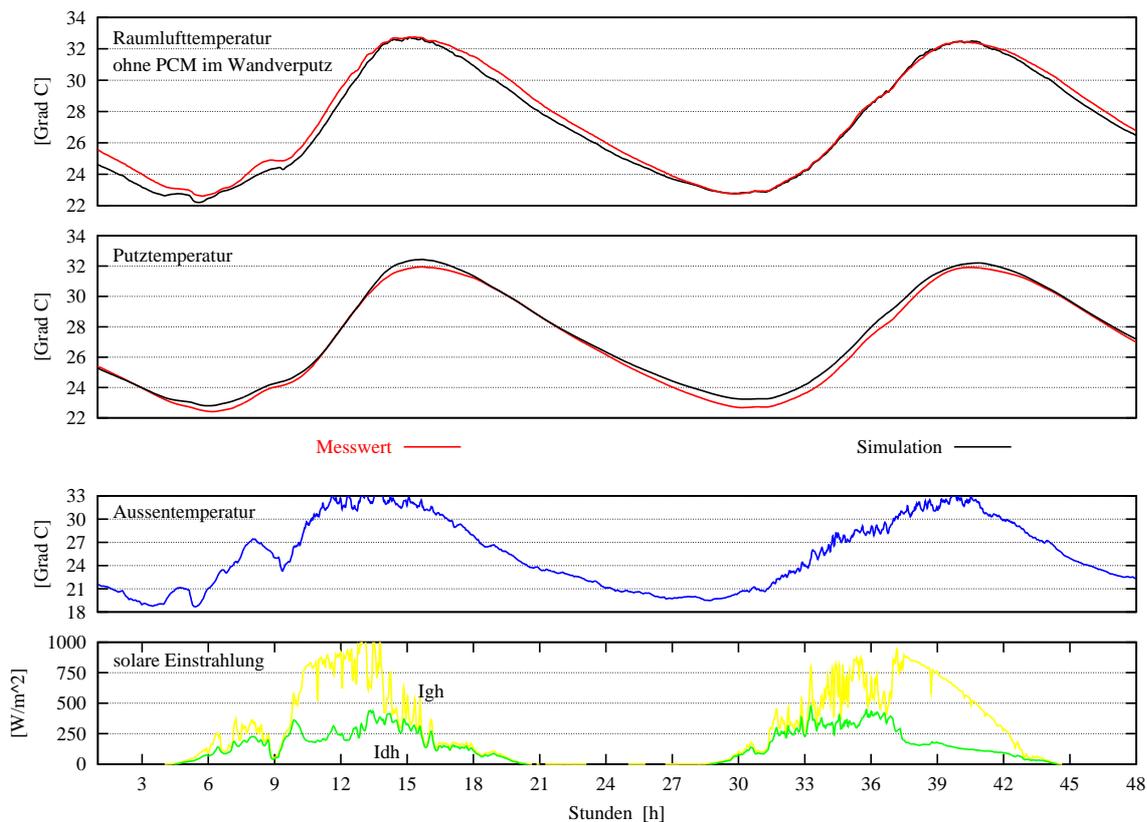


Abbildung 3.10: Bei der Simulation des Referenzraumes (Innenputz ohne Phasenwechselmaterial) wird zuerst das Modell an den realen Testraum angepasst. Es zeigt sich eine gute Übereinstimmung der Temperaturverläufe für Raumluft- und Putztemperatur über den gegebenen Zeitraum.

von ca. 2 Kelvin ($25\text{-}27\text{ }^{\circ}\text{C}$) stattfindet. Die angenommene feste Schmelztemperatur ($26\text{ }^{\circ}\text{C}$) wirkt sich auf den Raumtemperaturverlauf aus. Sie ist während des Aggregatwechsels niedriger. Erkennbar ist aber auch, dass die lokalen Minimas und Maximas denen der Messung entsprechen. Dies bedeutet, dass die Vereinfachung im Modell (konstante Schmelztemperatur) zwar den Bereich des Phasenwechsels nicht genau abbildet, die Absorption der Schmelzenthalpie bei fester Temperatur jedoch zu einem Temperaturverlauf führt, der z. B. die maximalen Raumtemperaturen entsprechend der Realität um fast 2 Kelvin (im Vergleich zum Referenzraum) senkt.

Dieser Vergleich zeigt, dass eine Abbildung des PCM-Putzes mit der angenommenen Vereinfachung möglich ist.

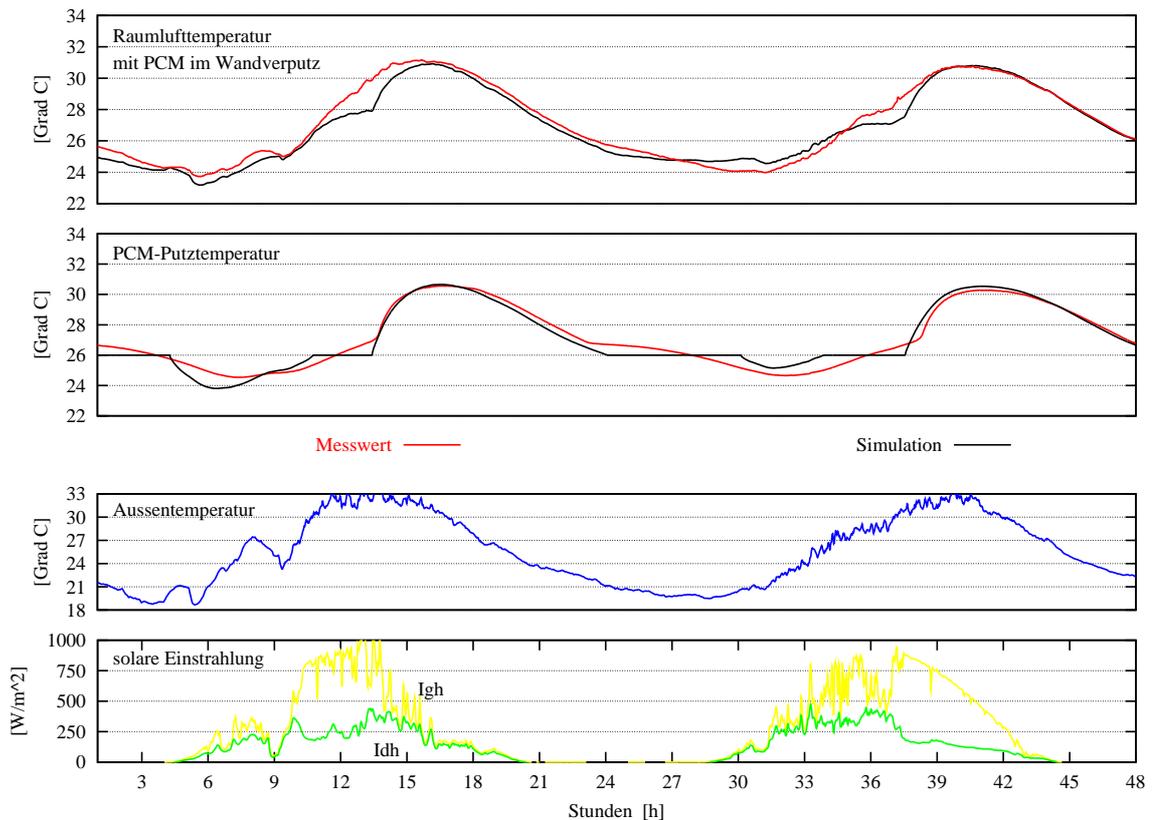


Abbildung 3.11: Mit dem Setzen der spezifischen Kennwerte für den PCM-Putz, kann eine Simulation durchgeführt werden, deren Ergebnisse vergleichend mit den Messergebnissen aus der Kabine mit PCM-Innenputz hier dargestellt ist. Wieder zeigt sich eine gute Übereinstimmung der Temperaturverläufe für Raumluft- und Putztemperatur über den gegebenen Zeitraum. Der Moment des Aggregatswechsels offenbart die Vereinfachung im Modell. Die konstant angenommene Schmelztemperatur (konstant bei $26\text{ }^{\circ}\text{C}$) entspricht nicht der Realität. Laut Messung findet der Phasenwechsel in einem Temperaturbereich von ca. 2 Kelvin ($25\text{--}27\text{ }^{\circ}\text{C}$) statt.

3.2.3 Verschattungseinrichtung

Stellbare Sonnenschutzsysteme bieten die Möglichkeit, temporär die transparenten Flächen in ihren Wärme- und Sonnenschutzigenschaften zu verändern. Diese Änderungen spiegeln sich in zwei Kennwerten wider. Zum einen in der Reduktion des U_w -Wertes, der die Wärmeverluste der Fensterflächen auf Grund der Temperaturdifferenz zwischen Innen und Außen bestimmt, und der Reduktion des g-Wertes, der den Gesamtenergiedurchlass der Strahlung in den Raum quantifiziert. Im Weiteren wird die Reduktion des U_w -Wertes durch eine Verschattungseinrichtung vernachlässigt. Die Verschattung wird innerhalb der Wärmeflussregulierung zum Überhitzungsschutz eingesetzt.

Nach Kapitel 2.3.3 setzt sich der Energietransport der Strahlung durch die Fenster aus der transmittierten Direktstrahlung:

$$\dot{Q}_{\text{dir}} = I_{bt} \cdot \tau(\theta) + I_{dt} \cdot \tau_{\text{diff}} \quad (3.8)$$

und der Sekundärgewinne:

$$\dot{Q}_{\text{sek}} = I_{bt} \cdot (g(\theta) - \tau(\theta)) + I_{dt} \cdot (g_{\text{diff}} - \tau_{\text{diff}}) \quad (3.9)$$

zusammen. Die Sekundärgewinne resultieren aus der Absorption der Strahlung an den Scheiben und der transmittierten Diffusstrahlung. Damit ergibt sich der Gesamtenergietransport zu: $\dot{Q}_{\text{ges}} = \dot{Q}_{\text{dir}} + \dot{Q}_{\text{sek}}$.

Mit Einsatz der Verschattung reduziert sich der effektive Glasflächenanteil und somit der Wärmeeintrag durch die Fenster. Je nach Verschattungsanteil und -system wird ein effektiver Reduktionsfaktor $f_{\text{red}}(s)$ bestimmt, der den Solareintrag durch die Fenster vermindert:

$$\dot{Q}_{\text{sol}} = f_{\text{red}}(s) * \dot{Q}_{\text{ges}} = f_{\text{red}}(s) * (\dot{Q}_{\text{dir}} + \dot{Q}_{\text{sek}}) \quad (3.10)$$

$f_{\text{red}}(s)$ ist abhängig von dem Verschattungssystem und dem Flächenanteil der Verschattung. Innenliegende Systeme erreichen bei kompletter Verschattung eine Reduktion der passiven Solargewinne bis 50 %, außenliegende Lamellensysteme sind deutlich besser (bis zu 80%). Bei optisch schaltenden Schichten hängt der Reduktionsfaktor f_{red} von dem Maße der Verdunklung ab. So lässt sich der solare Gesamtgewinn mit gaso- oder elektrochromen Schichten um bis zu 70% reduzieren.

3.3 Heizkörper: Radiatoren und Konvektoren

Die Radiatorheizung ist im Wohnungsbau weit verbreitet und wird auch in solaroptimierten Gebäuden weiterhin zum Einsatz kommen. Als Voraussetzung für eine realistische Bewertung unterschiedlicher Heizsysteme und deren Regelung wurde ein neues Heizkörpermodell in *ColSim* entwickelt. Die Modellbeschreibung des Raums mit Luft- und Strahlungsknoten ermöglichen die Betrachtung der Heizkörperwärmeabgabe in konvektiver Form an das Luftvolumen und in radiativer Form an die Bauteiloberflächen.

Modellbildung

Das neue Heizkörpermodell bildet die konvektive Wärmeleistung und den Strahlungsanteil unterschiedlicher Heizkörpertypen als Funktion der mittleren Heizkörperübertemperatur ΔT ab. Grundlage dieser Modellierung ist die Änderung der Leistung \dot{Q} um die produktspezifische Norm-Wärmeleistung¹⁰ \dot{Q}_N , beschrieben durch die Gleichung nach Recknagel [53]

¹⁰Die Bestimmung der Norm-Wärmeleistung von Heizkörpern als Grundlage der Leistungstabellen der Hersteller beruhen auf DIN 4703 T1, DIN 4704 T2 und der europäischen Norm DIN EN 442 T2.

und VDI-Wärmeatlas [71]:

$$\dot{Q} = \dot{Q}_N * \left(\frac{\Delta T}{\Delta T_N} \right)^n \quad (3.11)$$

ΔT beschreibt die mittlere arithmetische Übertemperatur zwischen Heizmittel und Raumluft:

$$\Delta T = \frac{T_{VL} + T_{RL}}{2} - T_{Luft} \quad (3.12)$$

ΔT_N ist die Übertemperatur bei Normbedingungen. T_{VL} ist die Temperatur am Heizkörpereintritt und T_{RL} die am Heizkörperaustritt.

n ist der produktspezifische Heizkörperexponent und liegt zwischen 1,1 und 1,45. Typische Werte¹¹ für Heizelemente sind:

- Radiator: $n = 1,30$
- Rohre: $n = 1,25$
- Plattenheizkörper: $n = 1,20$ bis $1,30$
- Konvektor: $n = 1,25$ bis $1,45$
- Fußbodenheizung: $n = 1,1$

Parallel zur Gleichung 3.11 ergibt sich die Wärmeleistung in Abhängigkeit des Massenstromes des Wärmeträgermediums durch den Heizkörper:

$$\dot{Q} = \dot{m} \cdot c_p \cdot (T_{VL} - T_{RL}) \quad (3.13)$$

In Näherung wird analog zur Gleichung der thermischen Verluste eines Sonnenkollektors

$$\dot{Q}_V = A * k_0(T_K - T_U) + A * k_1(T_K - T_U)^2 \quad (3.14)$$

durch Ermittlung der Koeffizienten k_0 und k_1 eine Polynom-Approximation an die Gleichung 3.11 vorgenommen. \dot{Q}_v beschreibt die thermischen Verluste eines Kollektors infolge von Konvektion und Wärmestrahlung. Abhängig sind die thermischen Verluste von der Kollektorfläche A sowie von der mittleren Kollektortemperatur T_K und der Umgebungstemperatur T_U . Die Faktoren k_0 (Einheit: $W/(m^2K)$) und k_1 (Einheit: $W/(m^2K^2)$) repräsentieren die effektiven Wärmeübergangskoeffizienten des kombinierten konvektiven und radiativen Anteils.

Zur Abbildung des Temperaturabfalls zwischen Heizkörperein- und -austritt wird der Heizkörper in m Knoten (in Fluidlaufrichtung) unterteilt. Jeder Knoten erfährt entsprechend der Umgebungsbedingung eine Auskühlung. Im folgenden diskreten Rechenschritt wird abhängig vom Massenstrom und der Temperatur des vorangegangenen Knotens zunächst Wärme an die Kapazität¹² des Elementes abgegeben und die neue Temperatur des Knotens bestimmt. Anschließend wird die Wärme in radiativer und konvektiver Form an den Raum abgegeben. Dies entspricht der „Plug-Flow“-Modellierung der *Colsim*-Hydraulik-

¹¹Diese Werte werden bei der wärmetechnischen Prüfung ermittelt.

¹²Ein Knoten beinhaltet die Kapazität von Wärmeträgermedium und Heizkörperelement.

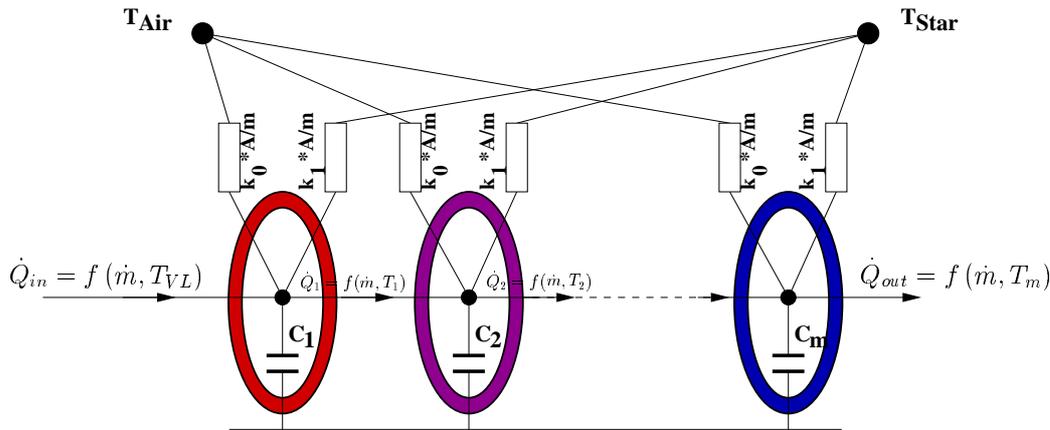


Abbildung 3.12: RC-Ersatzschaltbild des Heizkörpermodells in ColSim in einer Diskretisierung mit m Knoten. \dot{Q}_{in} wird zunächst auf den gemeinsamen Knotenpunkt von Wärmeträgermedium und Heizkörperelement abgelegt. Daraufhin folgt die getrennte Abgabe (konvektiv und radiativ) der Wärme an den Raum.

komponenten. Somit gibt jeder Heizkörperknoten entsprechend seiner Übertemperatur zur Umgebung Wärme in konvektiver und radiativer Form an den Raum ab. Die Übertemperatur bestimmt sich nicht mehr als arithmetisches Mittel nach Gleichung 3.12, sondern nach $\Delta T_{k_0} = T_{Heizkoerperknoten} - T_{Luft}$ und $\Delta T_{k_1} = T_{Heizkoerperknoten} - T_{Strahlung}$. Bei negativer Temperaturdifferenz, kann der Heizkörper auch Wärme aufnehmen. In der Wahl der Parametrierung (vgl. Tabelle in Abb. 3.13) wurde darauf geachtet, dass die produktspezifischen Angaben der Heizkörperhersteller direkt eingehen.

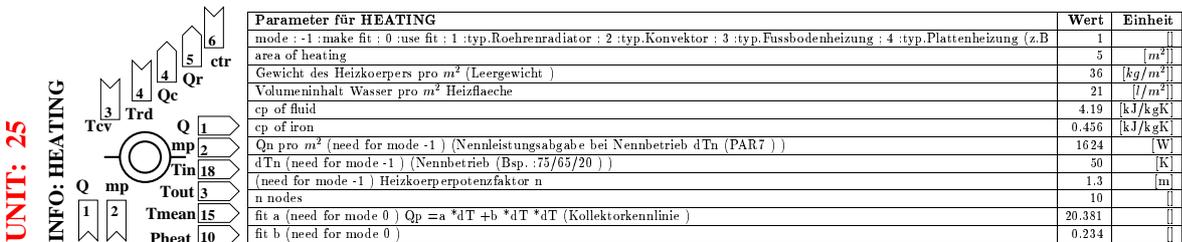


Abbildung 3.13: Darstellung zur grafischen Realisierung des Heizkörpermodells in XFIG und die dazugehörige Parameterliste.

Im Folgenden zeigt eine Validierungssequenz die Gültigkeit dieses Modells.

Validierung des Heizkörpermodells

Die Validierung des Heizkörpermodells erfolgte durch Messungen am Systemteststand des Fraunhofer ISE. Die Abbildungen 3.14 und 3.15 zeigen das Ergebnis von Simulationsrechnungen im Vergleich mit Messwerten. Dem Simulationsmodell wurden äußere Bedingungen (T_{Vorlauf} , Volumenstrom, T_{Umgebung}) aufgeprägt. Als Heizkörperkenndaten wurden die Herstellerdaten¹³ sowie die Dimensionierung in die Parameterliste übernommen. Als Systemreaktion auf diese Randbedingungen wird die simulierte Austrittstemperatur des Heizkörpers mit der messtechnisch Ermittelten verglichen.

Die Diagramme zeigen zum einen (Abb. 3.14) den stationären Zustand über 24 Stunden hinweg, sowie die Modellantwort für dynamisches Takten und Auskühlen des Heizkörpers (Abb. 3.15).

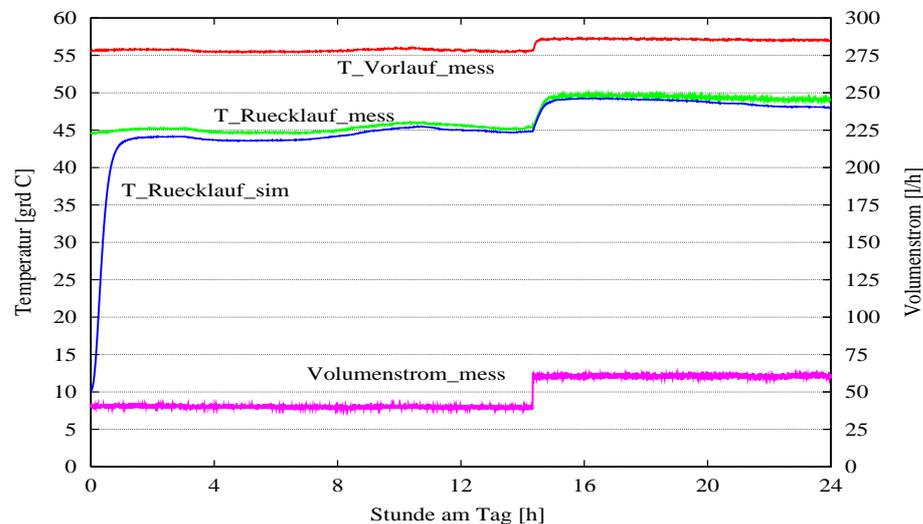


Abbildung 3.14: Vergleich von Simulationsergebnissen zur Austrittstemperatur mit Messwerten des ISE Systemteststandes. Volumenstrom und Vorlauftemperatur werden variabel vorgegeben, während die Raumtemperatur nahezu fest zwischen 23-25 °C liegt (stationäre Bedingungen).

Bei dem stationären Fall gibt es um ca. 14.00 Uhr einen einmaligen Sprung im Volumenstrom um ca. 50 % auf 60 l/h. Ansonsten bleibt der Volumenstrom konstant. Es zeigt sich eine realitätsnahe Abbildung der Heizkörperaustrittstemperatur. Bei dem dynamischen Takten der Heizkreispumpe in Abbildung 3.15 wird der Heizkörper kurzzeitig beladen, um dann über einen längeren Zeitraum (ca. 10 min) ohne Volumenstrom durch Wärmeabgabe an den Raum abzukühlen. Anschließend folgt nach einer längeren Auskühlphase um 15.00 Uhr eine quasistationäre Phase mit sehr hohem Volumenstrom und niedrigen Vorlauftemperaturen.¹⁴ In beiden Diagrammen liegen die simulierten wie gemessenen Temperaturen für den

¹³zwei-säuliger Röhrenradiator von Zehnder Typ *Charleston*.

¹⁴Diese Bedingungen entsprechen einer herkömmlichen Heizkreisregelung bei moderaten Außentemperaturen.

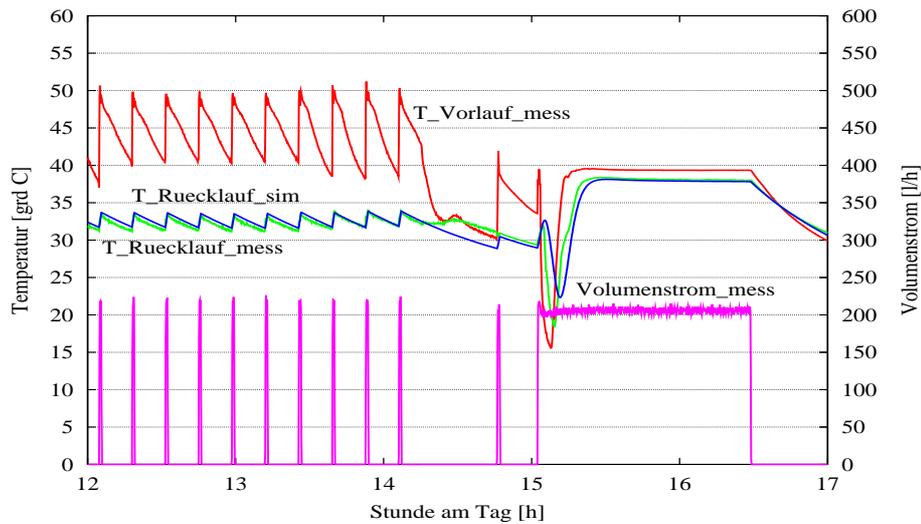


Abbildung 3.15: Vergleich von Simulationsergebnissen für dynamisches Beladen und Auskühlen des Heizkörpers mit Messwerten.

Austritt des Heizkörpers sehr nahe beieinander ($< 1K$). Dies zeigt, dass das Modell die Wärmeabgabe trotz variabler Konditionierung des Heizkörpers realistisch abbilden kann.

3.4 Gesamtmodell des Gebäudes

3.4.1 Modellaufbau des solaroptimierten Gebäudesystems

Das in Kapitel 3.1.2 bereits erwähnte Referenzmodell aus einer Arbeitsgruppe der IEA SHC-Task 26¹⁵ wird als Grundlage für die folgenden simulationstechnischen Untersuchungen erweitert. Ausgehend von dem validierten *ColSim*-Gebäudemodell, wird ein Modell geschaffen, womit durch Einsatz von TWD, Phasenwechselmaterial im Wandverbund und moderner Fenster mit schaltbarer Schicht ein solarsensibles Wohnhaus abgebildet werden kann.

Aus den unterschiedlichen Spezifikationen die in der IEA SHC-Task 26 beschrieben sind, wurde das Einfamilienhaus mit 140 m^2 Wohnfläche mit den Klimadaten für Zürich ausgewählt, das aufgrund seines Wärmedämmstandards einen spezifischen Heizwärmebedarf von $60\text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ aufweist.¹⁶ In der Beschreibung [63] definiert sich das Haus als zweistöckiges Gebäude mit einer Grundfläche von $10 \times 7\text{ m}^2$.

Die Fensterwerte sind für den U_w -Wert = $1,4\text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ und für den g-Wert = $0,589$. Die Tabelle zeigt die Fensterflächenverteilung auf die jeweilige Himmelsrichtung:

¹⁵International Energy Agency - TASK 26: Solar Heating & Cooling

¹⁶Dieser Wert beruht auf einer "idealen" Heizung, bei einer vorgegebenen Raumtemperatur von $19,5\text{ }^\circ\text{C}$.

Orientierung	Ost	Süd	West	Nord
Fläche in m^2	4	12	4	3

Die Luftwechselrate liegt bei $0,4 h^{-1}$ und es wird von internen Gewinnen von 202 Watt ausgegangen. Das Gebäude ist als "mittelschweres" Gebäude ausgelegt, mit 6 cm Polystyrol Isolierung für die Außenwände und 18 cm für die Bodenfläche. Das Dach ist mit 24 cm Holzwohle isoliert.

In [9] ist die Kreuz-Validierungssequenz des *ColSim*-Einzonen-Modells mit dem TRNSYS-Modell nach Task 26 beschrieben. Dieses Einzonen-Modell wird zu einem Mehrzonen-Modell erweitert, um eine realitätsnahe Temperaturzonierung abzubilden. In der Regel weisen solaroptimierte Wohngebäude eine orientierte Raumaufteilung auf. Die nach Süden gerichteten Räume sind die Wohn- und Aufenthaltsräume. Um der Behaglichkeit zu entsprechen, sind dies auch die Räume in denen primär geheizt wird. Die ost- und nordorientierten Räume sind Treppenhaus, Flur, Speicher und Schlafzimmer, die entsprechend der Behaglichkeit niedriger temperiert werden. So definiert sich eine Zone des Mehrzonen-Modells mit einem Drittel der Gesamtwohnfläche als Niedertemperaturzone mit $18,5 ^\circ C$, und der Heiztemperaturzone mit $2/3$ der Gesamtwohnfläche in der je nach Komfortanspruch bis auf $22 ^\circ C$ geheizt werden kann. Geht man von einer üblichen Temperierung von $20 ^\circ C$ aus, so ergibt sich bei idealer Heizung ein spezifischer Wärmebedarf von $64 kWh/(m^2 a)^{17}$. Dies entspricht der EnEV, und kann gerade noch als Niedrigenergiehaus bezeichnet werden. (vgl. Abb. 2.1)

Um das Gebäudeverhalten passiv solar zu gestalten, wird die Fensterfläche der Südwand des Referenzmodells von 12 auf $20 m^2$ vergrößert. Ein $10 m^2$ großer Teil der Südwand wird mit transparenter Wärmedämmung versehen. Der Wandaufbau und die Wahl der TWD wird in 3.2.1 dargestellt.

Um das Speicherverhalten der Wände im Behaglichkeitsfeld zu erhöhen, werden die Wände der Heiztemperaturzone mit einem Innenputz versehen, der mit mikroverkapseltem Phasenwechselmaterial versetzt ist. Der PCM-Baustoff hat eine ideale Schmelztemperatur von $23 ^\circ C$ und eine Schmelzenthalpie von $30 kJ/kg$. Um zu zeigen, welche Auswirkung der Einsatz des PCM-Materials auf den Temperaturverlauf in der Heiztemperaturzone hat, wird dem Modell ein Temperatursprung der Umgebungstemperatur aufgeprägt¹⁸. In nachfolgenden Untersuchungen wird das Zeitverhalten der Antwort des Modells auf spezielle Erregungen noch erläutert werden.

Abbildung 3.16 zeigt die Antwort des Modells auf einen Temperatursprung der Umgebungstemperatur von 10 auf $30 ^\circ C$. Nach dem das System 720 Stunden eingeschwungen ist, ändert sich die Temperatur der Außenluft spontan auf $30 ^\circ C$. Nach weiteren 330 Stunden hat die Raumtemperatur und die Gebäudemasse ebenfalls diese Temperatur erreicht. Man erkennt deutlich den Einbruch im Temperaturverlauf. Hat die Innenwand $23 ^\circ C$ erreicht,

¹⁷Dieser leicht erhöhte spez. Wärmebedarf gegenüber der Modellvorlage aus TASK 26 liegt in der erhöhten Luftwechselrate begründet. Sie wurde um 25 % auf 0,5-fachen Luftwechsel erhöht. Auch wird die Wohnzone statt auf $19,5 ^\circ C$ bis auf $20 ^\circ C$ konditioniert.

¹⁸Dieser Temperatursprung erfolgt bei sonst konstanten Außenbedingungen ohne Einstrahlung.

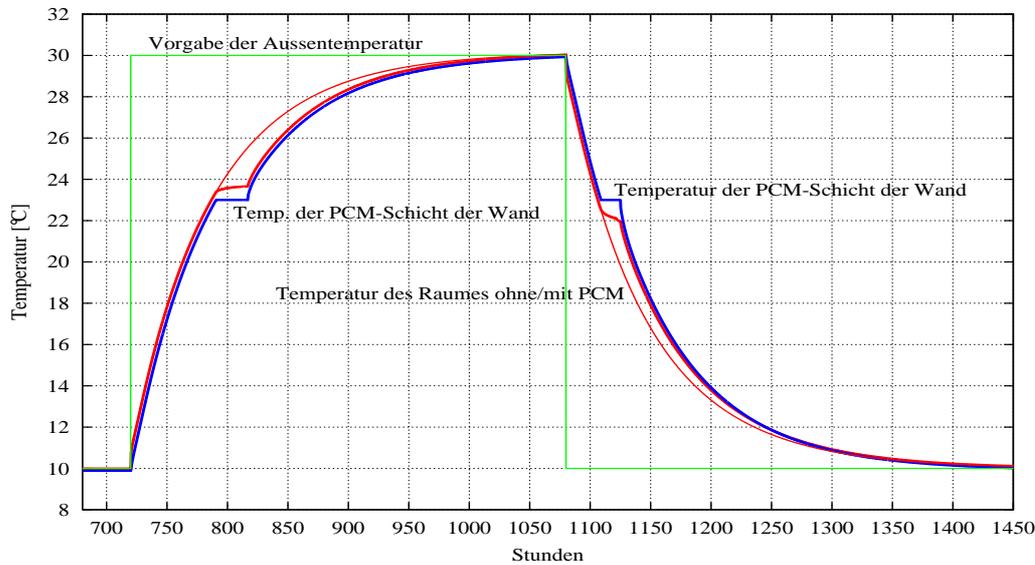


Abbildung 3.16: Sprungantwort der Wohnzone, die mit PCM-Innenputz versehen ist, auf einen Temperatursprung der Umgebungstemperatur von 10 auf 30 °C. Die dünne rote Linie ohne Einbruch zeigt das Verhalten der gleichen Zone ohne PCM-Putz.

speichert das PCM in der Wand weitere Energie ohne Temperaturzunahme. Dies hat auch Auswirkung auf den Temperaturverlauf der Empfindungstemperatur im Raum. Zusätzlich ist im Diagramm der Temperaturverlauf (dünne rote Kurve ohne Einbruch) der gleichen Zone ohne entsprechenden PCM-Putz eingetragen. Die Linie zeigt erwartungsgemäß keinen Einbruch.

Der Grundluftwechsel wird aufgrund der hygienischen Betrachtung aus Kapitel 2.1.4 von 0,4 auf 0,5 h^{-1} erhöht. Damit wird auch dem typischen Nutzerverhalten der gelegentlichen Fensterlüftung¹⁹ Rechnung getragen. Gerade bei Gebäuden mit hohen passiven Gewinnen wird oft die solar- und heizungsbedingte Überwärme einfach “heraus” gelüftet. Auch im Sommer ist mit erhöhter Fensterlüftung durch den Nutzer zu rechnen.

Die beschriebenen Maßnahmen bewirken die erwünschte Reaktion auf Solarstrahlung. Bei idealer Heizung benötigt dieser Gebäudetyp nur noch einen spezifischen Wärmebedarf von 51 $kWh/(m^2a)$. Dieser entspricht einer Reduktion um 13 $kWh/(m^2a)$ (20 %) und bedeutet eine Ersparnis von ca. 1800 kWh fossiler Energie pro Jahr.

¹⁹Fensterlüftung durch den Nutzer ist zeitabhängig, aber meist von kurzer Dauer (Stoßlüftung). So kann z. B. durch ein geöffnetes Fenster ein Luftwechsel von 2-5 h^{-1} erreicht werden.

Solare Kombianlage

Da sich mit einer Wärmeflussregelung durch die Gebäudehülle ein geändertes Heizverhalten einstellt und dies Auswirkungen auf die eigentliche aktive thermische Anlage hat, wird das oben beschriebene Gebäudemodell über zwei Heizkörper an eine solare Kombianlage (vgl. Kap.:2.1.3) zur Heizungsunterstützung angeschlossen.

Die Kombianlage zeichnet sich durch die Dimensionierung nach Tabelle 3.3 aus.

Anlagenteil	Beschreibung
Kollektorkreis	15 m ² Flachkollektor; Rohrleitungssystem zur Abbildung der Rohrleitungsverluste; Anschluss über externen Wärmetauscher an solaren Pufferspeicher; Low-Flow-Regelung, d.h. Regelung auf Zieltemperatur von 60 °C.
Speicher	1000 l Schichtenpufferspeicher mit Ladelanze für Kollektorertrag.
Kesselkreis	Nachheizung mit einem 8 kW Brennwertkessel; Hält ein Bereitschaftsvolumen im Speicher zwischen 55° und 65° C; Entscheidend für den Nutzungsgrad sind tiefe Speicheruntertemperaturen.
Heizkreis	Radiatoren mit einer Fläche von 6,5 m ² , Leistung nach Normbedingungen: 10,5 kW; Drehzahlregelbare Heizkreispumpe mit max. Förderleistung von 1500 l/h; 3-Wege-Mischer zum Einstellen der Vorlauftemperatur nach Regelanweisung; Rohrleitungssystem zur Abbildung der Rohrleitungsverluste.
Trinkwasser- kreis	Tägliche Abnahme von 200 l Warmwasser (45 °C); Dies bedeutet einen Wärmebedarf von ca. 2980 kWh/a (bezogen auf KW:10 °C).

Tabelle 3.3: Auslegungsbeschreibung der an das solaroptimierte Wohngebäude gekoppelten aktiven, thermisch-solaren Heizanlage für Trinkwasser und Heizung.

Die notwendigen Modelle werden aus der *ColSim*-Bibliothek entnommen und zu den entsprechenden hydraulischen Kreisen²⁰ verknüpft. Mit der Parametrierung aller Komponenten und dem Aufprägen eines zyklischen Nutzerprofils für Brauchwasser sowie der Solarstrahlung auf den Kollektor wird gemeinsam zu dem solaroptimierten Wohnhaus eine moderne, solare Heizanlage in ihrer dynamischen Wechselwirkung mit dem Gebäude untersucht. Die Komplexität dieses Gesamtmodells wird durch die Anzahl der 62 Teilmodelle mit insgesamt 920 Modellparametern deutlich. Abbildung 3.17 zeigt den Aufbau der beschriebenen Anlage mit Gebäude als modulares Modell in der grafischen Oberfläche von *ColSim*, realisiert als XFIG-Abbildung.

Das beschriebene und entwickelte Modell eignet sich zur Untersuchung und Entwicklung moderner Regelungskonzepte zur Wärmeverteilung im und am Gebäude. Das Modell zeichnet sich durch seine hohe Flexibilität in Bezug auf Komponenten- und Parametervariation aus. Es integriert das speichernde Verhalten und die verzögerte Abgabe einer TWD-Wand, das Schaltverhalten der Transmission von modernen Verglasungen, sowie das nichtlineare Verhalten von Phasenwechselmaterialien im Wandverbund. Mit der Kopplung des Gebäudes

²⁰Kollektorkreis, Heizkreis, Brennerkreis, Brauchwasserkreis (siehe Tabelle: 3.3)

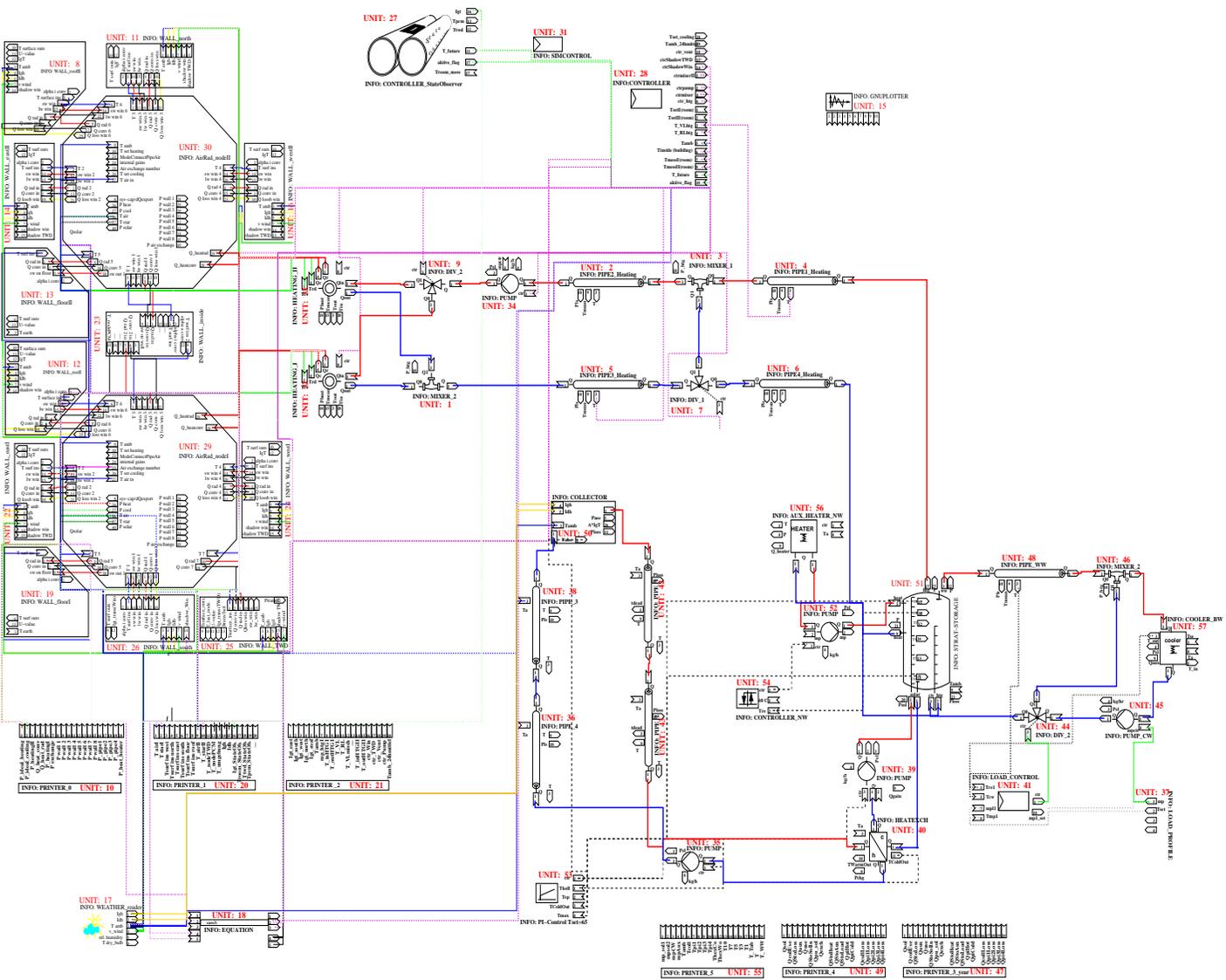


Abbildung 3.17: Modular aufgebautes Simulationsmodell des untersuchten Systems: Zwei Zonen mit insgesamt 12 Wandelementen, die die modernen Entwicklungen beinhalten, der solaren Kombianlage bestehend aus Kollektor, Wärmetauscher, Pufferspeicher und Nachheizeinrichtung, sowie Trinkwasserkreis und Heizkreis mit zwei Wärmeübertragern.

an das Heizsystem und der Aufprägung der Klimabedingungen sind die wichtigsten Größen gegeben, die das thermische Verhalten des Gebäudes in ihrer zeitlichen Abhängigkeit bestimmen.

Für die Untersuchung zur Verbesserung des gewünschten Wohnraumkomforts bei maximalen Energieeinsparmöglichkeiten, reicht der hier gewählte Detaillierungsgrad in zwei Zonen aus. Ein komplettes Wohngebäude mit allen Zimmern (Zonen) nachzubilden, erhöht den Rechenaufwand, hat aber kaum Auswirkung auf die zu entwickelnde Regelstrategie. Die Zusammenfassung mehrerer Räume, die im Temperaturempfinden ähnlich genutzt werden, ist eine sinnvolle Vereinfachung des komplexen Systems. Die Vereinfachungen der Modellierung sind vertretbar, da relative Aussagen durch den Vergleich unterschiedlicher Konzepte miteinander gemacht werden.

3.4.2 Dynamisches Verhalten des Gesamtmodells

Die folgenden vier Abschnitte beleuchten die dynamische Wechselwirkung des Gesamtmodells. Zum Entwurf von prädiktiven Regelungen ist es wichtig, die Antwort der Strecke (Gebäude), bezogen auf die primäre Regelungsgröße in Abhängigkeit von Störgrößen zu kennen.

Abbildung 3.16 zeigte bereits die Sprungantwort der Empfindungstemperatur auf einen Umgebungstemperatursprung. Die Sprungantwort legt nahe, dass das Gebäude auf die Außentemperatur wie ein Verzögerungsglied erster Ordnung wirkt. Eine zu erwartende Verzögerung höherer Ordnung aufgrund der multiplen RC-Verknüpfung im Wandmodell lässt sich nicht erkennen. Im Folgenden werden sinusförmige Erregungssignale verwendet, um die Systemantwort zu untersuchen.

Die Eingangsschwingung lässt sich mathematisch in der Form $X_e = \hat{X}_e \sin(\omega t)$ darstellen. Die Ausgangsschwingung²¹ folgt mit der gleichen Frequenz, aber phasenverschoben und mit einer anderen Amplitude: $X_a = \hat{X}_a \sin(\omega t + \varphi)$. Grafisch lässt sich das durch Abbildung 3.18 darstellen.

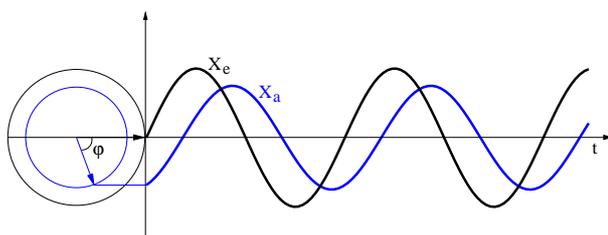


Abbildung 3.18: Die Übertragung der Kreisbewegung mit Kreisfrequenz ω auf eine Linearbewegung bewirkt die Sinusschwingungen mit den Amplituden \hat{X}_e und \hat{X}_a . Die Ausgangsschwingung ist um den Phasenwinkel φ verschoben.

Aus dem Frequenzgang des Systems für ein Verzögerungsglied 1. Ordnung:

$$G(j\omega) = \frac{\hat{X}_a e^{j(\omega t + \varphi)}}{\hat{X}_e e^{j(\omega t)}} = \frac{K_P}{1 + j\omega T_1} \quad (3.15)$$

²¹nach einer ausreichenden Einschwingzeit

folgt aus der Phasenverschiebung für die Zeitkonstante des Systems:

$$T_1 = -\frac{\tan(\varphi)}{\omega} \quad (3.16)$$

Das Verhältnis von Ausgangs- und Eingangsamplitude beschreibt die Dämpfungseigenschaft des Systems und ist abhängig von der Kreisfrequenz $\omega = \frac{2\pi}{T}$. Für $\omega = 0$ gilt $|G(j\omega)| = \frac{\hat{X}_a}{\hat{X}_e} = 1$, für $\omega \rightarrow \infty$ gilt $|G(j\omega)| = \frac{\hat{X}_a}{\hat{X}_e} = 0$.

Die nachfolgenden Betrachtungen beziehen sich auf die Wohnzone des Gesamtmodells, da in dieser Zone die neuartigen Materialien zum Einsatz kommen. Die Niedertemperaturzone wird bis auf die dynamische Kopplung durch die gemeinsame Innenwand nicht mitbetrachtet.

Dynamische Reaktion der Raumtemperatur auf periodische Anregung durch die Außentemperatur

Als Erregung wird dem Modell eine sinusförmige Schwingung der Umgebungstemperatur aufgeprägt. Die Umgebungstemperatur schwingt mit einer Amplitude von 5 K um 20 °C , bei einer Periode von 6 Tagen (144 h). Alle weiteren Eingangsgrößen aus den Klimadaten sind gleich Null gesetzt. Die internen Gewinne werden als konstant mit 152 Watt angenommen. Es wird nicht geheizt und nicht gekühlt. Das Ausgangssignal, in dieser Betrachtung die empfundene Raumtemperatur, folgt dem Eingangssignal mit einiger Verspätung (vgl. Abb. 3.19).

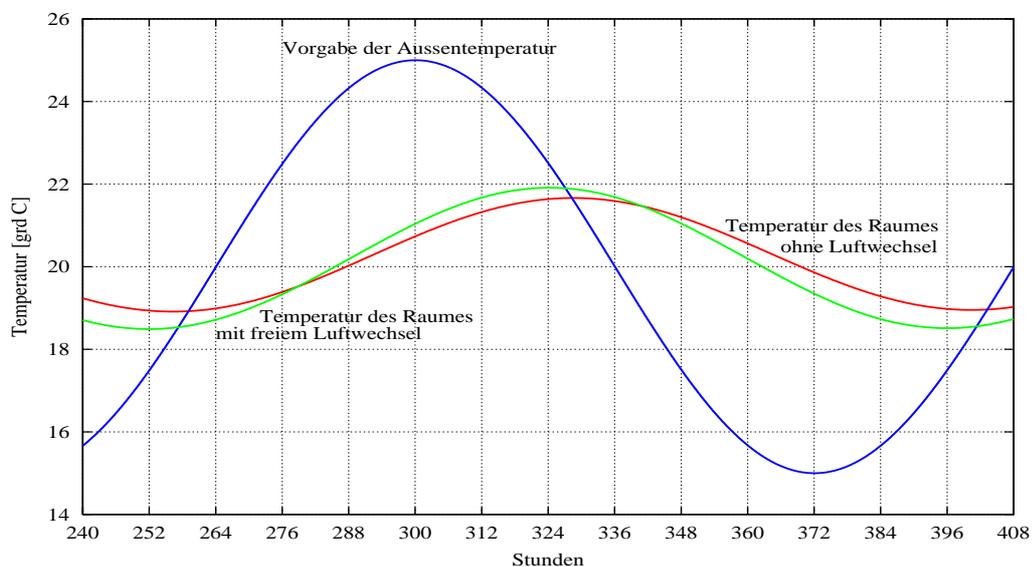


Abbildung 3.19: Antwort der empfundenen Raumtemperatur auf die periodische Erregung der Umgebungstemperatur. Erkennbar ist die Dämpfung im Verlauf der Antwort (bedingt durch die thermische Masse des Gebäudes), sowie die Phasenverschiebung φ zum Erregungssignal die zwischen 60° und 71° liegt.

Aus der Zeitverschiebung von 24 h der Zone mit freier Lüftung folgt eine Phasenverschiebung von $\varphi = -60^\circ$. Für eine Zone ohne Luftwechsel beträgt die Zeitverschiebung 28 h , dies entspricht einer Phasenverschiebung von $\varphi = -70^\circ$. Aus der Beziehung von Kreisfrequenz und Phasenverschiebung nach Gleichung 3.16 ergibt sich für die Zeitkonstante des Systems $T_1 = 40\text{ h}$ für die Zone mit freier Lüftung und $T_1 = 63\text{ h}$ für die Zone ohne Lüftung. Aus der Auswertung der Sprungantwort²² von Abbildung 3.16 resultiert eine Zeitkonstante der Strecke als Antwort auf die Umgebungstemperatur von ca. 2,5 Tagen (60 h).

²²Dies erfolgt grafisch mit der Tangente zur Zeit $t = 0$ an der Sprungantwort und deren Schnittpunkt mit der Parallelen zur Zeitachse durch den Beharrungswert. Dieser Schnittpunkt ist zur Zeit $t = T_1$, der Zeitkonstante des Systems. Mit der "63 %-Regel" [40] kann ebenfalls die Zeitkonstante grafisch bestimmt werden. T_1 ist der Zeitpunkt bei dem der Wert der gemessenen Übergangsfunktion 63 % des Endwertes beträgt.

Das Amplitudenverhältnis $|G(j\omega)| = \frac{\dot{X}_a}{\dot{X}_e}$ für $\omega = \frac{2\pi}{144 h}$ liegt je nach Lüftungsbedingung zwischen 0,25 und 0,35.

Dynamische Reaktion der Raumtemperatur auf periodische Anregung der TWD-Wand durch Solarstrahlung

Als Erregung wird dem Modell eine sinusförmige Schwingung der globalen Solarstrahlung (I_{gh}) auf den Teil der Fassade mit transparenter Wärmedämmung aufgeprägt. Die Globalstrahlung schwingt mit einer Amplitude von 200 W/m^2 um den Offset von 200 W/m^2 . Die Periodendauer T wird auf 144 h festgelegt. Fenster und restliches Gebäude erhalten keine Solarstrahlung. Die Außentemperatur ist konstant bei $10 \text{ }^\circ\text{C}$, der Luftwechsel ist gleich Null. Es wird nicht geheizt und nicht gekühlt. Die internen Gewinne sind fest bei 152 Watt für diese Zone. Das betrachtete Ausgangssignal ist wiederum die empfundene Raumtemperatur und als weitere Zustandsgröße wird die äußere TWD-Wandtemperatur in Abbildung 3.20 mit dargestellt. Die Zeitverschiebung der Raumtemperatur zur Einstrahlung beträgt 29 h ,

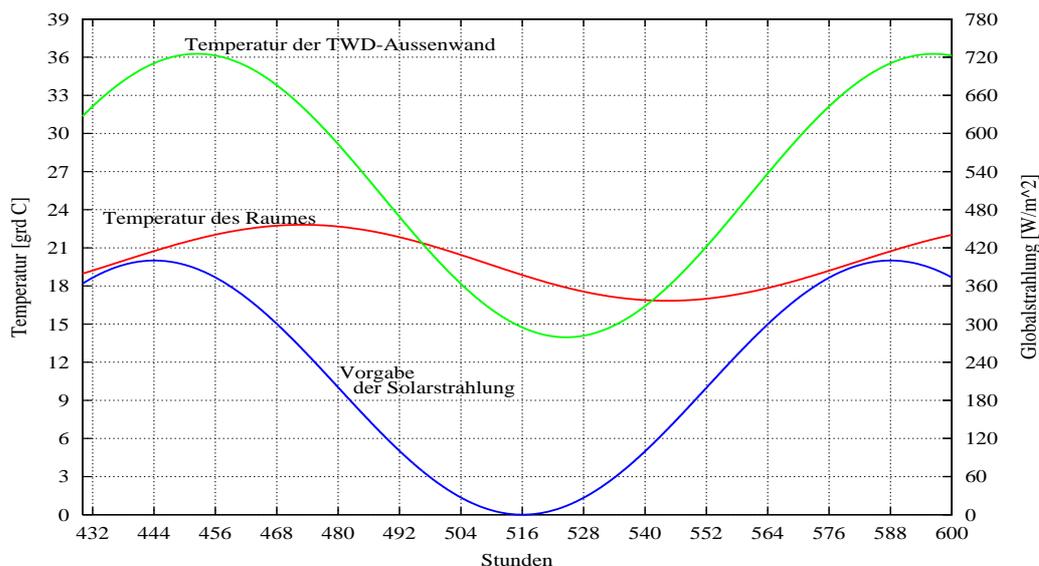


Abbildung 3.20: Antwort der empfundenen Raumtemperatur und der TWD-Außenwandtemperatur auf die sinusförmige Schwingung der globalen Solarstrahlung auf die transparente Wärmedämmung.

die der TWD-Wand 8 h . Für die Raumtemperatur resultiert daraus die Phasenverschiebung $\varphi = -72,5^\circ$. Die Gleichung 3.16 ergibt für die Zeitkonstante $T_1 = 73 \text{ h}$. Die Zeitkonstante für die Reaktion der TWD-Außenwand auf Solarstrahlung ist deutlich kleiner, sie liegt bei $T_1 = 8,3 \text{ h}$.

Das Amplitudenverhältnis als Maß für die Dämpfung ist für $\omega = \frac{2\pi}{144 h}$ und die empfundene Raumtemperatur: $|G(j\omega)| = \frac{\dot{X}_a}{\dot{X}_e} = \frac{3 \text{ K}}{200 \text{ W/m}^2} = 0,015 \frac{\text{K}}{\text{W/m}^2}$.

Dynamische Reaktion der Raumtemperatur auf periodische Solarstrahlung durch die Süd-Fenster

Als Erregung wird dem Modell wieder eine sinusförmige Schwingung der globalen Solarstrahlung (I_{gh}) auf die Fenster der Südfassade aufgeprägt. Diesmal schwingt die Globalstrahlung mit einer Amplitude von 400 W/m^2 um den Offset von 400 W/m^2 . Die Periodendauer ist 24 h . Die TWD ist verschattet und die restlichen Fenster des Hauses erfahren keine Solarstrahlung. Die Außentemperatur ist konstant bei $10 \text{ }^\circ\text{C}$, es erfolgt kein Luftwechsel. Es wird nicht geheizt und nicht gekühlt. Die internen Gewinne sind fest bei 152 Watt für diese Zone. Abbildung 3.21 zeigt die Antwort der empfundenen Raumtemperatur auf die periodische Anregung. Die Zeitverschiebung beträgt 210 Minuten. Daraus ergibt sich

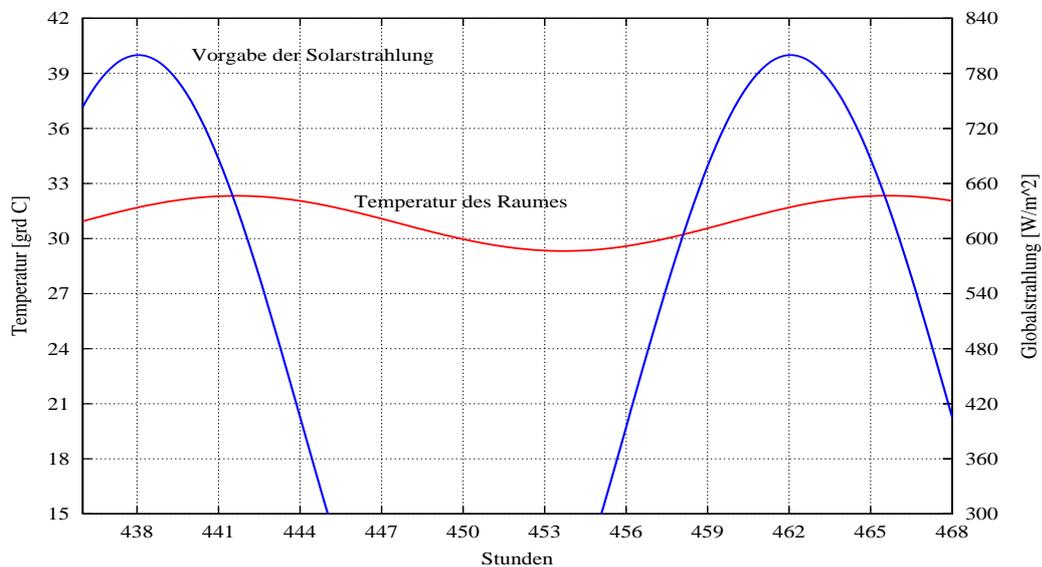


Abbildung 3.21: Antwort der Raumtemperatur auf die sinusförmige Schwingung der globalen Solarstrahlung auf die nach Süden orientierten Fenster. Die Raumtemperatur zeigt hierbei die schnellste Reaktion.

eine Phasenverschiebung von $\varphi = -52,5^\circ$ und eine Zeitkonstante $T_1 = 5 \text{ h}$. Die schnellste Reaktion der Raumtemperatur erfolgt somit auf die einfallende Solarstrahlung durch die Fenster, weil die Strahlung direkt auf die Innenwandoberflächen eingekoppelt wird.

Das Amplitudenverhältnis als Maß für die Dämpfung ist für $\omega = \frac{2\pi}{24 \text{ h}}$ und die empfundene Raumtemperatur: $|G(j\omega)| = \frac{\hat{X}_a}{\hat{X}_e} = \frac{1,5 \text{ K}}{400 \text{ W/m}^2} = 0,0038 \frac{\text{K}}{\text{W/m}^2}$.

Dynamische Reaktion der Raumtemperatur auf periodische Anregung durch die Heizung

Das Gebäude erfährt bis auf eine konstante Außentemperatur von $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ keinerlei Einfluss von weiteren Klimagrößen. Der freie Luftwechsel wird unterdrückt. Der Heizkörper wird von einem periodischen Volumenstrom durchflossen. Der sinusförmige Verlauf des Volumenstroms hat das Maximum bei $0.8\text{ m}^3/\text{h}$. ($\hat{X}_e = 400\text{ l/h}$, Offset: 400 l/h) Die Periode liegt bei 48 Stunden. Die Vorlauftemperatur wird fest mit $55\text{ }^{\circ}\text{C}$ vorgegeben. Als Antwort

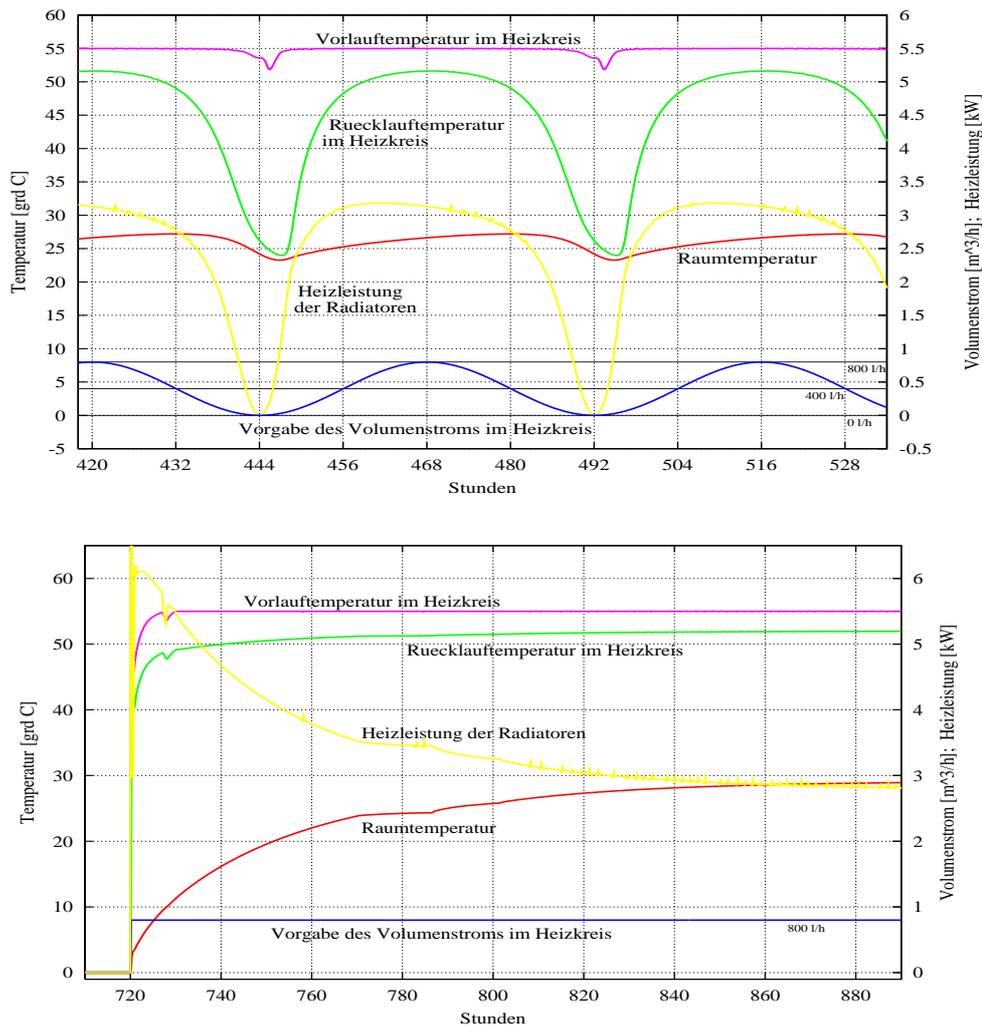


Abbildung 3.22: Antwort der empfundenen Raumtemperatur auf eine periodische Erregung durch die Heizung, sowie auf einen Sprung des Volumenstroms des Heizkreises bei konstanter Heizkreisvorlauftemperatur. Bei der Erregung mit einer harmonischen Schwingung, zeigt die Antwort der Raumtemperatur den nichtlinearen Einfluss des Systems. Aus der Sprungantwort kann die Zeitkonstante mit $T_1 \approx 26\text{ h}$ bestimmt werden.

des gekoppelten Systems von Heizung und Gebäude ist die Rücklauftemperatur und die

empfundene Raumtemperatur im oberen Diagramm der Abbildung 3.22 eingetragen. Zusätzlich ist die Wärmeabgabe der Heizkörper nach Gleichung 3.13 abgebildet. Erkennbar ist eine schwingende Antwort der Raumtemperatur, die mit einer zeitlichen Verzögerung der Heizleistung folgt. Die Antwort ist jedoch keine Sinusschwingung. Das Übertragungsverhalten ist nichtlinear. Aufgrund der dem Heizkörper vorgeschalteten Systemtechnik, die mit Verlusten behaftet ist, ist bei kleinem Volumenstrom die Vorlauftemperatur $< 55\text{ }^\circ\text{C}$. Bei kleinem Volumensstrom ist auch die Temperaturdifferenz zwischen Vorlauf und Rücklauf deutlich größer. Die resultierende Wärmeabgabe der Heizkörper ist nicht harmonisch..

Um eine Aussage zur Zeitkonstanten machen zu können wird im unteren Diagramm das Sprungantwortverhalten gezeigt. Es ergibt sich aus dem Tangentenverfahren eine Zeitkonstante, die im Bereich von einem Tag ($T_1 \approx 26\text{ h}$) liegt.

Aus dieser Untersuchung lässt sich auch der Wärmeverlustkoeffizient der Zone bestimmen. Für den stationären Fall gilt:

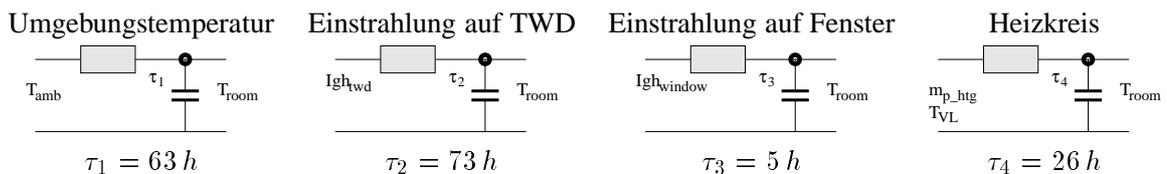
$$\dot{Q}_{Heizung} = 2,9\text{ kW}, T_{zone} = 29\text{ }^\circ\text{C} \text{ und } T_{umg} = 0\text{ }^\circ\text{C}.$$

Daraus folgt für den Wärmeverlustkoeffizienten $k A_{ges\,eff}$

$$k A_{ges\,eff} = \frac{\dot{Q}_{Heizung}}{T_{zone} - T_{umg}} = 100\text{ W/K}.$$

Ergebnis

Die Ausführungen zeigen, dass die Systemreaktion (empfundene Raumtemperatur) bezogen auf jede einzelne Wirkungsgröße (Außentemperatur, Einstrahlung, Heizung) näherungsweise durch ein Verzögerungsglied erster Ordnung (VZ_1) dargestellt werden kann. Die Zeitkonstanten unterscheiden sich für die Teilsysteme jedoch deutlich:



Ein modellbasierter Raumklimaregler, der mit Hilfe eines reduzierten Modells eine Zustandsvorhersage des Systems zur prädiktiven Regelung betreibt, muss die jeweiligen Zeitkonstante auf die unterschiedlichen Einflussgrößen kennen. Eine Reduktion auf ein gemeinsames VZ_1 -Glied kann das System aufgrund der unterschiedlichen τ 's nur unzureichend wiedergeben.

Die Untersuchung zeigt, dass das Gebäude eine Reaktion gegenüber der Solarstrahlung besitzt, die sich positiv auf den Heizbedarf auswirken kann. Die ermittelte Zeitkonstante zur Umgebungstemperatur liegt über zwei Tagen, die Zeitkonstante zum Heizkreis über einem Tag. Dieses Verhalten kann es einer prädiktiven Regelung erlauben, sofern passive Gewinne durch die Fenster zu erwarten sind, ohne Komfortverlust frühzeitig die Wärmeabgabe über den Heizkreis abzusenken. Es kommt dann zwar zu einer spontanen Abkühlung, die in der Folge aber durch die Solargewinne abgefangen wird. In diesem Fall ist ein Toleranzband

zu definieren, in welchem sich die Abkühlung des Raumes bewegen darf. (vgl. Kap. 5.2; [3, 55])

Die schnellste Reaktion zeigt die Raumtemperatur auf die solaren Gewinne durch die transparenten Flächen (vornehmlich Fenster). Hier ist bei nicht rechtzeitiger Verschattung, mit Überhitzung zu rechnen. Die vorausschauende Regelung hat hier die Möglichkeit rechtzeitig den solaren Eintrag, der zu Überhitzung führen würde, zu vermeiden.

Im Weiteren muss noch das Modell zur Wärmespeicherung bei nichtlinearem Temperaturverlauf (vgl. Abb. 3.11) des PCM-Materials in die modellbasierte Regelung integriert werden. Wie die Ergebnisse aus Kapitel 3.2.2 gezeigt haben, wirkt sich der Einsatz von PCM im Wandverbund merklich auf den Raumtemperaturverlauf aus. Damit die prädiktive Regelung diese Eigenschaft berücksichtigt, wird hierzu im folgenden Kapitel ein Prädiktor vorgestellt, der das entwickelte PCM-Modell beinhaltet.

Kapitel 4

Prädiktive Wärmeflussregelung solarer Gebäude

4.1 Regleranforderungen und Streckenverhalten

4.1.1 Anforderungen an den Regelkreis

Die folgenden Darstellungen orientieren sich an [22, 40, 58].

Wird bei Prozessen die zu regelnde Größe ($y(t)$) auf die Führungsgröße ($w(t)$) zurückgeführt und die Regelabweichung ($e(t) = w(t) - y(t)$) dem Regler zur Bestimmung der Stellgröße ($u(t)$) bekannt gemacht, spricht man von einem geschlossenen Regelkreis wie er standardisiert in Abbildung 4.1 dargestellt ist.

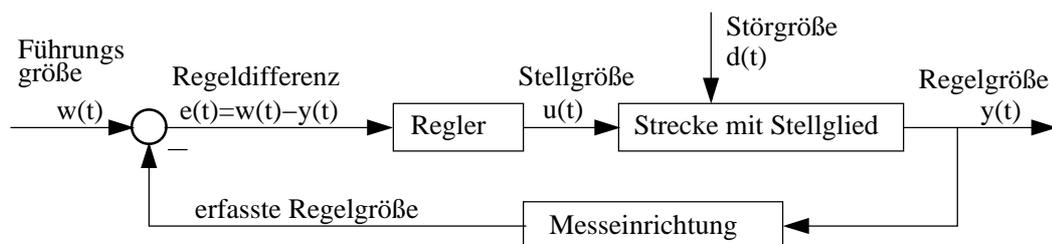


Abbildung 4.1: Standardisierter, geschlossener Regelkreis mit Stelleinrichtung und dynamischer Strecke in Blockschemadarstellung.

Eine Regelung dient dem Zweck, dem zu regelnden System ein gewünschtes Verhalten aufzuprägen und dabei die Auswirkungen von Störungen auf die zu regelnde Größe möglichst gering zu halten. Im Gegensatz zur Steuerung kann es bei der Regelung durch die Rückführung der Regelgröße $y(t)$ zu einer kritischen Kreisverstärkung kommen, die zu Stabilitätsproblemen der Strecke führt.

Vorteil der Regelung gegenüber der Steuerung ist die Störgrößenbehandlung. Die Störgröße $d(t)$ beeinflusst $y(t)$ und damit auch die Regeldifferenz $e(t)$, die als Eingangsgröße des

Reglers zur Kompensation der Störung führt. Ein robuster Regler kann unvorhergesehene Störungen ausregeln. Im Gegensatz dazu muss bei dem Steuerungsentwurf eine umfangreiche Behandlung möglicher Störungen vorgenommen werden. Aufgrund der vielfältigen Einflüsse (Störgrößenvektor \vec{d}), die auf ein Gebäude wirken, empfiehlt sich die Regelung zur Einstellung der mehrfachen Ausgangsgröße \vec{y} .

Zur Bewertung einer Regelung werden im Allgemeinen folgende Forderungen aufgestellt:

- **Stabilitätsforderung**
Der geschlossene Regelkreis muss stabil sein. Ist der Regelkreis stabil, so reagiert er auf endliche Erregungen durch Führungs- oder Störsignale mit einem endlichen Ausgangssignal.
- **Forderung nach gutem Führungsverhalten**
Der geschlossene Regelkreis ist stationär genau. Ist der Regelkreis stationär genau, so hat der Regelkreis für die Zeit $t \rightarrow \infty$ keine bleibende Regelabweichung. Der Regelkreis folgt der Führungsgröße trotz Störung (Störkompensation).
- **Dynamikforderung**
Der Regelkreis soll nach einer Führungsgrößenänderung und nach einer Ausregelzeit t_e eine Regelabweichung kleiner einer vorgegebenen Schranke ($\pm\varepsilon$) aufweisen.
- **Robustheitsforderung**
Trotz nicht vollständig bekanntem Streckenverhalten sowie bei Parametervariationen der Strecke, soll der entworfene Regler im geschlossenen Regelkreis die bereits genannten Forderungen erfüllen.

All diese Forderungen ermöglichen noch keinen Vergleich zwischen verschiedenen Reglerrealisierungen einer gegebenen Aufgabenstellung. Durch die Einführung eines Gütekriteriums lässt sich das dynamische Systemverhalten bewerten. Bei thermischen Systemen liegt es nahe, ein energie- oder verbrauchsoptimales Gütemaß einzuführen. Eine Optimierung des Reglers wäre dann gleichbedeutend mit der Minimierung des Gütemaßes. Dies steht aber im Widerspruch zu den Nutzer- und Komfortansprüchen. In Kapitel 4.1.2 wird das Spannungsfeld Energieoptimierung/Komfort erläutert und ein Gütekriterium definiert.

Erweitertes Streckenverhalten

Wichtig für den Entwurf eines prädiktiven Raumklimareglers für Gebäude mit hoher Sensitivität bezüglich der Solarstrahlung und komplexen thermischen Speicherelementen durch z. B. TWD oder PCM, ist die Kenntnis über das Streckenverhalten, den Einfluss von Klimagrößen und dem Nutzerverhalten.

Mit den Ergebnissen aus Kapitel 3.4.2 wurde gezeigt, dass die empfundene Raumtemperatur bezüglich der meteorologischen Störgrößen vereinfacht mit Übertragungsgliedern, die ein Verzögerungsverhalten 1. Ordnung aufweisen, abgebildet werden können. Des Weiteren zeigt sich ein verändertes Streckenverhalten beim Einsatz von PCM im Putz. Diese Nichtlinearität wirkt sich merklich auf die Raumtemperatur aus, so dass eine Berücksichtigung dessen in der Raumklimaregelung von Bedeutung ist.

4.1.2 Das Gütekriterium

Der Nutzer eines solaroptimierten Gebäudes mit einer aktiven Solaranlage wird vor allem an der Behaglichkeit in den Räumen, der Ökonomie und an einer maximalen solaren Nutzung interessiert sein. Der Regler sollte ohne Einflussnahme durch den Nutzer zu dem gewünschten Betriebsverhalten führen.

Zunächst ist das Komfortempfinden des Menschen zu erfüllen. Daraus resultiert die Raumklimaregelung, die neben der Raumtemperatur auch die Feuchte und Strahlungs- und Lichtsituation beinhalten kann.

Sekundär, da meist erst mit Jahresabrechnung damit konfrontiert, ist die Wirtschaftlichkeit der Anlage. Daraus ergibt sich das Ziel einer energieoptimalen Regelung.

4.1.2.1 Raumklima-/Komfort-Kriterium

Unter einer umfassenden Raumklimaregelung versteht man die Einstellung aller Zustandsgrößen, die in Tabelle 2.3 (mittlere Spalte) angegeben sind. Diese umfassende Raumklimaregelung ist nur mit hohem technischen Aufwand möglich. Damit ist allerdings noch nicht gewährleistet, dass dem Nutzeranspruch immer entsprochen werden kann. Für den Wohnungsbau üblich ist die Sicherstellung der geforderten Raumtemperatur, die sich je nach Behaglichkeitsempfinden in einem variablen Temperaturband (Toleranzband) bewegt.

Bei dieser Vereinfachung muss jedoch sichergestellt sein, dass der erforderliche Grundluftwechsel gewährleistet ist. Das untersuchte Modell aus Kapitel 3.4.1 hat einen Mindestluftwechsel von 0.5. Damit wird die geforderte Luftqualität für Wohnungen erfüllt. Die Gefahr von Zugerscheinungen ist bei modernen Gebäuden aufgrund der Gebäudedichtheit und der Temperaturhomogenität durch hochwertige Dämmung und Fenster nicht relevant.

Da diese Arbeit die Abbildung und Untersuchung des thermischen Verhaltens komplexer Gebäudesysteme behandelt, wird der Aspekt der Tageslichtregelung nur durch einen vereinfachten Ansatz eingegangen. Das Verschattungssystem der Fenster (hier schaltbare Schichten im Fenster) wird nur bei drohender Überhitzung verdunkelt. Je nach Nutzervorgabe kann es zu Überhitzungen kommen, wenn der visuelle Komfort beibehalten werden soll. Das Gebäude verfügt über einen Lüfter der den Luftwechsel erhöhen kann. Diese Maßnahme ist auch in Bezug auf das Phasenwechselmaterial im Innenputz von Bedeutung. Über eine Nachtlüftung, kann die thermische Kapazität des Putzes "entladen" werden und somit für den nächsten Tag als Energiespeicher wieder bereit stehen.

Ist ein Behaglichkeitsfeld definiert, so kann über die zu regelnde Ausgangsgröße $y(t)$ und deren Abweichung vom Behaglichkeitsfeld (Regelabweichung) die Güte der Regelung quantifiziert werden. Diese Bewertung erfolgt durch das Güteintegral:

$$J = \int_{t_0}^{t_e} e^2(t) dt \quad (4.1)$$

Mit dieser Gleichung werden große Abweichungen stärker und negative und positive Abweichungen gleich bewertet. Der Wert von J wird als quadratische Regelfläche bezeichnet

und hängt bei vorgegebener Regelstrecke von den gewählten Regelparametern ab.

Aus Jahressimulationen ist die kumulierte Zeit bestimmbar, in der das Raumklima außerhalb des geforderten Behaglichkeitsfeldes liegt. Ein Histogramm dient der grafischen Darstellung.

4.1.2.2 Energieoptimales Kriterium

Da mit der Regelung primär die Behaglichkeit erfüllt werden soll, bedeutet dies für das energieoptimale Regeln, dass die zu verteilende Wärme möglichst verlustfrei und zeitlich abgestimmt transportiert werden muss. Die Wärme kommt aus unterschiedlichen Quellen und setzt sich aus fossil erzeugter Wärme und aus passiven und aktiven Solargewinnen zusammen. Dies legt ein übergeordnetes Wärmemanagement nahe, welches Zugriff auf alle benötigten Sensoren und Stellglieder hat.

Durch die Regelungsfunktion muss der solare Ertrag optimiert werden. Dies wird zum einen durch eine gute Schichtung des zentralen Pufferspeichers mit Hilfe einer speziellen, untergelagerten Heizungsregelung erreicht. Die verbesserte Temperaturspreizung im Speicher führt zu niedrigeren Vorlauftemperaturen im Kollektor- wie im Brennerkreis. Dies hebt den Nutzungsgrad der beteiligten Komponenten. Zum anderen kann durch die Regelung der Verschattung für TWD und Fenster der solare Ertrag optimiert werden.

Die Güte der Regelung lässt sich an den nicht solaren Jahresenergien bestimmen. Als Vergleich dient ein entsprechendes Gebäudesystem mit konventionellen und nicht vernetzten Regelungseinheiten, für das die Vergleichsrechnung durchgeführt wird.

4.2 Übergeordnetes Wärmemanagement

Marktüblich sind heutzutage Regelungssysteme, die jedes Teilsystem (Heizkreis, Verschattung, Lüftung) unabhängig kontrollieren. Die Folge ist ein hoher sensorischer Aufwand und ein nicht abgestimmtes Regelverhalten. Die Bedienung ist oftmals unübersichtlich, der Anwender ist oft überfordert. Ohne Kenntnisse über die physikalischen Vorgänge und die komplexen Zusammenhänge, kann der Nutzer kaum erfolgreich sein gewünschtes Kosten-Komfort-Optimal erreichen.

Mit der Realisierung eines übergeordneten Regelungskonzeptes für alle Systeme, welches über die Wissensbasis von Experten der Systeme verfügt, kann das optimierte Zusammenspiel aller Systeme gewährleistet werden. Mit der Schaffung eines Regelungskriteriums bezüglich Komfort und Wirtschaftlichkeit, wird dem Benutzer eine einfache Möglichkeit des individuellen Eingriffs bezüglich Kosten und Komfort gegeben.

4.2.1 Regelungskonzept

Wie aus den Gütekriterien ersichtlich wird, liegt der Freiheitsgrad der Regelung in dem variablen Behaglichkeitsfeld, das von den Bedürfnissen des Nutzers abhängt. Schwierig ist

es, scharfe Regelgrößen für den Zeitpunkt der Heizaktivierung und für die Toleranzgrenze bei Überhitzung festzulegen, die nutzerspezifisch sind. Zur Lösung des multikriteriellen Systems bietet sich die Fuzzy-Technologie an. Gerade im Bereich der “Unschärfe“ des menschlichen Empfindens erscheint der Einsatz von Fuzzy Control zur Raumklimaregelung sinnvoll. Unter anderem wird in den Arbeiten [3, 30, 55] ein Verfahren vorgestellt, womit der Nutzer in einfacher Weise die Regelung entsprechend seines Anspruches bezüglich Komfort und Ökonomie gewichten kann. Diese Methode findet für die Realisierung des Reglerentwurfs Verwendung.

Basierend auf der Fuzzy-Logik kann der Nutzer zwischen den Optionen “Ökonomie” und “Komfort” wählen und so seinem individuellen Befinden nach, die Regelung beeinflussen. Die Fuzzy-Logik berechnet die scharfe Sollwertvorgabe, für den unterlagerten Heizkreis und die Grenzwerte, die in der Steuereinheit mit dem Vorhersagewert der Raumtemperatur verglichen werden. Daraus folgen dann die Stellsignale für Verschattungen (TWD, Fenster), Heizung und Lüftung.

Im Weiteren wird ein Prädiktor für die Raumtemperatur vorgeschlagen, der die verzögerte Wärmeabgabe von TWD-Konstruktionen, den Einfluss der solaren Gewinne durch Fenster sowie die nichtlineare Speichereigenschaft der PCM-Wand berücksichtigt. Aufgrund der Wettervorhersage¹ wird die zu erwartende Raumtemperatur, die ohne aktives Heizen und Lüften auftreten würde, vorhergesagt. Diese Vorhersage wird der Steuereinheit mit Fuzzy-Logik aufgeprägt und zu einer Stellgröße verarbeitet.

Zum energieeffizienten Betrieb wird zusätzlich eine unterlagerte Heizkreisregelung für solaroptimierte Gebäude verwendet und statt der konventionellen witterungsgeführten Vorlauf-temperaturregelung die in [32, 33] beschriebene Rücklauf-temperaturbegrenzung zum Einsatz gebracht. Dem Heizkreis wird bei dieser Regelung eine begrenzte² Energiemenge zur Verfügung gestellt, die den fossilen Energieeinsatz bei gleichbleibendem Komfort reduziert³. Dies führt zur Optimierung des aktiven solar-unterstützten Heizsystems und damit zu einer Erhöhung des solaren Ertrages.

Bei modernen Niedrigenergiegebäuden können neben dem bekannten, dynamischen Verhalten zusätzliche Charakteristika⁴ den Verlauf der Raumtemperatur beeinflussen. Besonders mit dem Einsatz von Phasenwechselmaterialien wird das dynamische Verhalten stark nicht-linear. Die Approximation des Gebäudes mit einem linearen Modell ist nicht mehr realistisch. Mit dem Einsatz des modellbasierten Reglers, ist der Zustand des Gebäudes bekannt. Die Raumtemperaturprognose nutzt die integrierte Fuzzy-Logik zur Bestimmung der Stellgrößen zur Wärmeversorgung des Gebäudes hinsichtlich des Gütekriteriums Kosten/Nutzen. Die Folge der Verknüpfung von Prädiktor und Fuzzy Logik ist ein intelligentes Wärmemanagementsystem. Mit der Integration der untergeordneten Heizkreisregelung in die zentrale Regeleinheit wird die optimale Abstimmung mit dem aktiven thermischen Anlagensystem

¹So kann z. B. über das Internet eine tägliche Vorhersage der zu erwartenden stündlichen globalen Einstrahlung sowie der mittleren stündlichen Außentemperatur erfolgen.

²in Abhängigkeit der Witterung

³Ein ausführlichere Beschreibung des Heizkreisregelungskonzeptes mit Erfahrungen aus Feldversuchen findet sich unter anderem in Kapitel 5.2.1 und im Anhang C sowie in [31, 33].

⁴Im Vorfeld beschriebene passive Fassadenkonstruktionen wie TWD und Latentspeicher im Wandverbund.

gewährleistet.

Das Zusammenführen der Teilkonzepte von Prädiktion und Fuzzy-Logik führt zu dem übergeordneten, prädiktiven Wärmemanagementsystem. Die Abbildung 4.2 zeigt das zentrale Regelkonzept in einem Blockschaltbild zusammengefasst.

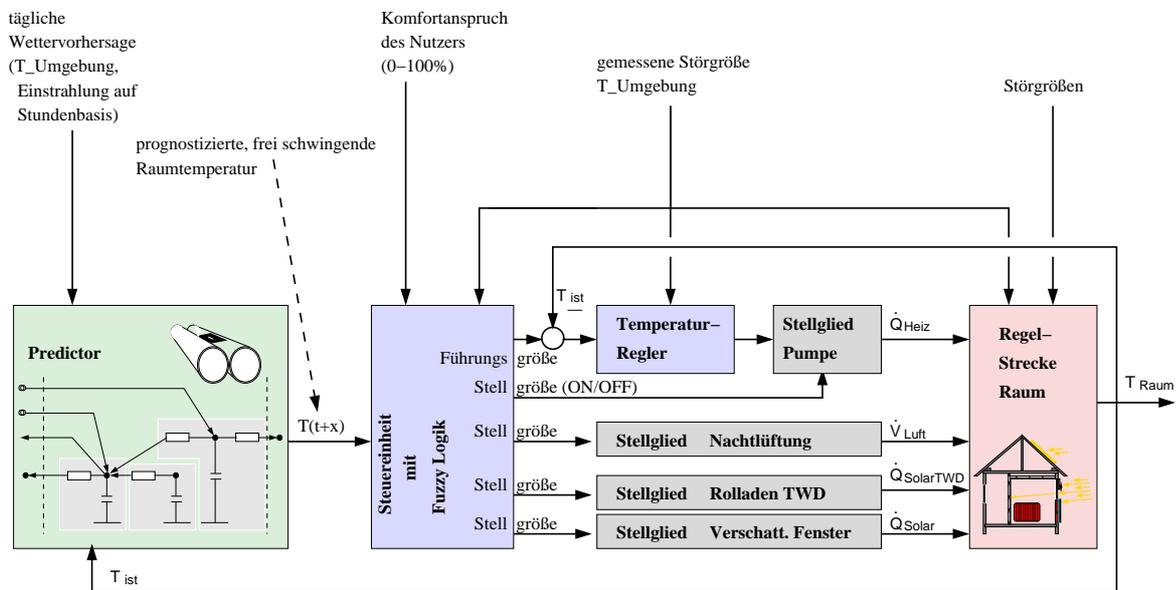


Abbildung 4.2: Aufbau der gesamten Releinheit mit Prädiktor, Steuereinheit mit Fuzzy-Logik und Heizungsregelung, integriert in den geschlossenen Regelkreis.

Es folgt die Beschreibung der aktiven und passiven Stellglieder, die im Wohngebäude zum Einsatz kommen. Es wird der Prädiktor, der durch das Verfahren der Modellreduktion entworfen wurde, diskutiert und evaluiert. Die Fuzzy-Logik zur Wärmeflussregelung wird bezüglich der Fuzzy-Mengen und der Stellgrößenvorgabe für die unterlagerten Regelungen anschließend beschrieben.

4.2.2 Passive und aktive Stellglieder

Bei der Betrachtung des in Kapitel 3.4.1 aufgebauten solarsensiblen Wohngebäudes kommen folgende Stellglieder zum Einsatz, anhand dessen der Wärmetransport geregelt werden kann.

Aktive Stellglieder

Diese Stellglieder beeinflussen den fluid-behafteten Wärmetransport.

- Für die thermisch-aktive Seite ist dies der **Heizkreis**. Konventionelle Heizungsregelungen bedienen sich der witterungsgeführten Vorlauftemperaturregelung. Bei dieser Regelung wird die Heizleistung⁵ mit der Vorlauftemperatur eingestellt. Dabei wird

⁵Abhängig von der Außentemperatur.

die Heizungspumpe ohne Drehzahlanpassung auf der gleichen Stufe betrieben.

In den Untersuchungen [31, 33] stellte sich die witterungsgeführte Rücklauftemperaturregelung als besonders geeignet für solaroptimierte Gebäude heraus. Bei dieser Regelung wird die Rücklauftemperatur geregelt, während die Vorlauftemperatur konstant auf maximalem Niveau⁶ verbleibt. Da hierbei der sonst übliche Mischer im Heizkreis⁷ entfallen kann, muss die Heizkreispumpe stellbar sein.

Der innerhalb des Simulationsmodells realisierte Heizungsregler ist ein Proportional-Integral-Regler (PI), der die geforderte Solltemperatur im Raum durch Drehzahlregulierung der Pumpe erreicht. Die Folge ist eine begrenzte Rücklauftemperatur, die deutlich unter der Vergleichbaren mit der konventionellen Regelung ist. Die herabgesetzte Rücklauftemperatur wirkt sich positiv auf die nachgeschalteten Komponenten⁸ aus. Auch wird die Pumpenlaufzeit deutlich reduziert, womit eine weitere Energieeinsparung erreicht wird.

- Zusätzlich zur freien Lüftung bietet ein Lüfter die Möglichkeit der **Nachtlüftung**. Es gilt, hohe, sommerliche Temperaturen im Raum durch eine erhöhte Luftwechselrate in der Nacht zu senken und den Raum so zu konditionieren, dass vor allem das PCM-Material im Raum entladen wird. Erreicht wird dies im einfachen Fall durch einen Zweipunktregler mit Hysterese und den zusätzlichen Freigabebedingungen zur Umgebungstemperatur ($T_{\text{ausßen}} < T_{\text{Wohnraum}}$) und zur Tageszeit ($t \in t_{\text{Nacht}}$). Bei $T_{\text{Wohnraum}} > T_{\text{Schmelz(PCM)}} + x$ erfolgt die Freigabe der erzwungenen Lüftung mit einer Luftwechselrate, die typischerweise bis zu dem vierfachen Raumvolumen pro Stunde reicht. Ist der Raum wieder deutlich unter die Schmelztemperatur ($T_{\text{Wohnraum}} < T_{\text{Schmelz(PCM)}}$) gesunken, wird die Lüftung abgeschalten.

Passive Stellglieder

Mit diesen Stellgliedern erfolgt die Sonnen- und Wärmeschutzregulierung.

- Voraussetzung zur Vermeidung hoher Raumtemperaturen ist eine stellbare **Fenster-Verschattung**. Bei dem Verschattungssystem für die Fenster wird auf eine schaltbare Schicht innerhalb des Glasverbundes zurückgegriffen, die den Gesamtenergiedurchlassgrad (g-Wert) reduziert. Da bei der Verglasung von einer Wärmeschutzverglasung ausgegangen wird, kann mit dieser Modellierung bei maximalem Einfärben des Fensters eine Reduktion des g-Wertes um 60 % von 0,6 auf 0,24 erfolgen. Dies entspricht realen Messwerten. Da bei dieser Verschattungstechnik eine Teiltransparenz erhalten bleibt und nur bei deutlicher Überhitzung die Verschattung aktiviert wird, werden bei den folgenden Untersuchungen keine Zwischenstufen realisiert. Mit Hilfe eines Zweipunktreglers und der Definition eines Schwellwertes $T_{VsFenster}$ gilt für $T_{\text{Wohnraum}} > T_{VsFenster}$: $g_{Fenster} = 0.4 * g_{max}$

⁶Das ist wegen des Warmwassers und der solaren Kombianlage zwischen 60 und 65 °C.

⁷Sofern das Heizsystem Vorlauftemperaturen bis 90 °C zulässt, da diese Temperaturen mit dem Kollektor erreicht werden können.

⁸Pufferspeicher, Solarkollektor, Brenner

- Die **TWD-Verschattung** ist ein herkömmliches Lamellen-System, das nicht kontinuierlich verstellbar ist, sondern lediglich die Zustände “Offen” und “Geschlossen“ realisiert. Wieder definiert ein Zweipunktregler mit Hilfe eines Schwellwertes den Zustand der TWD-Verschattung. Um hier ein häufiges Bewegen der Lamellen zu vermeiden, wird typischerweise ein Schalttemperatur gewählt, die mit der Außentemperatur der letzten 24 Stunden⁹ verglichen wird. Mit diesem Trendverfahren wie es z. B auch in TRNSYSlite[66] oder zur saisonalen Wohnungslüftung eines Mehrfamilien-Passivhauses [27] zum Einsatz kommt, erfolgt der gewünschte Effekt einer saisonalen Berücksichtigung des Wärmebedarfs. Mit $T_{24\text{mittel}} > T_{VsTWD}$ erfolgt eine Reduktion des Gesamtenergiedurchlassgrades (g-Wert) der TWD-Konstruktion um 95 % von 0.8 auf 0.04.

4.2.3 Zustandsvorhersage

4.2.3.1 Model Predictive Control

Der Entwurf klassischer Regelungen bedient sich dynamischer Modelle (mathematisch DGL's) zur Lösung des regelungstechnischen Problems. Die Charakteristika der Regelstrecke gehen in entscheidender Weise in die Wahl der Regelparameter ein. Der Regler selbst beinhaltet jedoch nicht das Modell [40]. Wird das Modell Bestandteil des Reglers, wird dieses Verfahren als *Internal Model Control* (IMC) bezeichnet. Die allgemeine Struktur eines IMC-Regelkreises ist in Abbildung 4.3 dargestellt.

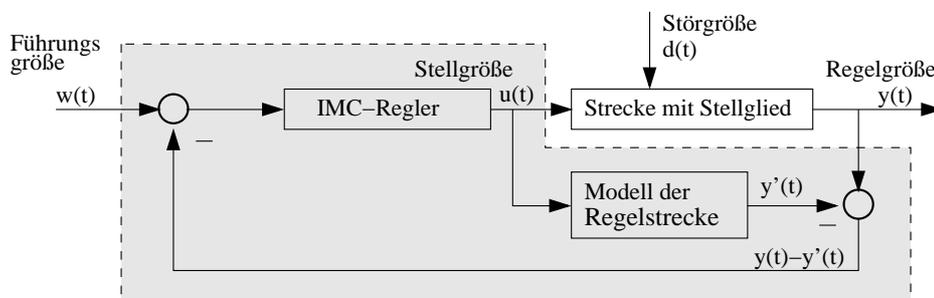


Abbildung 4.3: Struktur eines modellbasierten Reglers. *Internal Model Control* (IMC) - Regelkreises nach [40].

Die modellbasierte Regelung eignet sich besonders zur Vorhersage von Zustandsgrößen über einen Prädiktionshorizont. Dies erfordert jedoch die Kenntnis von Führungs- und Störgrößen, die das System in der Zukunft prägen werden. Man spricht dann von *Model Based Predictive Control* (MBPC) [69] oder auch von *Model Predictive Control* (MPC) [52]. Es gibt zahlreiche Ansätze zur prädiktiven Regelung, die sich auf eine Prognose von Stell- und Regelgrößen stützen [2]. Die Unterschiede der Algorithmen ergeben sich aus der Art und

⁹Dies erfolgt über den gleitenden Mittelwert (moving average) der Umgebungstemperatur aus den vergangenen 24 Stunden.

Weise, wie das physikalische Problem mathematisch formuliert wird [69]. Die Struktur von prädiktiven Regelungsalgorithmen sowie deren Regelverhalten wird in [52, 2] beschrieben.

Die Funktionsweise eines prädiktiven Reglers zur Wärmeversorgung von Wohngebäuden beruht auf der Vorhersage des Wetters, der Lasten und der Nutzungszeiten. Großes Potential liegt in der Prognose der Solarstrahlung, die bei solarsensitiven Gebäuden eine wichtige Rolle spielt. Aus der prognostizierten Wirkungsgröße lässt sich eine Optimierung des Heiz- und Verschattungssystems herleiten. Abbildung 4.4 zeigt den prinzipiellen Ablauf für den Heizfall gegenüber der konventionellen Führung auf.

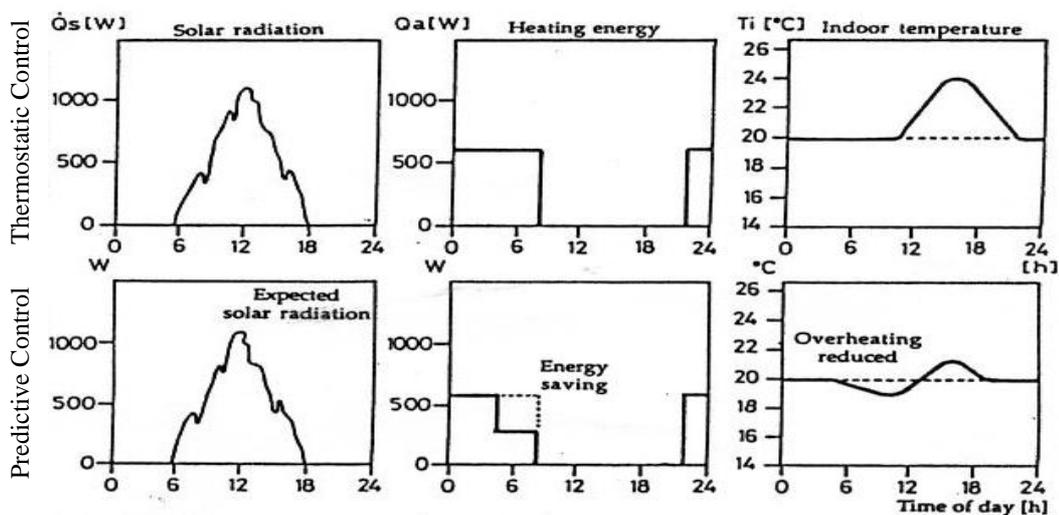


Abbildung 4.4: Funktionsweise eines prädiktiven Reglers zur Heizenergieeinsparung. (Quelle: Ferguson [21])

Aufgrund der zu erwartenden Solargewinne, wird der Energieeintrag durch die Heizung reduziert. Die Folge ist ein Absinken der Raumtemperatur. Durch die Strahlung steigt die Temperatur wieder in den geforderten Bereich. Erst am Abend muss wieder geheizt werden. Die herkömmliche Regelung lässt diese kurzzeitige Absenkung der Raumtemperatur nicht zu. Die Solarstrahlung überheizt den Raum in der Folge. Der Nutzer wird die überschüssige Wärme hinauslüften um seine gewünschte Raumtemperatur zu erhalten. Am Abend muss zur Deckung der Transmissionsverluste in beiden Fällen wieder geheizt werden. Die Energieeinsparung durch den Prädiktor liegt in der vorzeitig reduzierten Wärmeabgabe durch die Heizung.

Realitätsnahe Dynamik des Temperaturverlaufs und der Heizwärmeabgabe werden in Kapitel 5 mittels simulationstechnischer Untersuchungen behandelt. Die Ergebnisse des prädiktiven Reglers zur Vermeidung zu hoher Raumtemperaturen werden ebenfalls in Kapitel 5 diskutiert.

4.2.3.2 Zustandsvorhersage mittels Modellreduktion und Wettervorhersage

Ziel der Modellreduktion ist es, das komplexe Gebäudemodell durch ein Modell mit wesentlich niedrigerer Ordnung zu approximieren. Voraussetzung ist, dass das reduzierte Modell auf die dominanten Eingangsgrößen mit näherungsweise gleicher Zustandsänderung reagiert, wie das komplexe Modell. Für eine beliebige Streckeneingangsgröße $u(t)$ soll gelten:

$$y_{MR}(t) \approx y(t)$$

Das Näherungsmodell ist so zu wählen, dass es die dominanten Charakteristika enthält (in diesem Fall das PCM- und TWD-Verhalten). Eine weitere Voraussetzung an die Einsetzbarkeit eines reduzierten Modells liegt im einfachen Funktionsaufbau, so dass es in realen Reglersystemen (μC) nutzbar ist. Eine besondere Anforderung liegt auch in der Robustheit des modellbasierten Reglers gegenüber Systemveränderungen und Störungen. In der hier vorgeschlagenen Ordnungsreduktion wird das komplexe Modell, durch ein drei Knotenmodell ersetzt. Die Abbildung 4.5 zeigt das thermische Ersatzschaltbild des reduzierten Modells.

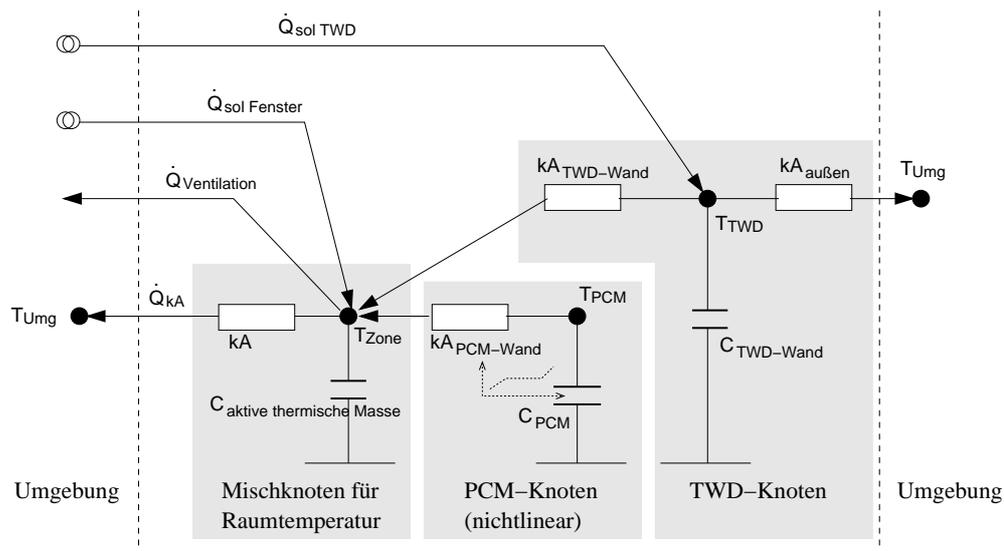


Abbildung 4.5: Reduziertes Gebäudemodell mit der Abbildung der thermischen Masse und der Charakteristika von TWD und PCM. Dieses Modell wurde in den Regelungsalgorithmus integriert und erlaubt mit Hilfe der Klimavorhersage die prädiktive Regelung des Systems.

Der **zentrale Knoten** (Zustandsgröße und Regelgröße) wird durch ein RC-Glied modelliert, welcher die empfundene Raumtemperatur wiedergibt. Er repräsentiert die Approximation der Differentialgleichung höherer Ordnung durch eine einfache Differentialgleichung (VZ_1 -Glied)¹⁰. Damit bildet er den “Mischknoten”, der alle aktiven thermischen Massen des Gebäudes repräsentiert. Im Gegensatz zum komplexen Modell findet keine Differenzierung nach Luft und Strahlungsknoten statt. Aufbau und Orientierung der Wände werden

¹⁰Die Fehler die sich aus der Modellreduktion ergeben, wurden in Kapitel 3.4.2 behandelt.

nicht benötigt. Die Bestimmung dieser effektiven, thermischen Masse wurde durch Parameteridentifikation mit Hilfe des komplexen Modells ermittelt. Als effektiver Wärmedurchgangskoeffizient kann der in Kapitel 3.4.2 bestimmte Wert übernommen werden, weil die Transmissionsverluste gleich bleiben, d. h. das stationäre Verhalten identisch ist. Der Mischknoten ist auch der Sammelpunkt aller Gewinne und Verluste die auf die Zone einwirken:

- Wärmeverluste durch freie Lüftung
- Wärmeverluste durch Umschließungsflächen des Gebäudes
- solare Wärmegewinne durch südorientierte Fenster
- solare Gewinne, die über die Transparente Wärmedämmung in das Gebäude gelangen
- nichtlineares Speicherverhalten des PCM-Materials

Das zweite RC-Glied bildet der **PCM-Knoten**, der genau die Eigenschaften aufweist, die im Kapitel der PCM-Modellierung (Kap.3.2.2) erläutert wurden. Dazu wurde die PCM-Funktion des diskretisierten Wandmodells, als PCM-Knoten des reduzierten Modells verwendet. Als Parametersatz zur Beschreibung des Knotens werden die realen Materialkennwerte übernommen (Schmelztemperatur, Schmelzenthalpie des Putzes, Wärmekapazität des aufgetragenen PCM-Putzes, sowie den Wärmedurchgangskoeffizienten).

Das dritte RC-Glied stellt der **TWD-Knoten** dar. Auch hier werden die TWD beschreibenden Gleichungen des in Kapitel 3.2.1 beschriebenen TWD-Modells aus dem diskretisierten Wandmodell auf den TWD-Knoten des reduzierten Modells übertragen. Dies bedeutet, dass Sonnenenergie direkt auf den TWD-Knoten eingekoppelt werden kann. Es ist notwendig mit zwei Wärmeübergängen zu arbeiten, um zum einen die Wärmeabgabe an den Raum und zum anderen den Wärmeverlust nach außen abzubilden. Durch die Reduzierung des komplexen Wandmodells auf eine Differentialgleichung 1. Ordnung, wird das Verzögerungsverhalten hoher Ordnung der realen TWD-Wand zu einem $VZ_1 - Glied$ reduziert. Die einzige thermische Masse beinhaltet die effektiv wirksame thermische Masse der realen TWD-Wand. Als Temperatur resultiert ein Mischzustand bei gleicher Speicherfähigkeit. Als Parametersatz zur Beschreibung des Knotens werden reale Materialwerte verwendet (Wärmekapazität der TWD-Wand und die Wärmeleitfähigkeiten).

Funktionsablauf

Auf stündlicher Basis ermittelt der Prädiktor eine prognostizierte empfundene Raumtemperatur. Hierzu bedient er sich der Wettervorhersage, die als webverfügbar vorausgesetzt wird und der gemessenen, aktuellen Raumtemperatur (vgl. Abb. 4.6).

Bei jedem Durchlauf wird der Modellzustand des zentralen Mischknotens an die aktuelle Raumtemperatur angepasst, indem die gemessene Temperatur aufgeprägt wird. TWD-Knoten und PCM-Knoten behalten ihre Temperatur- bzw. Enthalpiewerte vom vorherigen Prädiktionsschritt. Daraufhin werden entsprechend des gewählten Vorhersagehorizontes (Anzahl von Stunden) die relevanten Störgrößen ($I_{gh}(t)$, $I_{dh}(t)$, $T_{Umg}(t)$) aus der Wettervorhersage dem reduzierten Modell aufgeprägt. Die folgende interne Simulation des Gebäudeverhaltens erfolgt mit einer Zeitschrittweite von zehn Minuten. Sie liefert den neuen Prädiktionenswert für die Raumtemperatur.

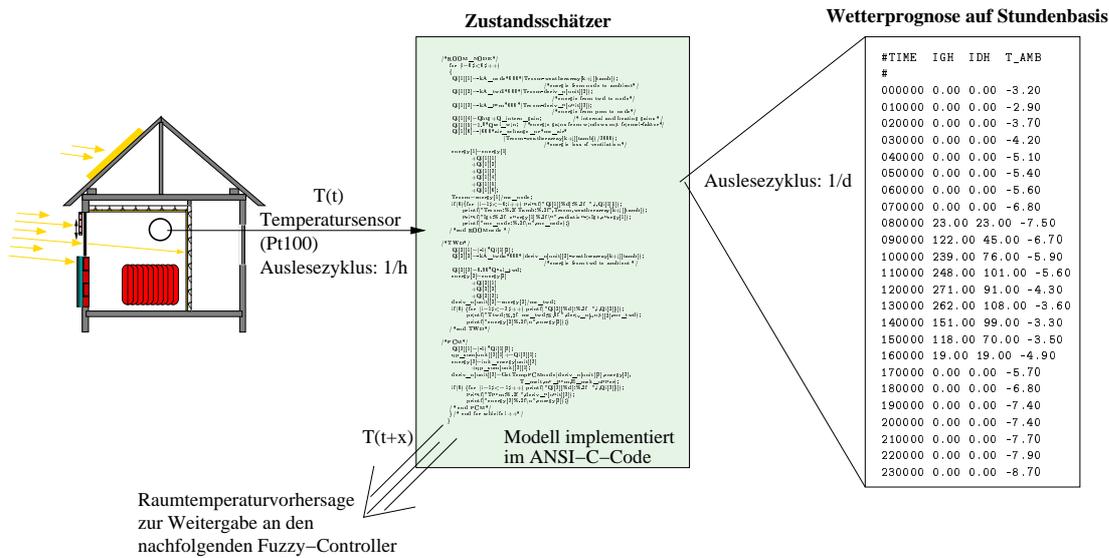


Abbildung 4.6: Damit der Prädiktor eine Vorhersage treffen kann, benötigt er die Wettervorhersage auf Basis stündlicher Mittelwerte sowie die aktuell gemessene Raumtemperatur. Daraus folgt eine Raumtemperaturprognose für einen festgelegten Prädiktionshorizont. Störungen, die durch Lüftung, Verschattung oder Heizung stattfinden könnten werden nicht berücksichtigt. Das Gebäude wird für die Prognose im “free float“-Zustand betrachtet.

Bei dieser Art der Vorhersage gehen keine Einflüsse durch aktive Lüftung, Verschattung und Heizung mit ein. Das Gebäude wird im frei schwingenden Betrieb berechnet. Die Vorhersage sagt dann aus, wie nur die Klimabedingungen das Raumklima verändern. Dies hat den Vorteil, dass man leicht abschätzen kann, ob zusätzlich ein Einwirken in der Wärmeversorgung oder in der Verschattung stattfinden muss.

Der Prädiktor zeichnet sich durch seine geringe Anzahl an Sensoren aus. Er benötigt als Messwert nur die aktuelle Raumtemperatur, sowie die zu erwartenden Klimabedingungen. Alle anderen Zustandswerte bestimmt der Prädiktor selbst. Der Prädiktor benötigt insbesondere keinen Strahlungssensor, da ihm der Energieeintrag durch den aktuellen Status des Gebäudes bekannt wird. Es findet regelmäßig ein Abgleich des Prädiktors statt.

Stellt zum Beispiel der Prädiktor fest, dass sich aufgrund der Einstrahlung die Raumtemperatur in den nächsten zwei Stunden von 20 auf 24 °C erhöhen wird, folgert die nachgelagerte Regelung, dass die Heizung abgestellt werden kann (die Gefahr des Herauslüftens der Wärme wird reduziert). Nun kann es noch zu einer leichten Abkühlung kommen. Nach kurzer Zeit wird aber der solare Gewinn den notwendigen Wärmeeintrag beitragen.

Findet aufgrund einer fehlerhaften Wettervorhersage kein solarer Eintrag statt, so wird die unterlagerte Heizungsregelung nach Unterschreiten einer Temperaturschwelle¹¹ den Heizungsbetrieb wieder aufnehmen. Dank der hohen Trägheit der Gebäudemasse gegenüber der Umgebungstemperatur und des schnelleren Antwortverhaltens der Heizung, wird es zu

¹¹Diese Schwelle hängt vom Komfortanspruch des Nutzers ab.

einer kaum merklichen, weiteren Abkühlung¹² kommen. Der Zustandsvorhersage ist für seine nächste Prognose aber nicht getäuscht, da er durch die aktuelle Raumtemperaturmessung wieder auf einem niedrigen Niveau beginnt.

Prädiktionshorizont

Aus dem dynamischen Antwortverhalten des komplexen Modells in Kapitel 3.4.2 folgt, dass die kürzeste Reaktionszeit des Raumtemperaturverlaufs durch die solaren Gewinne der Fenster zu erwarten sind. Die Zeitverschiebung der Antwort des Gebäudes auf eine periodische Einstrahlung liegt bei ca. 5 Stunden. In einem kürzerem Bereich muss also der Prädiktionshorizont liegen. Es ergab sich ein Optimum bei einem vorgegebenen Horizont von 2 h.

Integrierte Wetterprognose

Mit der zunehmenden Vernetzung moderner Regler, ist es naheliegend die Systeme in das Internet zu integrieren. So kann über den Wetterdienst eine lokale Wettervorhersage in die Regelung integriert werden. Nutzt man eine Vorhersage über die folgenden 24 Stunden, die z. B. einmal nachts abgerufen wird, so wird eine Genauigkeit erreicht, die weit über den bisher gebräuchlichen Vorhersagemodellen¹³ liegt, da man sich der umfangreichen Sensortechnik (Wetterstationen, Satelliten) und der komplexen Vorhersagemodelle des Wetterdienstes¹⁴ bedient.

Da die Simulation mit den Klimadaten aus den Referenzjahren der TASK 26 [64, 63] durchgeführt wurde und hierzu keine Vorhersagedaten existieren, wurde für die Untersuchungen folgendes Vorhersagemodell definiert:

- Einmal pro 24 h (um 0.00 Uhr) wird die Vorhersage für den folgenden Tag eingelesen¹⁵ und dem Prädiktor zur Verfügung gestellt.
- Die Vorhersage beruht auf einer Stundenbasis. Zu jeder vollen Stunde ist der gemittelte Wert für die nächste Stunde angegeben.

¹²Diese Abkühlung bewegt sich innerhalb eines Toleranzbandes, welches nutzerspezifisch ist.

¹³Die einfachste Vorhersageform ist die Persistenzvorhersage. Sie beruht auf der Annahme, dass die zeitliche Entwicklung von Größen im Vorhersagezeitraum derjenigen in der Gegenwart entsprechen werden [55]. Für eine Persistenz-Wetterprognose heißt das beispielsweise, dass das Wetter morgen so ist wie heute.

Weitaus komplexere Vorhersagemodelle basieren auf der Zeitreihenanalyse. Bei der Beobachtung stochastischer Prozesse nutzt man Modellansätze, um aus Messgrößen der Vergangenheit und Gegenwart zukünftige Entwicklungen abschätzen zu können. Eine Diskussion über die unterschiedlichen Modellansätze (z. B. ARMA-Modell, ARIMA-Modell) findet sich in [17].

¹⁴Der Deutsche Wetterdienst (DWD) betreibt sogenannte Kurzfristvorhersagen, die je nach Toleranzbereich eine "Trefferquote" von 84 % haben. Zur Regionalen Wettervorhersage über einen Zeitraum von 2 bis 18 Stunden plant der DWD eine Reduktion der Maschenweite des Modells auf ca. 3 km. [15]

¹⁵Das Einlesen der Vorhersagen über Internet kann auch öfters erfolgen (z. B. viermal für die nächsten 6 Stunden), damit lässt sich eine höhere Vorhersagegenauigkeit erreichen.

- Horizontale Global- und Diffusstrahlung sowie die Außentemperatur sind Bestandteil der Vorhersage.
- Die Vorhersage wird als “ideal” vorausgesetzt.

Simulationen mit dieser Wettervorhersage liefern Aussagen über das Potential prädiktiver Regelungen. Dank der geringen Empfindlichkeit moderner Gebäude bezüglich der Umgebungstemperatur zeigen Ungenauigkeiten der Prognose des Wetterdienstes nur einen geringen Einfluss auf den Jahresendenergiebedarf.

4.2.3.3 Parameteranpassung

Die Parameteranpassung des reduzierten Modells erfolgt über einen dynamischen Identifikationsprozess. Dazu werden zuerst alle Kennwerte aus dem komplexen Modell übernommen, die die Fenster, die TWD, das PCM und den Wärmeverlustkoeffizienten $kA_{ges\,eff} = 100\text{ W/K}$ des Gesamtgebäudes zur Umgebung¹⁶ betreffen. Die Bestimmung der aktiven thermischen Masse des zentralen Mischknotens erfolgt aus der Analyse des Auskühlungsverhaltens zur Umgebungstemperatur. Aus der entsprechenden dynamischen Untersuchung in Kapitel 3.4.2 konnte eine Zeitkonstante von $\tau_1 = 63\text{ h}$ ermittelt werden. Daraus folgt für die effektiv wirksame thermische Kapazität des Mischknotens:

$$mc_p = kA_{ges} * \tau = 22700\text{ kJ/K}$$

Mit dieser Parameterwahl wird der Prädiktor einer Kreuzvalidierung bezüglich des komplexen Modells unterzogen und dabei eine geringfügige Parameteranpassung vorgenommen. Zunächst werden dem reduzierten Modell, entsprechend dem komplexen Modell aus Kapitel 3.4.1 und Abbildung 3.16, Außentemperatursprünge aufgeprägt. Nach empirischer Anpassung der Parameter zeigt Abbildung 4.7 die Reaktion des Prädiktors und des komplexen Modells auf die Umgebungstemperatur. Der Vergleich bezieht sich auf die empfundenen Raumtemperaturen und den Zustand der PCM-Schicht der Wände. Der Verlauf des PCM-Zustandes zeigt für das reduzierte Modell eine höhere Dynamik bezüglich der Raumtemperatur. Der Wärmeübergangskoeffizient musste verkleinert werden und die thermische Masse des PCM-Materials musste erhöht werden. Um die gleiche Schmelzenthalpie im Phasenwechsel zu realisieren, muss die spezifische Schmelzenthalpie um ca. 8 kJ/kg reduziert werden. Die Tabelle 4.1 zeigt die gewählten Parameter.

Als weitere Betrachtung zum reduzierten Modells wird ein dynamischer Klimadatensatz aufgeprägt. Wieder erfolgt der Vergleich mit der dynamischen Reaktion des komplexen Modells. Die Modelle erfahren nur die Störungen durch das Wetter. Abbildung 4.8 zeigt das Ergebnis grafisch auf. Es wurde ein Abschnitt von fünf Tagen gewählt, bei dem ein Phasenwechsel durch Abkühlung (flüssig \rightarrow fest) auftritt.

¹⁶Der Gesamtwärmeverlustwert des Gebäudes zur Umgebung ist in den Sprungantwortuntersuchungen in Kapitel 3.4.2 ermittelt worden.

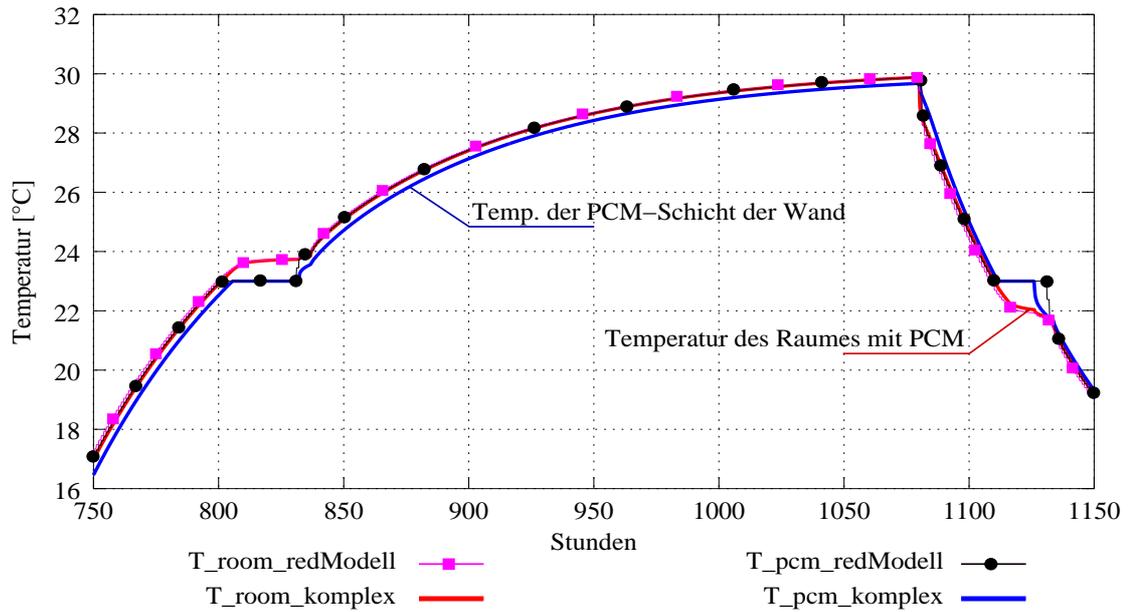


Abbildung 4.7: Reaktion des Prädiktors auf die Umgebungstemperatur im Vergleich mit den Simulationsergebnissen des realistischen Simulationsmodells. Als Systemerregung werden Außentemperatursprünge aufgeprägt.

Parameter zum	komplexen Modell	reduzierten Modell
Gebäude		
$mc_{p_{ges}}$		22700 kJ/K
kA_{ges}	100 W/K	100 W/K
PCM		
$mc_{p_{PCM}}$	2400 kJ/K	3400 kJ/K
kA_{PCM}	2600 W/K	1400 W/K
Schmelztemperatur	23 °C	23 °C
spez. Schmelzenthalpie	30 kJ/kg	22 kJ/kg
TWD		
$mc_{p_{TWD}}$	3304 kJ/K	3304 kJ/K
kA_i	78 W/K	98 W/K
kA_a	16 W/K	22 W/K
Fläche	10 m ²	10 m ²
g-Wert	0,8	0,8
Süd-Fenster		
Fläche	20 m ²	20 m ²
g-Wert	0,6	0,6

Tabelle 4.1: Gegenüberstellung der Parameterwahl von reduziertem und komplexem Modell.

Wieder zeigt sich ein nahezu identischer Verlauf der zu vergleichenden Raumtemperaturen. Es treten aber leichte Temperaturüberhöhungen bei der Vorhersage auf. Mit dem zusätzlichen Einkoppeln der Solarenergie durch die Fenster, reagiert der Mischknoten des redu-

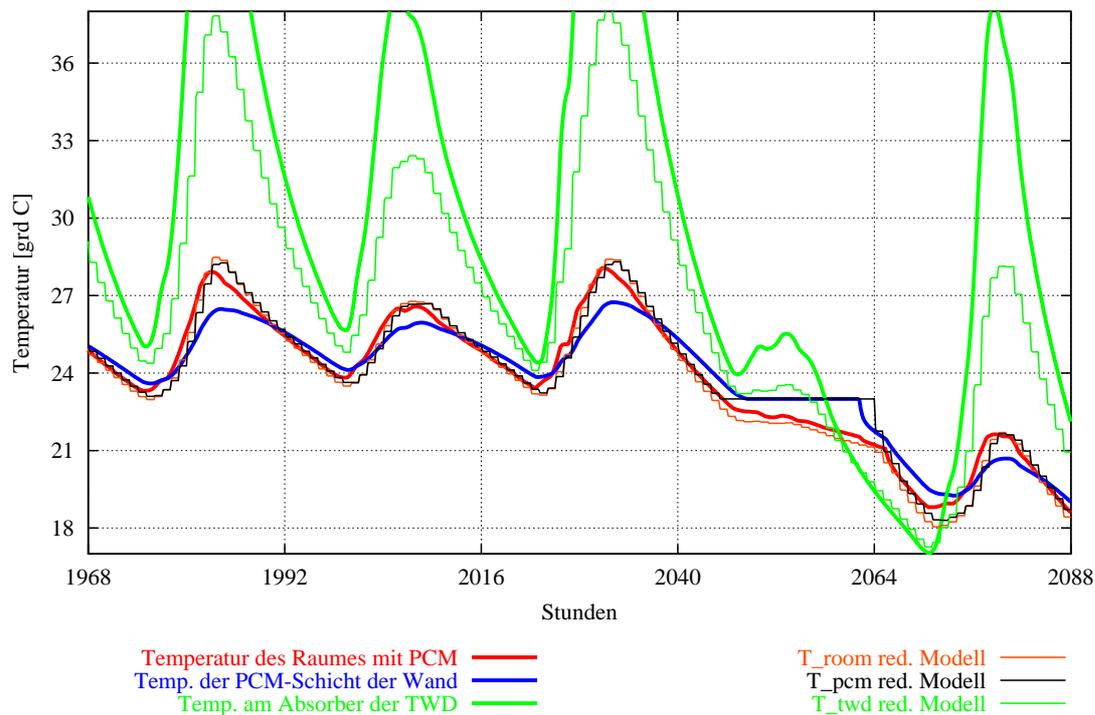


Abbildung 4.8: Vergleich von reduzierten- und komplexen Modellen auf Störungen durch das Wetter. Das Diagramm zeigt die dynamische Reaktion des reduzierten Modells. Die Temperaturverläufe der Vorhersage sind um den Prädiktionshorizont verschoben.

zierten Modells empfindlicher als das realitätsnahe Modell. Dank der Funktionalität des Abgleichs zu Beginn einer Prädiktion wirkt sich dies jedoch nicht über einen längeren Zeitpunkt hinaus aus.

Die Wärmeverlustkoeffizienten nach außen und innen, bezüglich des TWD-Knotens im reduzierten Modell, sind in beiden Fällen leicht erhöht worden. Bei dieser empirischen Ermittlung der Werte wurde darauf geachtet, dass lokale Temperaturspitzen zum gleichen Zeitpunkt wie die des Referenzknotens in der TWD-Wand des komplexen Modells auftreten. Eine bessere Anpassung der Temperaturverläufe war nicht zu bewerkstelligen. Trotzdem geht die Eigenschaft der verzögerten Wärmeabgabe in das reduzierte Modell mit ein und wirkt sich somit tendenziell korrekt auf den vorhergesagten Raumtemperaturverlauf aus.

Ergebnis

Die Diagramme belegen, dass sich mit Hilfe eines deutlich vereinfachten Modells und der Verfügbarkeit einer präzisen Wettervorhersage eine recht gute Übereinstimmung der Raumtemperaturen erzielen lässt. Dank des Abgleichs, die Raumtemperatur zum Beginn einer Vorhersage mit Hilfe einer Messung dem Mischknoten aufzuprägen, parallel aber die anderen Knoten (PCM und TWD) in ihrem Zustand nicht zu korrigieren, ist der Speicherzustand der modernen Wandelemente bekannt und die Vorhersagequalität sehr robust.

4.2.4 Konzept: Fuzzy-Logik

Mit der von Lofti A. Zadeh [82] bereits 1965 vorgeschlagenen Beschreibung unscharfer (engl. *fuzzy*) Informationen als Kennlinien und den darauf basierenden Verknüpfungen hat die Theorie der Fuzzy-Sets den Weg in die Regelungstechnik gefunden. In vielen weiteren Arbeiten und Anwendungen hat diese Technologie besonders in den 90-er Jahren im europäischen Raum einen Boom erlebt [35]. In der industriellen Technik findet man heute eine Vielzahl von Anwendungen der Fuzzy-Logik¹⁷, deren Umsetzung in Prozesssteuerungen oder Regelungen "*Fuzzy-Control*" genannt wird. Da der Fuzzy-Controller aus Zustandsgrößen des Systems statisch seinen Führungsausgang bestimmt, gehört er unter den Reglertypen zu den Kennfeldreglern. Eine ausführliche Darstellung zur Fuzzy-Theorie findet sich z. B. in Bandemer und Gottwald [1] sowie in Kahlert und Frank [35].

In Anlehnung an die menschliche Denkweise und die verbale Beschreibung eines technischen Sachverhaltes¹⁸, wird mit Hilfe von Expertenwissen diese "Messgröße" in ein Regelungsverfahren überführt. Hierzu werden die "unscharfen" Aussagen einer Menge ("kalt" oder "mittel" oder "warm") zugeordnet. Die Mengen können durch Kennlinien charakterisiert werden. Dieser Vorgang basiert auf Expertenwissen, hierbei wird aufgrund hoher Erfahrung eine Mengenzuweisung vorgenommen. Der "Experte" kennt zudem das Verhalten des zu regelnden Systems sehr gut, so dass er zu den Aussagen passende Entscheidungsregeln definiert. Diese sogenannte Implikation besteht aus einer WENN... DANN...-Regel. Eine Fuzzy-Inferenz besteht aus einer oder mehreren Regeln, die das fuzzy-logische Schließen aufgrund von unscharfen Informationen zum Inhalt hat [35]. Eine einfache Regelfolge kann beispielsweise folgendermaßen formuliert werden:¹⁹

Prämisse 1:	WENN es im Zimmer <i>kalt</i> ist und WENN es <i>abends</i> ist,
Konklusion 1:	DANN soll die Heizung <i>stark heizen</i> .
Prämisse 2:	WENN es im Zimmer <i>gut so</i> ist und WENN es <i>abends</i> ist,
Konklusion 2:	DANN soll die Heizung <i>mittel heizen</i> .

Die durch die WENN... DANN...-Regeln gegebenen Relationen müssen in einem Rechenalgorithmus überführt werden, der zu einer "scharfen" Ausgangsgröße führt. Dazu werden im ersten Schritt mit der *Fuzzifikation* die Eingangsgrößen in die linguistischen Terme übertragen. So können die "scharfen" Eingangsgrößen einer Bewertung unterzogen werden. (Abb. 4.9)

Im zweiten Schritt resultiert, mit der Bestimmung der aktiven Regeln und der Ermittlung des jeweiligen Erfüllungsgrades der Prämissen²⁰ aller aktiven Regeln, pro Implikation ei-

¹⁷Man findet aber auch gerade im Konsumgüterbereich eine Vielzahl von Anwendungen dieser Technologie, z. B. in Fotoapparaten, Waschmaschinen oder Staubsaugern.

¹⁸z. B. "der Raum ist mir *zu kalt*" oder "die Geschwindigkeit des Autos ist *ziemlich groß*" sind solche verbalen Beschreibungen.

¹⁹Zur Erläuterung der Fuzzy-Logik wurde ein einfaches Beispiel gewählt, welches so im entwickelten Regelungskonzept jedoch nicht implementiert ist.

²⁰Bei der Bestimmung des Erfüllungsgrades werden die UND-Verknüpfungen im WENN-Teil der Regel als MIN-Operation interpretiert.

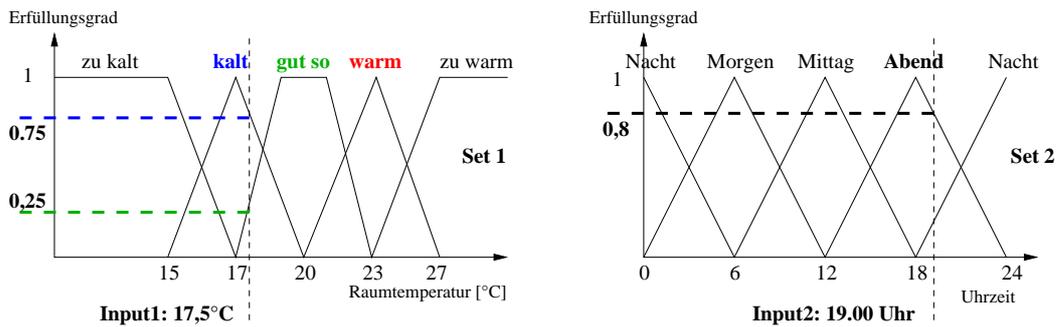


Abbildung 4.9: Setzt man als "scharfe" Eingangsgrößen z. B. eine Zimmertemperatur von 17,5 °C um 19.00 Uhr voraus, dann kann über die im Vorfeld festgelegten linguistischen Terme für die Eingangsgrößen eine Bewertung der im Text genannten Prämissen erfolgen. Innerhalb dieser Fuzzifikation wird jeder Verknüpfung des "WENN-Teils" ein Erfüllungsgrad zugewiesen und mit dem MIN-Operator der niedrigste Erfüllungsgrad selektiert. Dieser Wert wird zur Bewertung der Schlussfolgerungen (Konklusion) herangezogen.

ne Ausgangsmenge. Dabei wird aus dem Erfüllungsgrad der Prämissen (WENN-Teil) eine Bewertung der Konklusion (DANN-Teil) vorgenommen. Die ermittelten Ausgangsmengen werden mit dem MAX-Operator zusammengefasst. (Abb. 4.9 und 4.10)

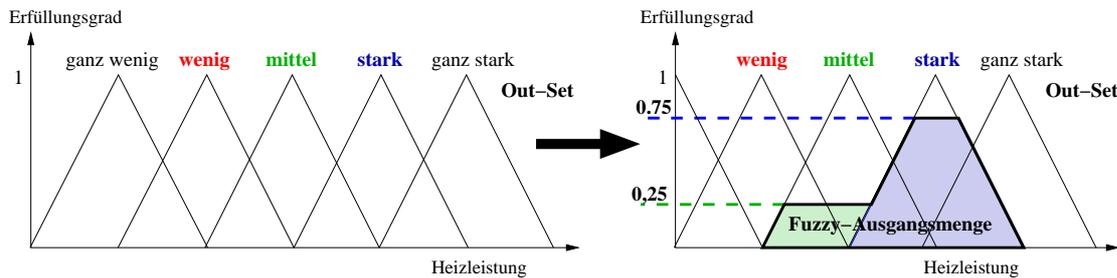


Abbildung 4.10: Ist eine Bewertung der Schlussfolgerungen erfolgt, wird durch Abschneiden aller aktiven Regeln auf Höhe des Erfüllungsgrades die Ausgangsmenge bestimmt.

Im dritten Schritt, der *Defuzzifikation*, muss aus der resultierenden Fuzzy-Ausgangsmenge eine "scharfe" Ausgangsgröße berechnet werden. Eine gebräuchliche Methode stellt die Schwerpunktmethode²¹ (engl. *Center of Gravity*) dar (Abb. 4.11). Der scharfe Ausgangswert entspricht dem Abszissenwert des Schwerpunktes der Fläche der unscharfen Fuzzy-Ausgangsmenge. Dieses Verfahren findet in der in *ColSim* implementierten Fuzzy-Logik Verwendung.

Aufgrund der "unscharfen Sensorik" des Menschen gegenüber dem Behaglichkeitsempfinden, empfiehlt sich der Fuzzy-Ansatz zur Verarbeitung der unscharfen Informationen. Die Möglichkeit mit Hilfe der Fuzzy-Logik aus empirischen Regeln ein komplexes Kennfeld zu generieren, sind gerade bezüglich der prädiktiven Ansätze vielfältig.

²¹Dieses Verfahren geht auf H. Watanabe 1986 zurück.

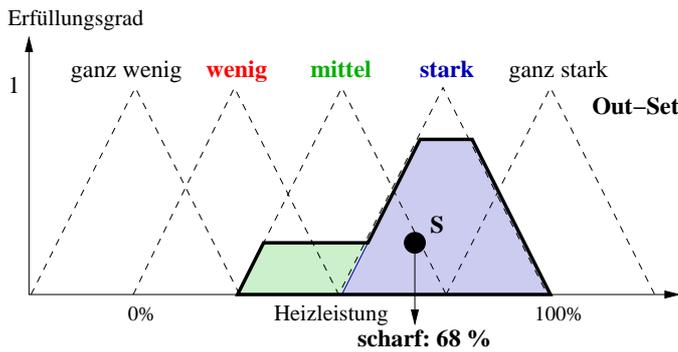


Abbildung 4.11: Mit der Ermittlung des Flächenschwerpunktes der aus der Inferenz resultierenden Fuzzy-Ausgangsmenge wird eine "scharfe" Ausgangsgröße berechnet. (Defuzzifizierung)

4.2.5 Linguistische Variablen

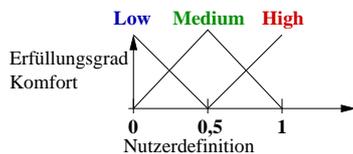
Insgesamt wurden für den hier implementierten Fuzzy-Ansatz acht linguistische Variablen definiert. Davon sind lediglich zwei zur Definition der Eingangsgrößen vorgesehen. Sie interpretieren den vom Nutzer vorgegebenen Komfortanspruch und die wetterbedingten Einflüsse auf das Gebäude.

Entsprechend der Stellglieder (Heizung, Verschattung Fenster, Verschattung TWD, Nachtlüftung), die zum Wärmemanagement des Gebäudes wichtig sind, definieren sich die restlichen sechs linguistischen Variablen aus den vier Ausgangsgrößen für die Stellglieder und aus zwei Fuzzy-Mengen, die abhängig vom Komfortanspruch, das Behaglichkeitsfeld beschreiben. Es folgt die Beschreibung der linguistischen Variablen.

Komfort

Diese zentrale Eingangsvariable bildet die Variable zur Beschreibung des Komfortanspruches des Bewohners. Wie bereits oben beschrieben wird dem Nutzer die Möglichkeit gegeben, mit der er dem Regler sein Behaglichkeitsempfinden bezüglich der Raumtemperatur und Wirtschaftlichkeit mitteilen kann. Dies kann als Bedienfeld, wie in [3] vorgeschlagen, ein Schieber oder ein Drehknopf sein. Der Nutzer kann in dieser Form quasi-kontinuierlich²² zwischen maximaler Wirtschaftlichkeit (Komfort = 0) und maximalem Komfort (minimale Ökonomie; Komfort = 1) wählen. Damit erfährt die Steuereinheit mit Fuzzy-Logik die Eingabe der Komfortgewichtung: $0 \geq \text{Komfortgewichtung} \leq 1$.

Die linguistische Variable definiert sich über folgende Mengen:



Low Comfort	{0,1},{0.5,0},{1,0}
Medium Comfort	{0,0},{0.5,1},{1,0}
High Comfort	{0,0},{0.5,0},{1,1}

Die Fuzzy-Logik bewertet anhand dieser Eingangsgröße das Behaglichkeitsfeld, welches durch eine minimale und maximale Raumtemperatur beschrieben wird. Er benötigt hierzu

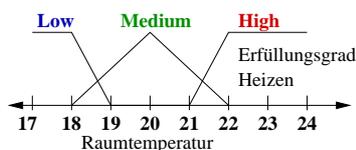
²²In dem Regler wird dieses Eingangssignal diskretisiert in z. B. 10-20 Schritten.

die Raumtemperatur-Mengen “Heizen” und “Überhitzung” anhand dessen er die scharfen Ausgangsgrößen bestimmt.

Raumtemperatur “Heizen”

Diese Ausgangsvariable liefert die Ausgangsgröße für die Raumtemperatur, die die Heizung im Heizfall erreichen soll. Dies ist die Führungsgröße für den unterlagerten Heizkreis (vgl. Abb. 4.2). Die Eingangsvariable hierzu ist der Erfüllungsgrad aus der Fuzzyifizierung der Komfort-Mengen.

Die linguistische Variable definiert sich über folgende Mengen:

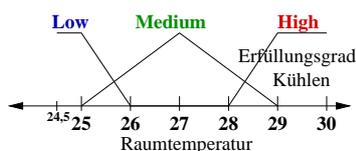


Low Comfort Heating	{17,1}, {18,1}, {19,0}, {24,0}
Medium Comfort Heating	{17,0}, {18,0}, {20,1}, {22,0}, {24,0}
High Comfort Heating	{17,0}, {21,0}, {22,1}, {24,1}

Raumtemperatur “Überhitzung”

Entsprechend der vorherigen Mengenbeschreibung liefert diese Ausgangsvariable den Temperaturwert, der in Abhängigkeit des Komfortanspruchs als Überhitzung interpretiert wird. Dieser Temperaturwert kann als Grenztemperatur zur Zuschaltung einer aktiven Kühleinrichtung genutzt werden. Eine aktive Kühlung über ein Kühlgerät ist innerhalb dieser Simulationen nicht implementiert worden. Ziel dieses Regelungskonzeptes ist die Vermeidung der Überhitzung durch frühzeitige Regulierung des Wärmeflusses am Gebäude ohne zusätzlichen Energieaufwand für die Kühlung. Der Ausgabewert dieser Menge wird innerhalb der folgenden Betrachtungen als Grenzwert des Behaglichkeitsfeldes genutzt und zur Bewertung der unterschiedlichen Regelungskonzepte herangezogen.

Die linguistische Variable definiert sich über folgende Mengen:



High Comfort (Hot)	{24.5,0}, {28,0}, {29,1}, {30,1}
Medium Comfort (Hot)	{24.5,0}, {25,0}, {27,1}, {29,0}, {30,0}
Low Comfort (Hot)	{24.5,1}, {25,1}, {26,0}, {30,0}

Die Verknüpfung der drei bisherigen Mengen beschreibt ein nutzerabhängiges Temperaturfeld. Das Diagramm in Abbildung 4.12 zeigt die Abhängigkeit des Behaglichkeitsfeldes von der gewählten Komfortgewichtung des Benutzers. Ersichtlich ist das tolerierte Temperaturband, welches sich mit Zunahme des Komfortanspruchs verengt. Beispielhaft zeigen die Schnittpunkte der Geraden $Komfortgewichtung = 0,1$; $Komfortgewichtung = 0,5$; und $Komfortgewichtung = 0,9$, dass mit Zunahme des Komfortanspruches die Toleranz gegenüber Überhitzung und Auskühlung sinkt. Bei hoher Komfortwahl folgt somit eine frühzeitigere Überhitzungsvermeidung und ein erhöhter Wärmebedarf zur Deckung der Wärmetransmissionsverluste.

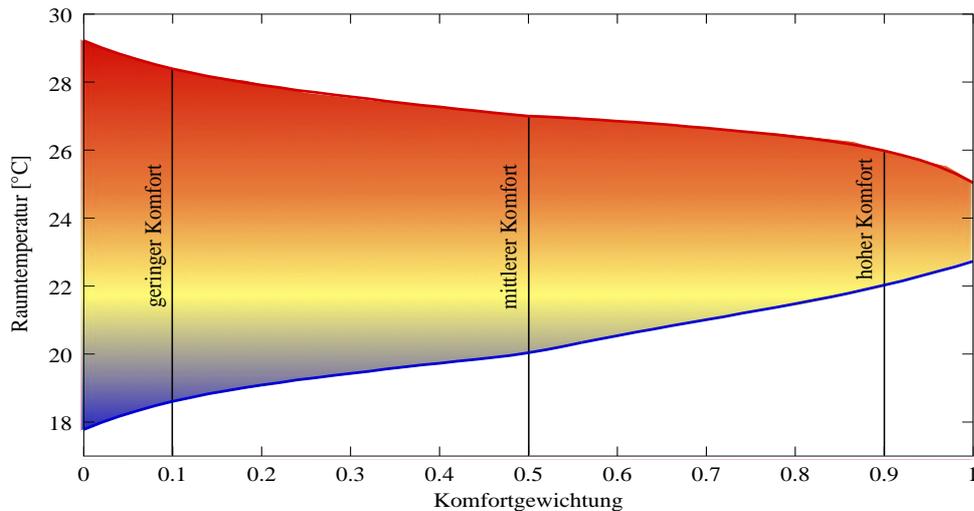
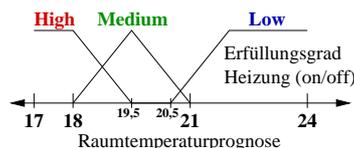


Abbildung 4.12: Darstellung der tolerierten Temperaturen in Abhängigkeit der vom Nutzer gewählten Komfortparameter.

Heizungsvorhersage

Zusätzlich zur Bestimmung eines Behaglichkeitsfeldes wird mit der Heizungs-Prädiktorvariablen eine Schwelltemperatur festgelegt, ab der die Heizung aufgrund der zu erwartenden Einstrahlung ausgeschaltet werden kann. Dieser Ausgangswert erteilt somit die Freigabe für die unterlagerte Heizkreisregelung. Als Eingangswert wird der Erfüllungsgrad aus der Fuzzyfizierung der Komfort-Mengen herangezogen, da hiervon die nutzerbedingte Raumtemperatur abhängt.

Die linguistische Variable definiert sich über folgende Mengen:



High Comfort	{17,1},{18,1},{19.5,0}, {24,0}
Medium Comfort	{17,0},{18,0},{19.5,1},{21,0},{24,0}
Low Comfort	{17,0}, {20.5,0},{22,1},{24,1}

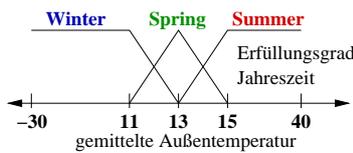
Der berechnete Ausgabewert wird in einem weiteren Schritt mit der Raumtemperaturprognose verglichen. Hierzu wird die vom vorgeschalteten Prädiktor gegebene Raumtemperaturprognose $T_{Room}(t+x)$ eingelesen. Gilt $T_{Room}(t+x) > \text{Ausgangswert}$, greift die Prädiktion in die Regelung ein und schaltet die Heizung ab. Die Wohnung wird über passive solare Gewinne ausreichend erwärmt.

Als weitere Eingangsgröße benötigt die Steuereinheit mit Fuzzy-Logik den wetterbedingten Einfluss auf das Gebäude zur Steuerung der Verschattungseinrichtungen und der Lüftung. Hierzu wird folgende Eingangsmenge definiert.

Jahreszeit

Diese Eingangsvariable gibt dem Regler bekannt, in welcher saisonalen Bedingung sich das Wohngebäude befindet. Hierzu wird als scharfer Eingangswert aus der Umgebungstemperatur der letzten 24 Stunden der Mittelwert berechnet. Der Regler bedient sich hierbei dem “Moving Average”-Verfahren. Dieses übliche Trendverfahren, wie bereits in Kapitel 4.2.2 zur Regelung der TWD-Verschattung beschrieben, wird als saisonales Kriterium mit in die Regelung eingebracht.

Die linguistische Variable definiert sich über folgende Mengen:

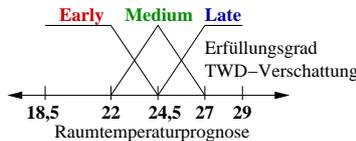


Winter	{-30,1},{11,1},{13,0},{40,0}
Spring/Autumn	{-30,0},{11,0},{13,1},{15,0},{40,0}
Summer	{-30,0},{13,0},{15,1},{40,1}

Verschattung TWD

Diese Ausgangsvariable liefert die Schwelltemperatur T_{TWD} zur Aktivierung der TWD-Verschattung. Die Eingangsvariable ist der Erfüllungsgrad aus der Fuzzyfizierung der Jahreszeiten-Mengen. Dadurch wird eine saisonale Verschattung erreicht.

Die linguistische Variable definiert sich über folgende Mengen:



Early (Summer)	{18.5,1},{22,1},{24.5,0},{29,0}
Medium (Spring/Autumn)	{18.5,0},{22,0},{24.5,1},{27,0},{29,0}
Late (Winter)	{18.5,0},{24.5,0},{27,1},{29,1}

Die berechnete Schwelltemperatur wird in einem zweiten Schritt mit der Raumtemperaturprognose des Prädiktors verglichen. Damit auch der gesetzte Komfortanspruch des Nutzers berücksichtigt wird, erfolgt die Verschattung der TWD, wenn gilt:

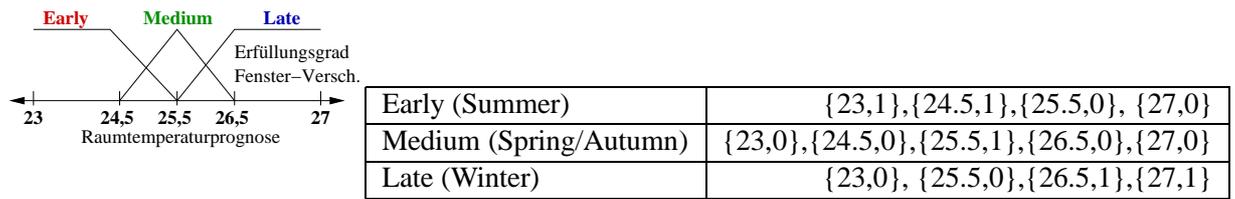
$$T_{Room}(t+x) > T_{TWD} + 1,5 * (1 - \text{Komfortgewichtung})$$

Durch diesen zusätzlichen Vergleich mit der Raumtemperaturprognose des vorgeschalteten Prädiktors werden mögliche Überhitzungen im Winter oder Herbst erkannt, die TWD wird infolgedessen verschattet. Dieser Vergleich führt aber gerade in der Übergangszeit (Frühjahr oder Herbst) auch zu einem späteren Verschatten der TWD, sofern das Behaglichkeitsfeld dies erlaubt.

Verschattung Fenster

Diese Ausgangsvariable liefert die Schwelltemperatur T_{Win} für die Verschattung der Fenster. Die Eingangsgröße ist der Erfüllungsgrad aus der Fuzzyfizierung der Jahreszeiten-Mengen.

Die linguistische Variable definiert sich über folgende Mengen:

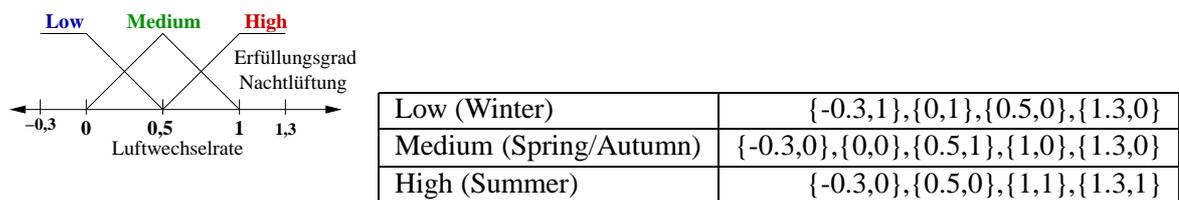


Wieder wird die Prognose des vorgeschalteten Prädiktors benötigt, um drohende Überhitzungen frühzeitig zu erkennen und dies durch die Verschattung zu vermeiden. Die berechnete Schwelltemperatur wird mit der Raumtemperaturprognose verglichen. Der geforderte Komfort des Nutzers wird berücksichtigt. Es erfolgt die Verschattung der Südfenster, wenn gilt: $T_{Room}(t + x) > T_{Win} + 1,5 * (1 - Komfortgewichtung)$

Nachtlüftung

Diese Ausgangsvariable liefert den Faktor ($Set_{ventilation}$) zwischen 0 und 1 zur Aktivierung der Nachtlüftung zwischen 0 und 100%. Der Eingangswert ist der Erfüllungsgrad der Jahreszeitenvariablen. Ist die Freigabe erteilt, wird zusätzlich zum freien Luftwechsel von 0,5 die Luftwechselrate um $3,5 * Set_{ventilation}$ erhöht.

Die linguistische Variable definiert sich über folgende Mengen²³:



Damit die Lüftung aktiviert werden kann, müssen zur Freigabe die in Kapitel 4.2.2 genannten Bedingungen erfüllt sein. Um die Nachtlüftung zusätzlich mit der Prädiktion und dem Komfortbedarf zu verknüpfen, erfolgt ein Vergleich mit der Raumtemperaturprognose unter Berücksichtigung der Komfortgewichtung und dem Faktor $Set_{ventilation}$:

$$T_{Room}(t + x) > Schmelztemp_{PCM} * 1 * (1 - Set_{ventilation} - Komfortgewichtung)$$

Ist die Bedingung erfüllt wird der Luftwechsel nach obiger Gleichung erhöht. Dieser Vergleich hat den Vorteil, dass mittels der Prognose eventuell auf eine Zusatzlüftung verzichtet werden kann, da die Prognose der Raumtemperatur dem Regler mitteilt, dass die Wohnung sich auch ohne Zusatzlüftung ausreichend abkühlt. Andererseits kann der Regler erkennen, dass ohne frühzeitiges Zuschalten der Lüftung eine nicht ausreichende Abkühlung des Raumes erfolgt und damit das PCM nicht ausreichend für den nächsten Tag konditioniert werden kann.

²³Bei dieser Mengenbeschreibung wird über die Minimal- und Maximalwerte hinausgegangen, damit bei der Defuzzifizierung mittels Flächenschwerpunktmethod (Center of Gravity) die Grenzwerte (0% und 100%) für die Stellgröße der Lüftung erreicht wird.

4.2.6 Regelbasis zur Erhaltung der Behaglichkeitstemperatur

Ziel dieses Fuzzy-Ansatzes ist es, die Wohnung entsprechend des Nutzerwunsches zu temperieren. Sie kann sich dabei einer Vorhersage der Raumtemperatur über einen Prädiktionshorizont bedienen. Diese Vorhersage gibt den möglichen Wert an, den die Raumtemperatur nur durch den Einfluss des Wetters erfährt. In diese "Free-Float"-Prognose geht der Einfluss durch Heizung, Verschattung und Nachtlüftung nicht ein.

Die Fuzzy-Logik soll durch Eingreifen in die Wärmetransportvorgänge des Gebäudes, die Klimaprognose nutzen, um das geforderte Behaglichkeitskennfeld bei minimiertem Energieeinsatz zu erreichen. Hierzu müssen die Implikationen die linguistischen Variablen sinnvoll verknüpfen. Insgesamt wurden 18 Regeln formuliert, die beispielsweise diese Form haben:

"WENN Jahreszeit "Herbst/Frühjahr" (z. B. 13 °C), DANN TWD-Verschattung leicht verspätet ("mittel") herabgelassen²⁴."

Mit den 18 Regeln (siehe Anhang D.1) und den acht Mengenbeschreibungen ist ein Regelgerüst aufgebaut, welches durch die Eingangsvariablen, Außentemperatur und Komfortgewichtung des Nutzers, eine Führungsgröße für den Heizkreis, drei Grenztemperaturen für Heizung und Verschattung sowie die Stellgröße für die Nachtlüftung ermittelt (vgl. Abb. 4.2). Mit dem anschließenden Vergleich zur vorhergesagten Raumtemperatur des Prädiktors, erfolgt die Freigabe der jeweiligen Stellglieder. Das Ergebnis ist der Erhalt des geforderten Behaglichkeitsfeldes, bei optimaler Ausnutzung aller Ressourcen.

²⁴Als scharfe Ausgabe wird bei gewählter Mengenbeschreibung eine vorhergesagte Temperatur von 25 °C im Raum zugelassen, ehe die TWD verschattet wird.

Kapitel 5

Simulationsgestützte Untersuchungen

Wie sich nun tatsächlich die Reglerkomposition von Prädiktor und Fuzzy-Logik auf die Erfüllung des geforderten Behaglichkeitsfeldes auswirkt, wird im Folgenden gezeigt. Ausgehend von realitätsnahen und validierten Modellen, wird mit Hilfe umfangreicher dynamischer Simulationsstudien eine Bewertung vorgenommen.

Es wird ein Vergleich zwischen dem konventionellen Betrieb des Gesamtmodells und dem neu entwickelten Regelungskonzept diskutiert. Die durch die Simulation gegebene Möglichkeit der umfangreichen Parametervariation wird dabei genutzt. Der Regler wird im gesamten Betriebsbereich erprobt und auf seine Robustheit¹ getestet. Es stehen folgende Variationen im Vordergrund:

- Variation der Ausstattungsmerkmale
- Variation des Komfortanspruches
- Robustheit bezüglich unterschiedlichen Klimazonen

Die Vor- und Nachteile der Neuentwicklung gegenüber herkömmlichen, isolierten Teilregelungen werden diskutiert. Zunächst wird das Gesamtmodell mit einer konventionellen Regelung untersucht.

Es sei an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass typischerweise Dimensionierungsfragen durch Parametervariationen untersucht werden. Dazu gehören z. B. Veränderungen im Gebäudestandard, der Flächenanteile von Fenstern, des Schmelzpunktes des PCMs, die eingebrachte PCM-Masse u. v. m. So könnten vielfältige Kombinationen von Gebäude und Ausstattungsmerkmalen untersucht werden. In diesem Zusammenhang steht aber die Regelungsoptimierung im Vordergrund. Im Folgenden werden geeignete Parametersätze und Regelungskombinationen untersucht, die verallgemeinerbare Aussagen zur Wärmeflussregelung an modernen, solaroptimierten Gebäuden zulassen.

¹d. h. in der Erfüllung der Anforderungen

5.1 Konventionelle Regelung

Das Referenzgebäude wird konventionell mittels witterungsgeführter Vorlauftemperaturregelung beheizt. Es gibt keine Möglichkeit zur aktiven Kühlung des Gebäudes. Somit gelten im Sommer die sog. “Free Float”-Bedingungen. Eine stellbare Verschattung gibt es für diesen Referenzfall nicht.

Zunächst zeigt Abbildung 5.1 den dynamischen Verlauf der empfundenen Raumtemperatur in Abhängigkeit der Außentemperatur und des Heizkreises für einen “mittleren” Komfortbetrieb. Das Modellgebäude wird ohne Wärmeschutzeinrichtungen betrieben. Zusätzlich ist der Ladezustand der PCM-Wand aufgetragen. Abbildung 5.1 dient für die folgenden Ausführungen als Referenz, um die unterschiedlichen Regelungskonzepte zu bewerten.

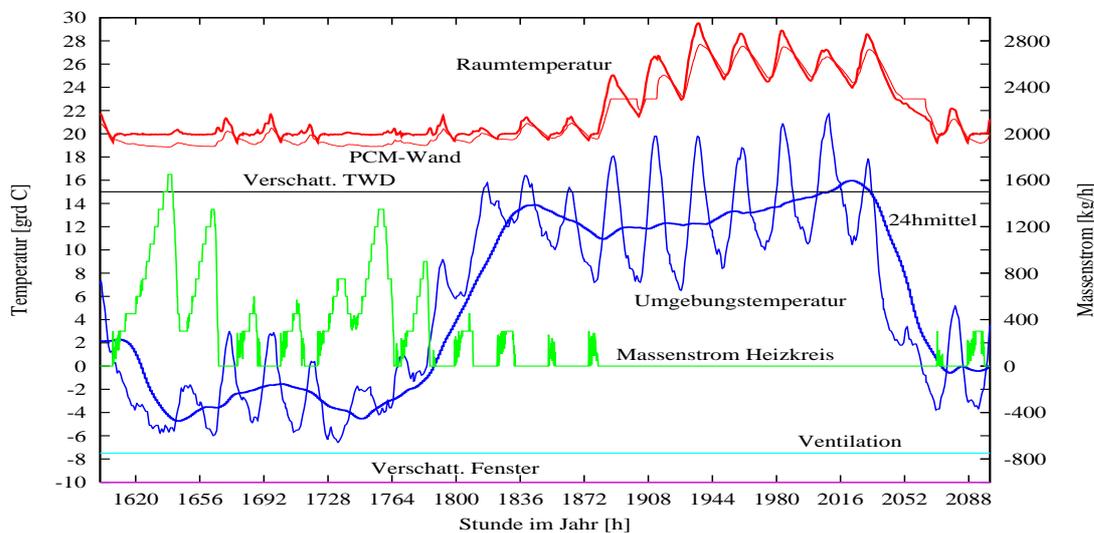


Abbildung 5.1: Dynamischer Verlauf der empfundenen Raumtemperatur in Abhängigkeit der Störgrößen. Dargestellt sind 20 Tage im März mit einer Soll-Raumtemperatur im Heizfall von $20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Es gibt keine Sonnenschutzvorkehrungen und keine Nachtlüftung, so dass das PCM-Material nicht aktiv entladen werden kann. Die Folge ist eine sehr hohe Raumtemperatur von ca. $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ schon nach 2-3 Tagen, die sich durch den solaren Eintrag ergibt.

Die ersten Tage stellen den typischen Heizfall dar. Treten keine “Störungen” durch die Solarstrahlung auf, kann die Heizung die geforderten $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ gut einregeln. Ab Stunde 1884 der Darstellung reicht die Energie der Sonne aus, um ohne zusätzliche Heizenergie den Sollzustand zu erreichen. Es treten aber ohne Verschattungsmöglichkeiten sehr schnell zu hohe Raumtemperaturen auf. Sie steigt auf fast $30\text{ }^{\circ}\text{C}$. Die thermische Masse des Gebäudes ist zu gering, um die Solarenergie zu speichern. In weiterer Folge schmilzt das Phasenwechselmaterial. Im Vergleich zu einer Zone ohne PCM-Putz wird die Maximaltemperatur des Tages um ca. 4 K reduziert (vgl. Abb. 5.5). Am nächsten, sonnigen Tag bleibt die Raumtemperatur wieder unter der Vergleichszone ohne PCM. Folgen weitere sonnige Tage, so wird das PCM nicht entladen, die Temperaturen gleichen sich deshalb an.

Verschattung Fenster

Eine wirkungsvolle Möglichkeit zur Vermeidung einer Raumüberhitzung ist die aktive Verschattung der Fenster. Der Energieeintrag in das Gebäude kann mit Sonnenschutzvorrichtungen drastisch reduziert werden. Die automatische Regulierung des Wärmeflusses durch die Fenster findet man bisher meist nur in Bürogebäuden. Mit der Möglichkeit, schaltende Schichten in den Glasverbund zu integrieren, wird der konstruktive Aufwand reduziert, und die Technik wird somit auch für den Wohnsektor interessant.

Im ersten Fall wird das Gebäudeverhalten mit einer regelbaren Sonnenschutzeinrichtung untersucht. Es gibt keine Regelmöglichkeit zur Nachtlüftung und zur Verschattung der TWD. Die Verschattung der Südfenster erfolgt in Abhängigkeit der Raumtemperatur. Überschreitet die Raumtemperatur einen Schwellwert, so wird die Verschattung aktiviert.

Mit Hilfe einer Simulationsstudie, wird der Schwellwert $T_{VsFenster}$ der Verschattung variiert. Es wird für den Nutzer ein "mittlerer" Komfort definiert, der den Wohnraum im Heizfall auf eine Solltemperatur von $T_{Wohnraum} \approx 20\text{ }^\circ\text{C}$ konditioniert. Wird der Wohnraum wärmer als $27\text{ }^\circ\text{C}$, gilt dies als Komfortfeldüberschreitung. Als Kriterien zum Gebäudeverhalten wird die aufgewendete Zusatzenergie, die Anzahl der Stunden mit $T_{Wohnraum} > 27\text{ }^\circ\text{C}$, die quadratische Regelabweichung zum Komfortfeld² ($20\text{-}27\text{ }^\circ\text{C}$) und die Anzahl der Verschattungsstunden herangezogen. Die Tabelle 5.1 zeigt die Ergebnisse der Studie.

	fossile Zusatzenergie	Komfortfeld- Abweichung	$T_{Wohnraum}$ > $27\text{ }^\circ\text{C}$	Verschattung aktiv
Referenzfall	8228	407 / 103953	1900	—
$T_{VsFenster} = 24\text{ }^\circ\text{C}$	8333	425 / 13286	825	1200
$T_{VsFenster} = 25\text{ }^\circ\text{C}$	8290	417 / 13890	900	980
$T_{VsFenster} = 26\text{ }^\circ\text{C}$	8266	416 / 15250	1025	810
$T_{VsFenster} = 27\text{ }^\circ\text{C}$	8254	414 / 18394	1345	670
	kWh/a	$< 20\text{ }^\circ\text{C} / > 27\text{ }^\circ\text{C}$ K^2	h/a	h/a

Tabelle 5.1: Ergebnisse zur Variation des Stellwertes zur Verschattung der Südfenster. Der Referenzfall beschreibt das Gebäude mit fehlender Einrichtung zum Sonnenschutz.

Der Einfluss der Fensterverschattung ist in dem hohen Wert der Komfortfeldabweichung ($>27\text{ }^\circ\text{C}$) nach oben und Anzahl der Stunden für $T_{Wohnraum} > 27\text{ }^\circ\text{C}$ zu erkennen. Die Abweichung reduziert sich um 82-87 %. Wie erwartet, nimmt die Anzahl der Stunden für die zu hohe Wohnraumtemperatur mit dem Schwellwert der Verschattung ab. Es reduziert sich die Stundenzahl für $T_{VsFenster} = 24\text{ }^\circ\text{C}$ am deutlichsten von 1900 h auf 825 h. Dies

²In der Tabelle 5.1, so wie in den folgenden Tabellen, gibt es eine Spalte, die die quadratische Abweichung zum Komfortfeld über ein gesamtes Jahr angibt. Die Abweichung wird nach unterer und oberer Feldgrenze differenziert und berechnet sich entsprechend der quadratischen Regelfläche nach Gleichung 4.1 als Summe der quadratischen Abweichung:

$$J = \sum_{k=1}^n e^2(t_k)$$

entspricht einer Reduktion um ca. 55 %. Der Schwellwert ist nicht weiter reduziert worden, da sonst die Anzahl der Verschattungsstunden zu groß werden. Dies entspricht auch nicht dem Komfortanspruch, da der Nutzer in der Regel durch freie Sicht den Außenbezug wahren möchte. Der fossile Energiebedarf steigt maximal um 1,3 % für den kleinsten Schwellwert.

Verschattung TWD

Im nächsten Fall wird zur Vermeidung solarer Gewinne nur eine TWD-Verschattung eingesetzt. Es gibt keine Regelmöglichkeit zur Nachtlüftung, sowie keine Verschattung der Fenster. Die Verschattung der TWD folgt dem gleitenden Mittelwert der Umgebungstemperatur, welcher aus den vergangenen 24 Stunden gebildet wird. Steigt das Temperaturmittel über einen Schwellwert $T_{24\text{hmittel}}$, so wird die transparente Wärmedämmung verschattet. Der Grenzwert wurde variiert und die Ergebnisse aus Tabelle 5.2 ermittelt.

	fossile Zusatzenergie	Komfortfeld- Abweichung	T_{Wohnraum} > 27 °C	Verschattung aktiv
Referenzfall	8228	407 / 103953	1900	—
$T_{24\text{hmittel}} > 11\text{ °C}$	8386	426 / 13770	660	4080
$T_{24\text{hmittel}} > 13\text{ °C}$	8318	419 / 14087	700	3450
$T_{24\text{hmittel}} > 15\text{ °C}$	8273	411 / 17503	930	2550
$T_{24\text{hmittel}} > 16\text{ °C}$	8238	411 / 24169	1160	1900
	kWh/a	< 20 °C / > 27 °C K ²	h/a	h/a

Tabelle 5.2: Ergebnisse zur Variation des Stellwertes der TWD-Verschattung. Der Referenzfall beschreibt das Gebäude ohne Einrichtungen zum Wärmeschutz.

Die Verschattung der TWD zeigt ähnliches Verbesserungspotential auf, wie die Verschattung der Fenster. Mit der frühzeitigen Verschattung steigt der fossile Energieeinsatz um maximal 1,9 %. Der Wert zur Komfortfeldabweichung (>27 °C) wird drastisch reduziert. Für TWD-Verschattung oberhalb 11 °C ($T_{24\text{hmittel}} > 11\text{ °C}$) wird die Anzahl der Stunden (600 h) für zu hohe Wohnraumtemperaturen mehr reduziert als bei der Fensterverschattung. Für die weiteren Untersuchungen wird $T_{24\text{hmittel}} > 13\text{ °C}$ gewählt. Dies ist ein typischer Grenzwert für diese Klimaregion. Oftmals wird die Schwelltemperatur auch höher gesetzt, der Nutzer lüftet dann in der Regel die überschüssige Wärme durch die Fenster wieder heraus.

Nachtlüftung

Die Nachtlüftung ist von der Uhrzeit abhängig. Sie kann erst zu späten Abendstunden aktiviert werden und wenn die Umgebungstemperatur kleiner der Wohnraumtemperatur ist. Ziel der Nachtlüftung ist es, im Sommer die Gebäudemasse aktiv abzukühlen, damit am Folgetag eine Temperaturüberhöhung vermieden werden kann. Sinnvoller und realer Wert ist eine Luftwechselrate von 4 h^{-1} zur Entladung des PCMs, dessen Schmelzpunkt mit 23 °C zu Grunde gelegt wurde. Ab einer Raumsolltemperatur von 22,5 °C wird die Lüftung wieder ausgeschaltet. Wie sich eine Gebäude mit dieser Art der Nachtlüftung, verhält zeigt Tabelle 5.3. Die Auswirkung auf den fossilen Energiebedarf sind sehr klein. Die Abweichungen

	fossile Zusatzenergie	Komfortfeld- Abweichung	$T_{Wohnraum}$ > 27 °C	Lüftung aktiv
Referenzfall	8228	407 / 103953	1900	—
Nachtlüftung	8239	412 / 25140	1030	740
	kWh/a	$< 20\text{ °C} / > 27\text{ °C}$ K^2	h/a	h/a

Tabelle 5.3: Einfluss der “Nachtlüftung” und deren Auswirkung auf das Gebäudeverhalten.

vom Komfortfeld sind jedoch deutlich geringer geworden. Man erkennt dies auch an der reduzierten Anzahl (870 h weniger) der zu warmen Stunden im Raum.

Komplette Wärmeschutzausstattung

Wie die bisherigen Untersuchungen zu den Wärmeschutzeinrichtungen gezeigt haben, tragen alle Einrichtungen zu einer deutlichen Vermeidung von Übertemperaturen bei. Die Aktivierung bezüglich des Behaglichkeitsfeldes erfolgt bei allen Einrichtungen zu unterschiedlichen Zeitpunkten. Eine Überlagerung verspricht weitere Verbesserungen. Wie verhält sich also eine Gebäude, welches über eine komplette Ausstattung zum Wärmeschutz verfügt?

Um einen Vergleich zu den Ergebnissen des Prädiktor/Fuzzy-Ansatzes zu schaffen, werden Simulationsrechnungen mit einem Gebäudemodell gemacht, das alle Stellglieder beinhaltet. Die Regelungen sind einfache Zweipunkt-Regelungen mit typischen Schwellwerten, die aus den oben untersuchten Studien entnommen wurden. Die Regelungen arbeiten unabhängig voneinander. Die optimalen Regelparameter der jeweiligen Teilregelungen sind für die Fensterverschattung $T_{VsFenster} = 25\text{ °C}$ und für die TWD-Verschattung $T_{24hmittel} = 13\text{ °C}$. Die Nachtlüftung erfolgt wie oben beschrieben. Entsprechend der Möglichkeit der Regelung mit Vorhersage, ein Komfortkriterium zu definieren, wird die konventionelle Regelung mit drei unterschiedlichen Komfortstandards untersucht:

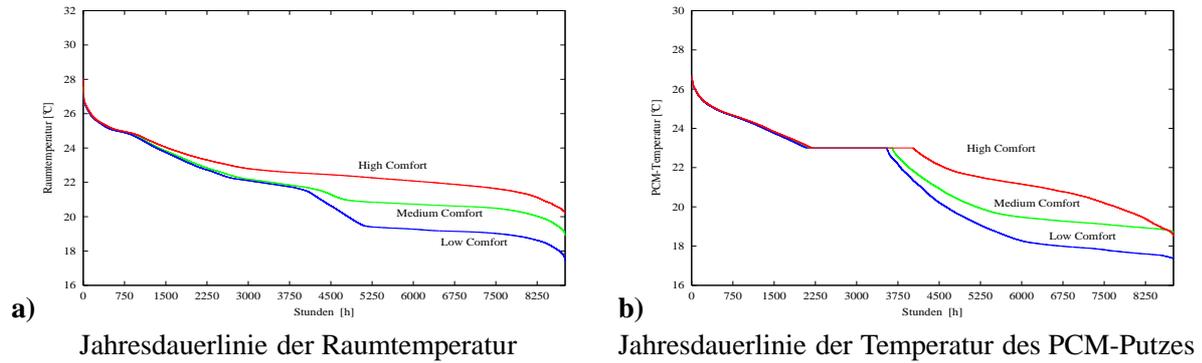
Wohnraumsolltemperatur im Heizfall	
hoher Komfort	22 °C
mittlerer Komfort	20 °C
geringer Komfort	18,6 °C

Es wird schon bei einer Solltemperatur von 22 °C von einem “hohen Komfort” ausgegangen, da die Umschließungsflächen aufgrund des hohen Dämmstandards nicht deutlich kühler sind als die Raumlufttemperatur. Somit werden bei Raumlufttemperaturen um 20 °C (dies entspricht dem mittleren Komfort) bereits angenehme Wohnbedingungen erreicht.

In der Abbildung 5.2 sind mehrere Diagramme und eine Tabelle dargestellt, die das Simulationsergebnis bewerten.

Die beiden oberen Diagramme zeigen Jahresdauerlinien³ (differenziert nach Komfortstandard) der empfundenen Raumtemperatur und der Temperatur des PCM-Putzes im Wand-

³Die Jahresdauerlinien stellen den Temperaturzustand eines Objektes in Abhängigkeit von der jährlich aufgetretenen Zeit dieser Temperatur dar. Anhand dieser Darstellung lässt sich leicht erkennen an wieviel Stunden im Jahr eine Grenztemperatur über- oder unterschritten wurde.



	Low Comfort	Medium Comfort	High Comfort
[Std/a]			
Heizpumpe	2475	2950	3725
Lüftung	670	670	690
Verschatt. TWD	3450	3450	3450
Verschatt. Fenster	540	560	660
$T_{\text{Wohnraum}} > 27\text{ }^{\circ}\text{C}$	0	0	10
c) $T_{\text{PCM}} = 23\text{ }^{\circ}\text{C}$	1400	1500	1875
[kWh/a]			
fossile Zusatzenergie	7286	8355	9645
Kollektorertrag	4625	4579	4525
Heizung (Wohnraum)	4563	6242	8332
Heizung (Nebenraum)	2189	1470	560
[K²] quadr. Abweichung	<18,6 °C: 336 >28 °C: 0	<20 °C: 426 >27 °C: 0	<22 °C: 24173 >26 °C: 138

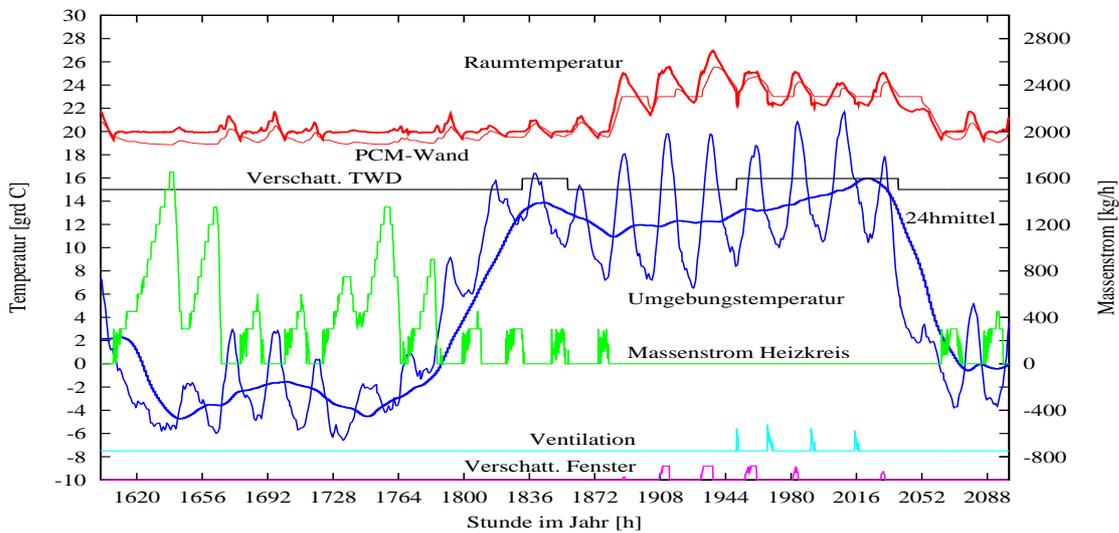


Abbildung 5.2: Simulationsergebnisse zum solaroptimierten Gebäude mit **herkömmlicher Heizungsregelung und konventioneller Verschattung** für Fenster und TWD. Zusätzliche **Nachtlüftung** ermöglicht das Entladen des Latentmaterials.

Diagramme a) u. b) zeigen Jahresdauerlinien der empfundenen Raumtemperatur und der Temperatur des PCM-Putzes in Abhängigkeit der Komfortvorgabe. Die Tabelle zeigt Energien und Betriebszeiten, Diagramm d) den dynamischen Verlauf über mehrere Tage.

verbund. Die Tabelle beinhaltet weitere Angaben. Sie fasst Energien und Betriebszeiten zusammen. Des Weiteren wird entsprechend der Bestimmung zur quadratischen Regelfläche (Kap. 4.1.2) die Abweichung vom Behaglichkeitsfeld bestimmt.

So benötigt der Wohnraum mit geringem Komfort (4563 kWh/a) lediglich die Hälfte an Heizenergie im Bezug auf den Wohnraum mit hohem Komfort (8332 kWh/a). Ähnlich reduziert ist auch die Heizpumpenlaufzeit (33 %). Auffällig ist, dass unabhängig von der Komfortvorgabe die Wohnraumtemperatur T_{Wohnraum} unterhalb von $27 \text{ }^\circ\text{C}$ bleibt. Daraus folgt, dass die Kombination der Sonnenschutz und Lüftungseinrichtungen sinnvoll ist und zu einer weiteren Verbesserung des Komforts führt.

Das untere Diagramm (in Abb. 5.2) zeigt den dynamischen Verlauf mehrerer Tage im Frühjahr. Im Gegensatz zur Abbildung 5.1 erkennt man zusätzliche Schaltmomente der Sonnenschutzeinrichtungen und der Nachtlüftung. An den ersten Tagen mit Heizbedarf, ist keine Abweichung zu erkennen. Später, an einstrahlungsreichen Tagen, entfällt die Beheizung und der Raum wird ausschließlich solar erwärmt. Die Raumtemperatur steigt nicht über $30 \text{ }^\circ\text{C}$. Sie erreicht am dritten sonnigen Tag die Maximaltemperatur von ca. $27 \text{ }^\circ\text{C}$. An der dünnen, roten Linie erkennt man am Verlauf der PCM-Temperatur den erhöhten Phasenwechsel des Latentmaterials. Zu erkennen ist dies an den Zeiträumen, bei denen die Schmelztemperatur des PCMs auftritt.

Die zusätzlichen Systeme kommen zum Einsatz. Die Fenster sind zwischen 540 und 600 Stunden verschattet, wobei hier von schaltenden Schichten ausgegangen wird, die den Gesamtenergiedurchlass um 60 % reduzieren können. Die Nachtlüftung wird ca. 670 Stunden betrieben. Die Verschattungsstunden der TWD sind, da unabhängig von der Raumtemperatur, für alle Komfortfälle gleich und liegen konstant bei 3450 h .

Die gute Funktion zeigt sich auch in der Gesamtzahl der Stunden, bei der die Temperatur des PCM-Putzes $T_{PCM} = 23 \text{ }^\circ\text{C}$ ist. Das Phasenwechselmaterial wird öfter genutzt. Dies wird aus der erhöhten Stundenzahl ersichtlich, die für den Fall, dass keine Sonnenschutzvorrichtungen und keine Nachtlüftung installiert ist deutlich unter 800 h/a liegt. Mit Einsatz der Vorrichtungen erhöht sich der Wert erheblich auf $1400\text{-}1875 \text{ h/a}$ (je nach Komfortfeld).

5.2 Regelung mittels Prädiktion und Fuzzy-Logik

In der nächsten Ergebnisdarstellung kommt das beschriebene Regelungskonzept zum Einsatz. Der Prädiktor gibt stündlich einen neuen Vorhersagewert der "FreeFloat"-Raumtemperatur für den Prädiktionshorizont von zwei Stunden heraus. Die Steuereinheit mit Fuzzy-Logik legt daraufhin in Abhängigkeit des Komfortanspruches und in Abhängigkeit des gleitenden Mittelwertes der Außentemperatur ($T_{2\text{Ahmittel}}$) die Führungsgröße für die Heizung und die Stellgrößen für die Verschattung und Nachtlüftung fest. Analog zu den ersten Fällen werden drei Komfortstandards definiert⁴:

⁴Abbildung 5.12 zeigt die drei Komfortstufen in Verbindung mit der Behaglichkeitsfeldausgabe des Fuzzy Controllers.

	minimale Wohnraumsolltemperatur im Heizfall	maximal tolerierte Wohnraumtemperatur
hoher Komfort	22 °C	26 °C
mittlerer Komfort	20 °C	27 °C
geringer Komfort	18,6 °C	28,3 °C

Abbildung 5.3 zeigt die Simulationsergebnisse mit Fuzzy-Logik und Prädiktor auf. Aus den Jahresdauerlinien wird ersichtlich, dass der Komfortwahl entsprochen wird. Die geforderten Raumtemperaturen werden gegenüber der konventionellen Regelung mit geringerem Heizenergieaufwand erreicht. Zur Überhitzungsproblematik fällt auf, dass für jeden Komfortstandard nahezu keine Überhitzungstemperaturen ($T_{room} > 27\text{ °C}$) auftreten (Ausnahme sind 7 h beim geringen Komfort⁵).

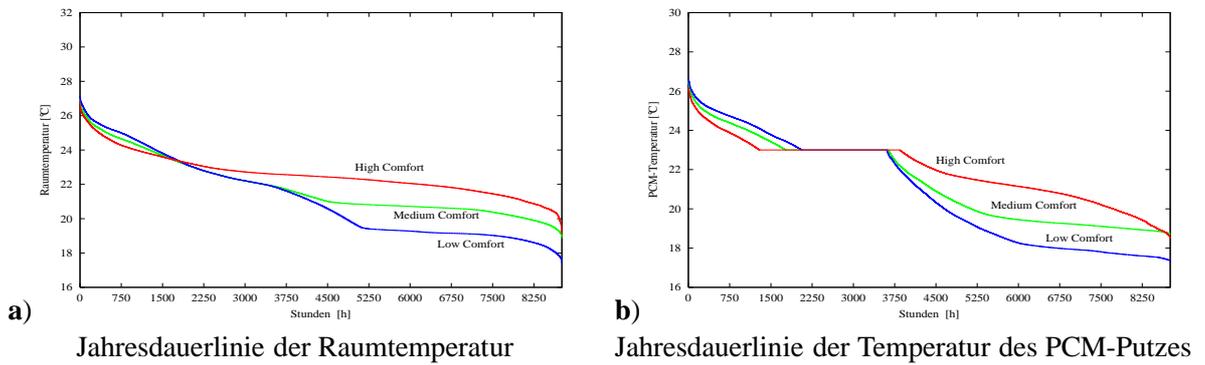
Auffallend ist, dass die Verschattungsstunden der TWD im Vergleich zum konventionellen Fall deutlich geringer sind, aber eine Abhängigkeit von der Komfoteinstellung zu erkennen ist (330-650 h weniger). Die Verschattungsstunden für die Südfenster, sowie die Betriebsstunden der Nachtlüftung zeigen ebenfalls die erwartete Abhängigkeit bezüglich der Komfortgewichtung auf. Mit Zunahme des Komforts steigt die Betriebsstundenzahl. Im Vergleich zum konventionellen Fall (Abb. 5.2) erkennt man die Reduktion der Verschattungsstunden der Fenster. Dies wirkt sich positiv auf den Anspruch der klaren Durchsicht aus. Die Fenster bleiben für den mittleren Komfort 90 h und für den geringen Komfort ca. 70 h länger unverschattet. Für den hohen Komfort muss jedoch öfter (+ 60 h) verschattet werden, da hier die Priorität der Regelung auf dem Maximalwert von 26 °C für die Raumtemperatur liegt. Trotz erhöhten Wärmegewinnen durch TWD und Fenster erhöhen sich die Lüftungsstunden nicht. Im Gegenteil, sie werden um bis zu 100 h reduziert (ca. 15 %). Hieraus folgt auch eine elektrische Energieeinsparung zum Betrieb der Ventilatoren.

Diese Veränderungen im Zusammenspiel der Stelleinrichtungen haben eine klare Auswirkung auf die PCM-Wand. Das Kriterium " $T_{PCM} = 23\text{ °C}$ " zeigt den Phasenwechsel an, es befindet sich für jeden Komfortstandard deutlich häufiger (12-39 %) in diesem Zustand. Die quadratische Regelabweichung zeigt keine signifikanten Veränderungen auf. Für die untere wie auch mittlere Komfortvorgabe ist der Wert für die untere Feldgrenze leicht schlechter. Dies ist die Reaktion auf die gelegentliche, frühzeitige Abschaltung der Heizkreispumpe, wenn solarer Ertrag erwartet wird (vgl. Abb. 5.7). Dies hat zur Folge, dass sich die Raumtemperatur unter 20 °C abkühlt und als Fehler betrachtet wird. Die obere Grenze wird abgesehen vom hohen Komfort nicht überschritten. Der hohe Komfort hat als obere Grenze 26 °C, die ohne aktive Kühlung in seltenen Fällen nicht gehalten werden kann. Hier erreicht die Regelung mit Prädiktor und Fuzzy-Logik den besseren Wert.

5.2.1 Erweiterung um Heizkreisrücklaufbegrenzung

Wie bereits in der Beschreibung zum Regelungskonzept in Kapitel 4.2 erwähnt, wird nun statt der konventionellen witterungsgeführten Vorlauftemperaturregelung die in [32, 33] beschriebene Rücklauftemperaturbegrenzung zum Einsatz gebracht.

⁵In dieser Komfortstufe sind entsprechend des Behaglichkeitsfeldes sogar 28 °C erlaubt.



	Low Comfort	Medium Comfort	High Comfort
[Std/a]			
Heizpumpe	2440	2670	3700
Lüftung	570	600	630
Verschatt. TWD	2800	2950	3120
Verschatt. Fenster	370	470	660
$T_{room} > 27\text{ °C}$	7	0	0
$T_{PCM} = 23\text{ °C}$	1575	1875	2550
[kWh/a]			
fossile Zusatzenergie	7261	8325	9608
Kollektorertrag	4622	4582	4581
Heizung (Wohnraum)	4545	6111	8334
Heizung (Nebenraum)	2178	1578	574
[K²] quadr. Abweichung	<18,6 °C: 339 >28 °C: 0	<20 °C: 483 >27 °C: 0	<22 °C: 23944 >26 °C: 7

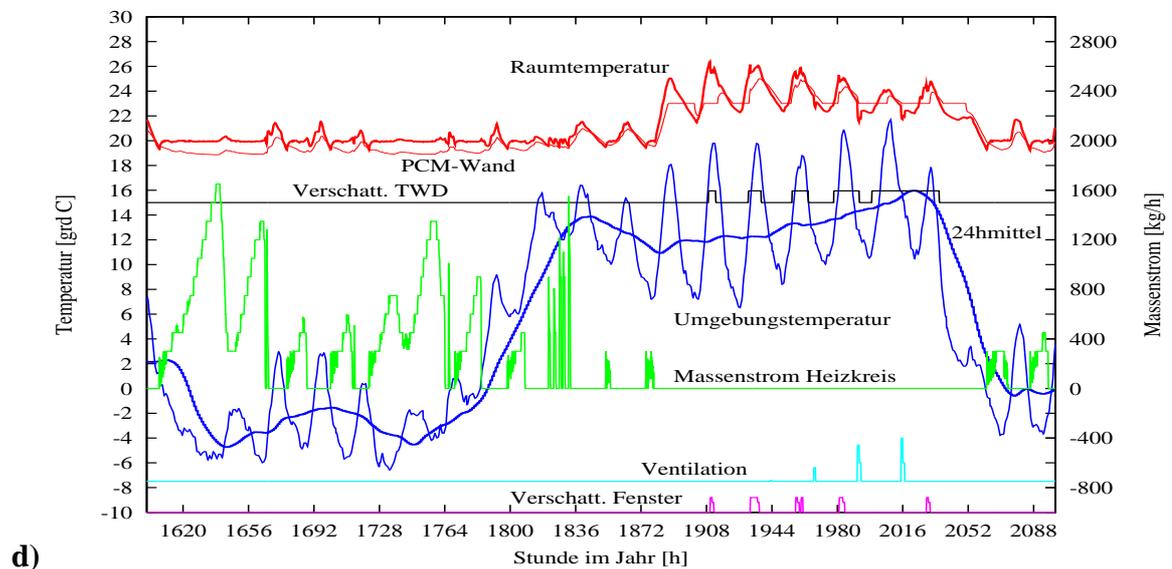


Abbildung 5.3: Simulationsergebnisse zum solaroptimierten Gebäude mit Regelung der Stellglieder über **Prädiktor und Fuzzy-Logik**.
 Diagramme a) u. b) zeigen Jahresdauerlinien der empfundenen Raumtemperatur und der Temperatur des PCM-Putzes in Abhängigkeit der Komfortvorgabe. Die Tabelle zeigt Energien und Betriebszeiten, Diagramm d) den dynamischen Verlauf über mehrere Tage.

Bei der bisherigen konventionellen Heizkreisregelung bleibt der Einfluss der passiven solaren Gewinne auf den Heizwärmebedarf unberücksichtigt. Wie die Untersuchungen in Kapitel 2.1.1 gezeigt haben, bewirkt die Einstrahlung im Niedrigenergiegebäuden mit hohen, passiven, solaren Gewinnen, aber eine deutliche Reduktion des Heizwärmebedarfs.

Mit der Beobachtung der Heizkreisrücklauftemperatur (T_{RL}) erhält man eine Messgröße, die die Gebäudereaktion auf solare Gewinne widerspiegelt⁶. Bei hohen solaren Gewinnen würde die Rücklauftemperatur erwartungsgemäß höher sein als an einem entsprechenden Tag ohne solare Gewinne⁷. T_{RL} erfasst das Gebäudeverhalten bezüglich solarer und interner Gewinne und eignet sich auch als Stellgröße zur Heizungsregelung.

Der erweiterte Ansatz ist die witterungsgeführte Rücklauftemperatur-Begrenzung (RLB). Zur Bestimmung der notwendigen Heizleistung kommt ein Modellansatz zum Tragen, der entsprechend des Gebäudestandards und der Gebäudereaktion auf solare Einstrahlung, Einfluss auf T_{RL} hat. Des Weiteren wird immer die zur Verfügung stehende, maximale Speichertemperatur dem Heizkreis zur Verfügung gestellt. Daraus folgt für T_{RL} :

$$T_{RL} = f(T_{Umgebung}, T_{VL}, Modell) \text{ mit } T_{VL} = T_{VLmax}$$

Hiermit ergeben sich Veränderungen im Heizungssystem. Zum einen kann auf den Mischbetrieb (Heizkreis) verzichtet werden und zum anderen muss die Heizleistung durch die Begrenzung der Rücklauftemperatur reduziert werden. Dies wird durch die variable Drehzahl der Heizkreispumpe erreicht. Die Folge ist eine maximierte Temperaturspreizung zwischen T_{VL} und T_{RL} . Die Rücklauftemperatur kann somit deutlich gesenkt werden.

Der Regelungsalgorithmus sieht auch das Abschalten der Pumpe vor, wenn trotz niedrigster Pumpenstufe die Rücklauftemperatur noch zu hoch ist. Je nach Gebäudeträgheit kann die Pumpe über mehrere Minuten ausgeschaltet werden. Für das behandelte Simulationsmodell wurden empirisch 10 Minuten Ausschaltzeit festgelegt. Aufgrund der geringen Auskühlung könnte die Pumpe auch länger abgeschaltet werden. Die Folge ist dann jedoch eine verhältnismäßig hohe Regelabweichung für die untere Behaglichkeitsgrenze. Damit die quadratische Regelabweichung aber als Kriterium herangezogen werden kann, und trotzdem ein erkennbare Reduktion der Pumpenlaufzeiten resultiert, wurde die Ausschaltzeit auf 10 Minuten begrenzt.

Ein Absenken der Rücklauftemperatur bewirkt bei solaren Kombisystemen eine Reduktion der Speicherverluste durch geringere Temperaturen im unteren Speicherbereich. Von dem Einsatz eines Mischers im Heizkreis kann abgesehen werden. Da bei der witterungsgeführten Rücklauftemperatur-Regelung von einer konstanten Vorlauftemperatur ($T_{VL} = 60^\circ C$) ausgegangen wird, zeigt dieses Regelungsprinzip gerade im Teillastverhalten eine höhere Dynamik. Die Heizleistung ist höher. Parallel hierzu reduziert sich der notwendige Massenstrom im Heizkreis⁸. Die Heizungspumpe kann sogar des öfteren ausgeschaltet werden.[33]

⁶mit $P_{htg} = \dot{m} \cdot c_p \cdot (T_{VL} - T_{RL})$ und der Annahme, dass \dot{m} und T_{VL} fest sind.

⁷gleiche Ventilstellung der Thermostate vorausgesetzt

⁸Bedingung für kleine Massenströme im Heizkreis ist der hydraulische Abgleich. Nur so werden bei einem "LowFlow" im Heizkreis alle Heizkörper erreicht.

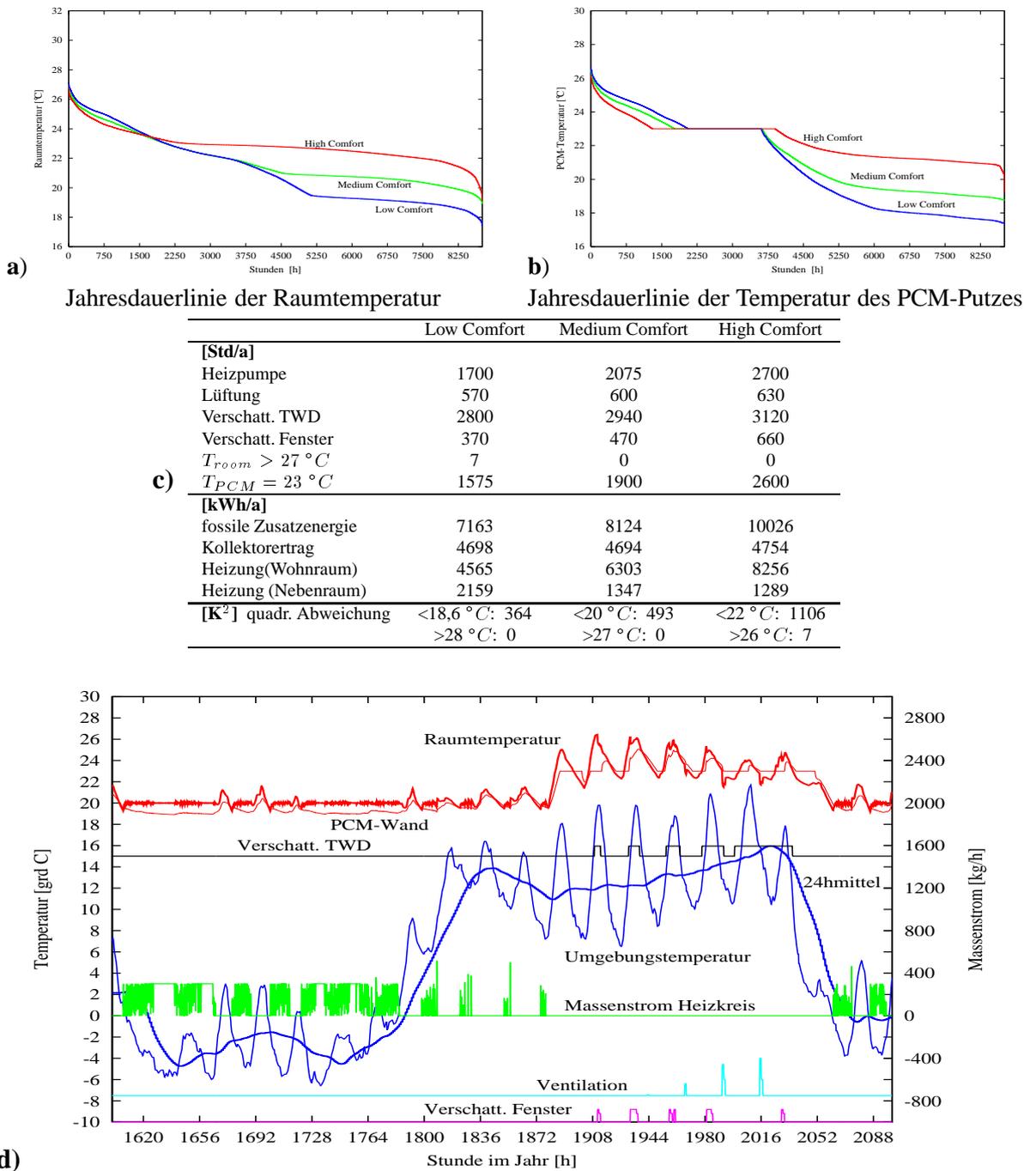


Abbildung 5.4: Simulationsergebnisse zum solaroptimierten Gebäude mit Regelung der Stellglieder über **Prädiktor, Fuzzy-Logik und Heizkreisregelung** über eine witterungsgeführte Rücklauftemperatur.

Diagramme a) u. b) zeigen Jahresdauerlinien der empfundenen Raumtemperatur und der Temperatur des PCM-Putzes in Abhängigkeit der Komfortvorgabe. Die Tabelle zeigt Energien und Betriebszeiten, Diagramm d) den dynamischen Verlauf über mehrere Tage.

Abbildung 5.4 stellt die Ergebnisse der Simulationsrechnungen dar. In allen drei gewählten Komfortbereichen zeigt sich der selbe Effekt. Die Pumpenlaufzeit nimmt merklich ab (-775 bis -1025 Stunden). Die umgewälzte Masse wird reduziert. Daraus folgt eine deutliche Ersparnis an Primärenergie⁹. Trotz dieses Eingriffs in die Pumpenregelung werden die Beispielgebäude zuverlässig mit Wärme versorgt. Aufgrund der bereitstehenden höheren Heizleistung im Teillastfall steigt der Wärmeeintrag in den Wohnraum. Mit Ausnahme des Falles für den hohen Komfort wirkt sich das nicht auf die benötigte Zusatzenergie aus. Sie wird für den mittleren Komfortfall um 231 kWh gesenkt. Dies ist vor allem die Folge der reduzierten Systemverluste im Speicher (-53 kWh) und des höheren Kollektorsertrages (+115 kWh).

Bei dem hohen Komfort wirkt sich die Rücklaufbegrenzung nicht derart positiv¹⁰ aus. Aufgrund des engen Behaglichkeitsfeldes führt die schneller eingetragene Wärme (höhere Leistung der Heizung) zu höheren Temperaturen, so dass die solaren Gewinne nicht mehr zugelassen werden. Bei der hohen Komferteinstellung ist die Wirtschaftlichkeit jedoch nicht ausschlaggebend. Stattdessen befindet sich die empfundene Raumtemperatur ca. 1300 Stunden länger innerhalb des Behaglichkeitsfeldes. Mit zu berücksichtigen ist auch, dass die gewählte Heizanlage (Leistung des Brenners und Wahl der Heizkörper und -kennlinie) für den mittleren Komfortfall (Zieltemperatur 20 °C) ausgelegt ist.

Die konventionelle Heizungsregelung begrenzt die Wärmeabgabe in den Raum, dadurch wird der solaren Energie mehr Freiraum gelassen. Eine Simulationsrechnung mit angepassten Heizkreisparametern zeigt, dass der fossile Zusatzbedarf steigt und sich die Raumtemperatur länger innerhalb des Behaglichkeitsfeldes befindet. Bei der witterungsgeführten Rücklaufregelung besteht aufgrund der immer gleich hohen Vorlauftemperatur ein höheres Leistungspotential. Dieses Potential ist gezielt einsetzbar, so dass variabel auf unterschiedliche Ansprüche reagiert werden kann. Ohne Änderung der Heizkennlinie kann somit der hohe Komfortanspruch besser erfüllt werden.

Die Angaben zur quadratischen Regelabweichung zeigen bei der unteren Feldgrenze nochmals eine weitere Verschlechterung (Ausnahme hoher Komfort). Wie bereits erwähnt ist das die Folge der Heizpumpenabschaltung aufgrund zu hoher Rücklauftemperaturen bei niedrigster Pumpenstufe. Für den hohen Komfort dagegen ist der Wert signifikant reduziert worden. Hier wirkt sich das hohe Leistungspotential mit der immer hohen Vorlauftemperatur positiv auf die quadratische Regelabweichung aus. Die obere Grenze weist das gleiche Ergebnis wie im vorigen Fall ohne Rücklaufbegrenzung auf.

5.2.2 Weitere Auswertungen

Vergleicht man die Temperaturverläufe der behandelten Regelungskonzepte im Bezug auf Raumtemperatur und PCM-Wand, so ist mit der Zunahme der Wärmeschutzvorrichtungen

⁹Geht man von einer mittleren elektrischen Leistungsaufnahme für die Pumpe von 80 $Watt$ aus, dann folgt daraus eine mögliche elektrische Energieeinsparung von ca. 82 kWh/a (prim.-energ. ca. 246 kWh/a). Setzt man eine "kleinere" Pumpe ein, ist im Vergleich die Energieeinsparung noch größer.

¹⁰nicht positiv im Bezug auf die Wirtschaftlichkeit, es findet jedoch eine Verbesserung in der Erfüllung des Behaglichkeitsanspruches statt

und des Regelaufwandes eine kontinuierliche Verbesserung erkennbar (Abb. 5.5). Es ist zur Veranschaulichung der gleiche Zeitabschnitt wie aus den bereits gezeigten, dynamischen Diagrammen gewählt worden. Als Erweiterung zu diesem Frühjahrsfall zeigen die unteren Diagramme ein Beispiel für den Sommer auf.

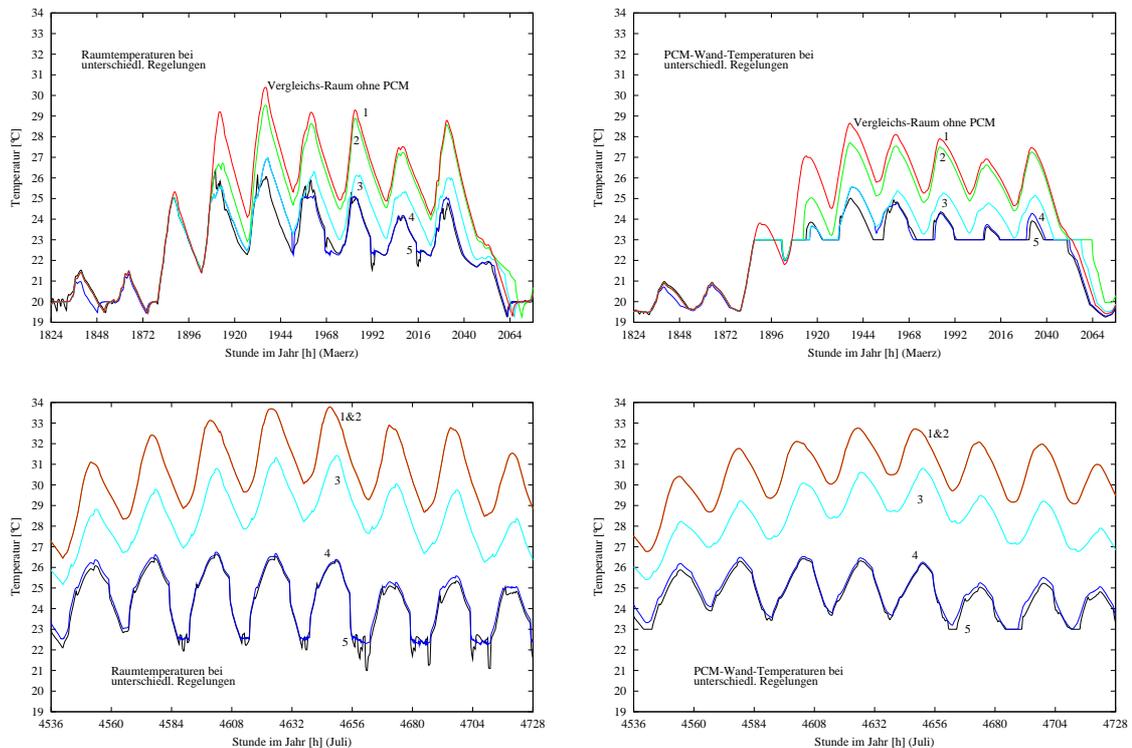


Abbildung 5.5: Dynamischer Verlauf der Raum- (links) und PCM-Wandtemperaturen (rechts) für unterschiedliche Parameter, Regelungskonzepte und Jahreszeit (oben: März; unten: Juli). 1. Raum ohne PCM und ohne Verschattungseinrichtung für TWD und Fenster sowie Nachtlüftungsmöglichkeit 2. Raum mit PCM und ohne Einrichtungen 3. Raum mit PCM und Verschattungseinrichtung Fenster 4. Raum mit PCM und herkömmlicher Regelung aller Verschattungseinrichtungen und der Nachtlüftung 5. wie 4. jedoch mit Regelung der Einrichtungen über Prädiktor und Fuzzy-Logik.

Mit Zunahme des Regelungsaufwandes wird der Wohnraumtemperaturverlauf gedämpft. Zeigt ein Raum ohne PCM im Frühjahr noch eine Maximaltemperatur von über $30\text{ }^{\circ}\text{C}$, so wird dieses Maximum durch das PCM um einen Grad gesenkt. Der Einsatz aller Wärmeschutzvorkehrungen mit konventioneller Regelung reduziert das Maximum auf $27\text{ }^{\circ}\text{C}$. Der Prädiktor reduziert sogar die Maximaltemperatur dieses Zeitabschnittes auf $26\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Im Sommer liegen die Temperaturen ohne und mit PCM genau übereinander. Dies resultiert daraus, dass das Latentmaterial sich immer im geschmolzenen Zustand befindet und somit nicht mehr aktiviert wird. Die Schmelzenthalpie zur Energiespeicherung beim Phasenwechsel tritt nicht mehr ein. Wird nun zum Sonnenschutz nur eine Einrichtung eingesetzt (hier schaltbare Fenster) so kann die Raumtemperatur um ca. 2 Kelvin gesenkt werden. Erst der

kombinatorische Einsatz von Verschattung und Nachtlüftung senkt die Raumtemperatur auf einen komfortablen Wert.

Ersichtlich ist die Wirkung auch an den rechten Diagrammen. Sie zeigt die Temperatur des PCM-Putzes. Die Temperatur der PCM-Wand ist reduziert. Mit der übergreifenden Regelung befindet sich das PCM klarer im Bereich der Schmelztemperatur. Das Material wird optimiert eingesetzt. Der Unterschied zwischen konventioneller und neuartiger Regelung ist nicht so deutlich ersichtlich. Erst an der absoluten Stundenzahl für $T_{PCM} = 23\text{ °C}$ sieht man die Veränderung. So befindet sich die PCM-Wand mit konventioneller Regelung ca. 400 h weniger bei dieser Temperatur.

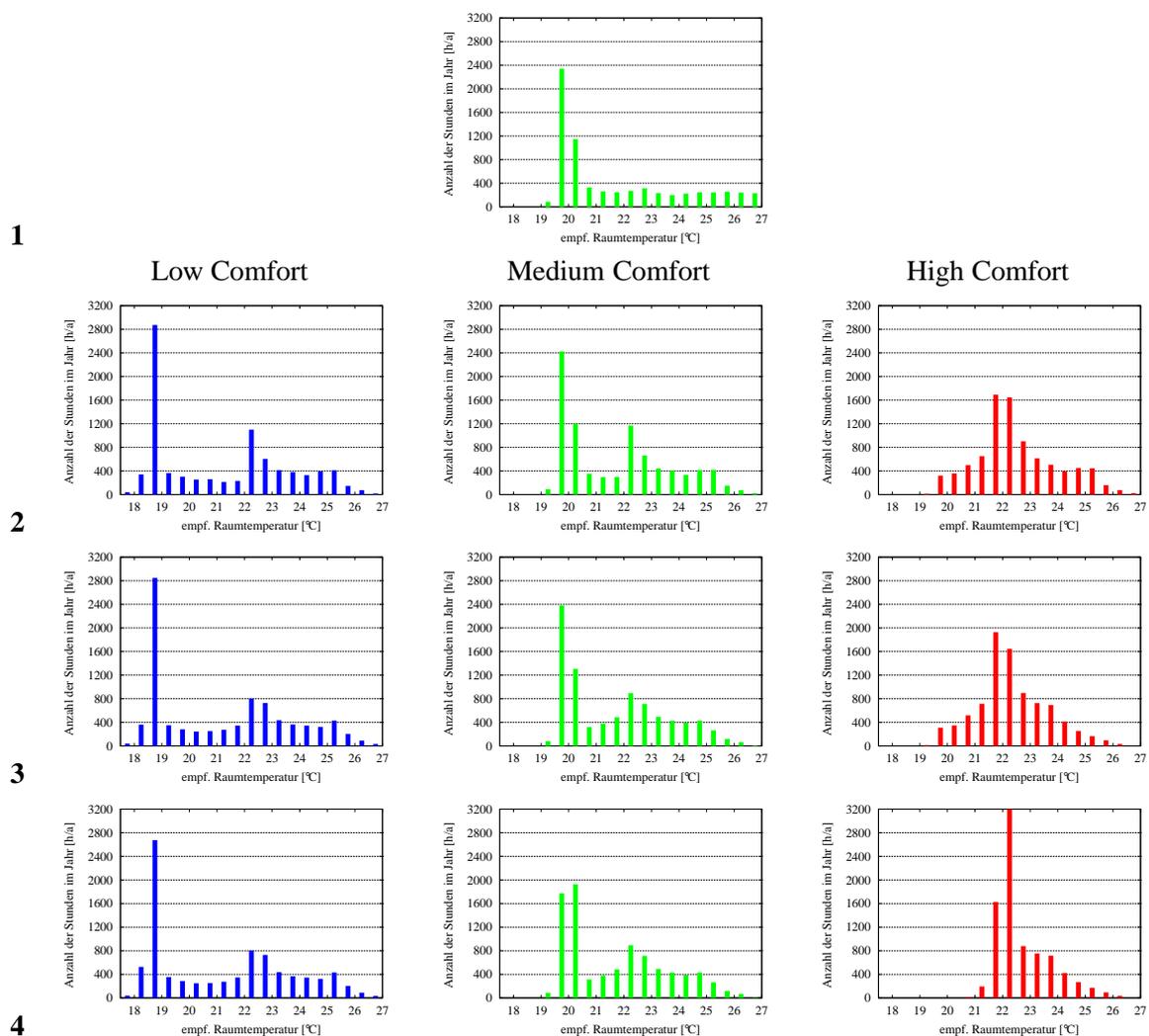


Abbildung 5.6: Häufigkeitsverteilung der empfundenen Raumtemperatur der Wohnzone in 0,5 Kelvin-Schritten. **1.** Raum mit PCM; keine Wärmeschutzvorkehrungen **2.** Raum mit PCM; herkömmliche Regelung aller Verschattungseinrichtungen und der Nachtlüftung **3.** wie 2. jedoch mit Regelung der Einrichtungen über Prädiktor und Fuzzy-Logik **4.** wie 3 mit zusätzlicher Rücklauftemperaturbegrenzung im Heizkreis.

Abbildung 5.6 zeigt die Raumtemperaturverteilung der Wohnzone. In den Histogrammen wird die Häufigkeit der Temperaturen von $17,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ bis $27\text{ }^{\circ}\text{C}$ in Klassen mit $0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ Schritten dargestellt. Es wird nach Komfortgewichtung und Regelungskonzept differenziert. An der maximalen Häufigkeit in jedem Diagramm, erkennt man die geforderte Solltemperatur für den Heizfall. Bei dem geringen bis mittleren Komfort findet man mehr oder weniger ausgeprägt ein zweites lokales Maximum. Diese liegt immer zwischen 22 und $23\text{ }^{\circ}\text{C}$. Die Ursache liegt im PCM-Verhalten. Im obersten Diagramm ist kein zweites lokales Maximum zur erkennen. Es zeigt die Häufigkeitsverteilung für das Simulationsmodell mit PCM aber ohne Wärmeschutzeinrichtungen.

Das Optimierungspotential zur Reduktion des Heizbedarfs durch eine Vorhersage scheint bei dieser Konstellation ausgeschöpft zu sein. Da aufgrund der PCM-Untersuchung ein Gebäude in leichter bis mittlerer Bauweise gewählt wurde, fehlt das notwendige Speicherverhalten der thermischen Masse. Dadurch können die solaren Gewinne nicht längerfristig gespeichert werden, sondern erwärmen primär die Luft. Diese ist schnell wieder abgekühlt, so dass früher wieder geheizt werden muss. Ein Problem der schnellen Erhöhung der Raumtemperatur ist das Lüften. Sie bewirkt, dass solare Gewinne einfach wieder herausgelüftet werden, ohne dass eine Einspeicherung in die Gebäudemasse stattfindet. Die Solarenergie wird also nicht genutzt.

Die Abbildung 5.7 zeigt einen Tag an dem das Regelungskonzept zur frühzeitigen Abschalt-

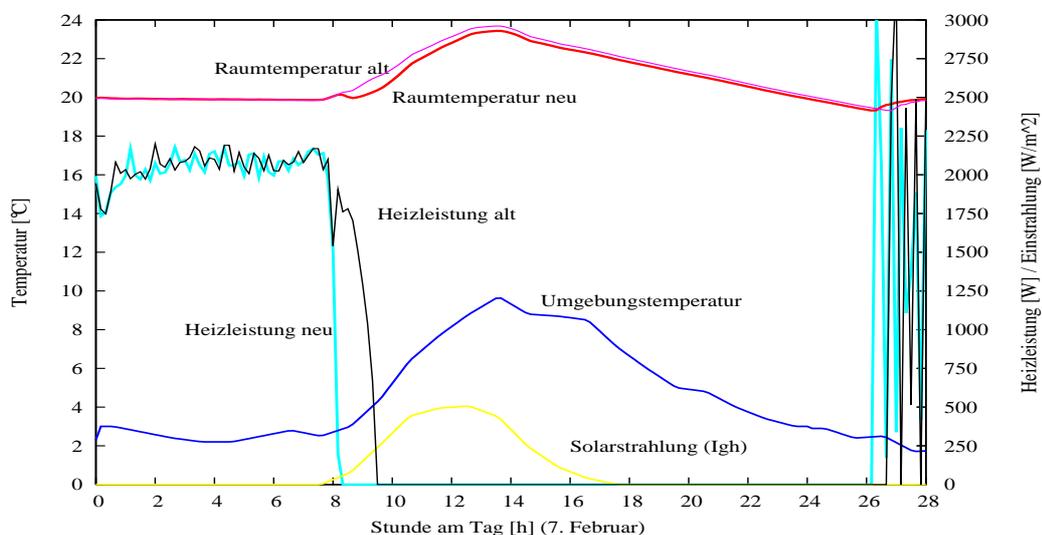


Abbildung 5.7: Beispiel zur vorzeitigen Abschaltung der Heizung durch den Prädiktor aufgrund zu erwartender passiver Gewinne. Das frühe Abschalten führt zu einer geringeren Raumtemperatur und damit in Folge zu einem vorzeitigen Heizenergiebedarf. Die Vergleichskurven für eine herkömmliche Regelung sind mit eingetragen.

tung der Heizung geführt hat. Es ergibt sich genau der erwartete Raumtemperaturverlauf, der auch in Abbildung 4.4 dargestellt ist. Die Raumtemperatur folgt der Vergleichstemperatur mit etwas Verzögerung, da es nach Abschalten der Heizung zuerst zu einer Abkühlung im

Raum kommt. Sie erreicht nicht die Höhe der Vergleichstemperatur und kühlt zum Abend hin früher auf Solltemperatur ab. Dies hat zur Folge, dass die Heizung früher in Betrieb geht (ca. 2.00 Uhr am folgenden Tag). Die konventionelle Heizungsregelung folgt mit einer halben Stunde Verspätung (ca. 2.30 Uhr). Somit verringert sich die Energieeinsparung am Morgen durch einen erhöhten Verbrauch am Abend.

5.2.3 Robustheit gegenüber Änderungen

Zur ergänzenden Untersuchung der Funktion und der Leistungsfähigkeit der Reglerkomponente, werden mit realitätsnahen Simulationen weitere Parametervariationen vorgenommen. Bisher betrafen diese Parametervariationen den Regler selbst. Die Vergleiche bezogen sich auf konventionelle und prädiktive Regelungsansätze. Mit dem Einstellen der Komfortgewichtung wurde der Regler bezüglich des Behaglichkeitsfeldes untersucht.

Im Weiteren betrifft die Parametervariation die Strecke selbst. Zur Untersuchung der Robustheit erfährt das Gebäude einen geänderten Störgrößeneinfluss. Hierbei wird gezeigt, welchen Einfluss extreme Veränderungen auf die Regelung und das Erreichen der Gütekriterien Komfort und Wirtschaftlichkeit haben.

Aufgrund der großen Zahl von Möglichkeiten die Strecke zu verändern, werden daher im Folgenden die Kombinationsmöglichkeiten eingeschränkt. Das Behaglichkeitsfeld entspricht der mittleren Komfortgewichtung. Das heißt, der Raum soll nicht kälter $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ und nicht wärmer $27\text{ }^{\circ}\text{C}$ werden. Es gibt keine aktive Kühleinrichtung. Die aktive thermische Anlage bleibt in seiner Auslegung konstant. Das Gebäude selbst wird in seiner Bauweise nicht verändert. Stattdessen erfährt das Gebäude den Ausfall einzelner Einrichtungen:

- **Fall 0:** Alle Komponenten und Stellglieder sind aktiv. Keine Änderung der Strecke. (Referenzfall)
- **Fall 1:** Das Phasenwechselmaterial ist nicht aktivierbar.
- **Fall 2:** Die Zusatzlüftung zur Nachtabkühlung des PCM-Raumes ist defekt.
- **Fall 3:** Die Verschattung der Südfenster zur Vermeidung der Überhitzung ist defekt.

Um die Abhängigkeit des Prädiktor von der Wettervorhersage zu demonstrieren, wird zusätzlich das Fallbeispiel 4 eingeführt. Hierbei wird die einfache Form der Persistenzvorhersage gewählt. Es werden zur Vorhersage die Wetterbedingungen vom Vortag genutzt. Dies führt zu einer ungenauen Prognose der Raumtemperatur.

- **Fall 4:** Persistenzwettervorhersage. Dem Prädiktor dienen als Vorhersage die Wetterbedingungen des Vortages.

Untersuchungen zur Robustheit des Regelungskonzeptes in unterschiedlichen Klimaregionen erfolgt durch den fünften Fall. Hierzu wird das Simulationsmodell mit diversen europäischen Klimadaten beaufschlagt.

- o **Fall 5:** Aufprägen von drei weiteren europäischen Referenzjahren. (Carpentras (FR); Stockholm (SE); Badgastein (AT))

Bei allen Fallbeispielen wird eine Vergleichsrechnung mit der konventionellen Regelung durchgeführt.

Tabelle 5.4 zeigt eine Auswahl der Ergebnisse zur Parametervariation. Als Kriterium zur Bewertung des Simulationslaufs dient der jährlich fossile Energieeinsatz des Gesamtsystems, der solare Kollektorertrag, sowie die Behaglichkeitskriterien zur Raumtemperatur. In dieser Tabelle ist auch die quadratische Regelfläche nach Gleichung 4.1 als Kriterium aufgeführt.

		fossile Zusatzenergie	solarer Kollektorertrag	mittlere Empf.-temp.	maximale Lufttemp.	Komfortfeld- abweichung
Fall 0	konv.	8355	4579	21,83	27,58	426 / 0
keine Änderung	neu	8124 /-2,8%	4694 /+2,5%	21,69	26,99	493 / 0
Fall 1	konv.	8413	4586	21,75	28,12	431 / 0
PCM defekt	neu	8229 /-2,2%	4846 /+5,7%	21,43	27,78	497 / 3
Fall 2 Verschatt.	konv.	8334	4575	22,00	29,98	423 / 1697
Fenster defekt	neu	8101 /-2,8%	4690 /+2,5%	21,92	29,35	498 / 1357
Fall 3	konv.	8349	4577	21,96	28,11	424 / 69
Zusatzlüftung defekt	neu	8118 /-2,8%	4690 /+2,5%	21,91	28,06	495 / 57
Fall 4 ungenaue Wettervorhersage	konv.	—	—	—	—	—
	neu	8161	4681	21,75	27,24	1113 / 1
Fall 5 (Klimaregion)						
Carpentras (FR)	konv.	1803	6065	23,34	30,29	250 / 3706
	neu	1626 /-9,8%	6118 /+0,9%	23,25	30,24	279 / 3378
Stockholm (SE)	konv.	11990	4301	21,81	28,30	392 / 11
	neu	11761 /-1,9%	4392 /+2,1%	21,73	27,72	421 / 3
Badgastein (AT)	konv.	8773	5039	21,67	27,11	519 / 0
	neu	8498 /-3,1%	5172 /+2,6%	21,64	27,23	540 / 1
		in kWh/a	in kWh/a	in °C	in °C	K ² <20 °C / >27 °C

Tabelle 5.4: *Robustheitsbewertung der Regelungskonzepte durch Variation von Streckenparametern. Vergleich von konventioneller Regelung mit übergreifendem Prädiktor-Fuzzy-Konzept. (Die Prozent-Angaben geben die relativen Veränderungen zum jeweiligen konventionellen Fall an.)*

Alle Simulationsrechnungen zeigen die erwarteten Reaktionen. Es kommt zu einer leichten Zunahme der fossilen Zusatzenergie, wenn sich das PCM nicht aktivieren lässt (Fall 1). Die Auswirkung auf die Behaglichkeit erscheint gering. Der Sonnenschutz schützt bei frühzeitigem Verschließen vor Überhitzungen. Der Prädiktor erreicht eine um 0,3 K geringere Temperatur für die maximal aufgetretene Raumtemperatur. Wenn man die Verschattungsstunden mit zum Komfort zählt, so wird der gute Schutz vor Überhitzung gegenüber dem Vergleichsfall (Fall 0) mit einer 50 bis 90 Stunden längeren Verschattung erreicht. Die Regelabweichung als Kriterium zum Gütemaß ist in beiden Fällen gleich.

Ist die Verschattung defekt (Fall 2), kann keine der Regelungsarten den geforderten Bereich von maximal 27 °C erfüllen. Trotzdem erreicht der Prädiktor eine um 0,6 K geringere Temperatur. Die komplexe Regelung scheint gemäß Regelabweichung (für > 27 °C) besser zu adaptieren. Sie steigt im Gegensatz zur konventionellen Regelung (+1697 Einheiten) nur um +1357 Einheiten.

Versagt die Zusatzlüftung (Fall 3) zur Entladung des PCMs, so führt dies auch zu deutlich höheren Temperaturen ($> 27\text{ }^{\circ}\text{C}$) im Raum. Die nicht vorhandene Konditionierung in der Nacht führt am folgenden sonnigen Tag zu einem weiteren Temperaturanstieg. Dies erklärt die höheren Temperaturen gegenüber dem Vergleichsfall.

Der Fall 4 betrifft nur die Prädiktor-Regelung, da die perfekte Wettervorhersage durch die Persistenzvorhersage ersetzt wird. Es zeigen sich gegenüber dem Energieverbrauch, dem Kollektorsertrag und den Raumtemperaturen kaum merkliche Änderungen zum Referenzfall. Betrachtet man jedoch die Regelabweichung, welche die quadratische Summe aller Abweichungen vom Behaglichkeitsfeld über das ganze Jahr bildet, so stellt man eine 125% Steigerung fest. Dies bedeutet, dass deutlich öfter die Raumtemperatur nicht der Gewünschten entspricht. Bei falscher Vorhersage kann das Regelungskonzept weniger gut reagieren. Es zeigt sich die Abhängigkeit des Reglers von der Qualität der Wetterprognose. Es sei jedoch erwähnt, dass innerhalb des Reglers keine Plausibilitätsabfrage bezüglich der Vorhersage implementiert ist, da bei den bisherigen Untersuchungen von einer idealen Wettervorhersage ausgegangen wurde. Durch den Vergleich von Vorhersage und Ist-Temperaturen (Außentemperatur) kann der Regler entscheiden ob er die Vorhersage nutzt, oder ob er auf die Vorhersage verzichtet und konventionell weiter regelt. Die Maßnahme würde die Abhängigkeit von der Qualität der Wetterprognose deutlich reduzieren.

Zur Untersuchung der Robustheit des Reglers gegenüber der Wettereinflüsse, wurden dem Gesamt-Simulationsmodell Wetterdaten aus unterschiedlichen europäischen Klimaregionen aufgeprägt. Das Gebäude, wie auch die thermische Anlage wurden in ihrer Ausstattung und Dimensionierung nicht verändert. Jahresklimadatensätze von Südfrankreich (Carpentras), Schweden (Stockholm) und alpinem Österreich (Badgastein), wurden als Prüfdatensätze herangezogen. Die Ergebnisse sind transparent, d. h. sie entsprechen den Erwartungen. Die Jahresenergiewerte weisen eine Zunahme der Zusatzenergie für die kälteren Regionen und eine Abnahme für die wärmere Region auf. Die Behaglichkeitskriterien verändern sich ebenfalls in Richtung der Erwartung. Die Regelabweichung für die Klimaregion Carpentras ist im Vergleich am größten. Die häufig auftretenden zu hohen Raumtemperaturen, lassen sich nicht mehr vermeiden. Die Regelabweichung wird dadurch vergrößert. Die übergreifende Regelung erreicht durch den dynamischen Fuzzy-Ansatz zur Schwellwertbestimmung jedoch den besseren Wert. Für die nördliche Klimaregion wird die Regelabweichung am kleinsten, aber auch hier zeigt der Wert für die übergreifende Regelung eine Verbesserung auf. Die alpine Klimazone um Badgastein entspricht in etwa der von Zürich. Die Ergebnisse sind ähnlich.

In allen Klimaregionen bewirkt die Prädiktorregelung mit Fuzzy-Logik und Rücklauftemperaturbegrenzung Energieeinsparungen an fossiler Zusatzenergie im Bereich von 1,9 (Stockholm) bis 9,8 % (Carpentras). Der Kollektor erfährt durch die niedrigeren Speichertemperaturen im unteren Bereich einen besseren Arbeitspunkt, der den solaren Eintrag durch den Kollektor erhöht. Bezogen auf den Gesamtenergiebedarf steigert sich dadurch die solare Deckung (berechnet nach: $f_{sol} = \frac{Q_{sol} - Q_{ges} - Q_{zu}}{Q_{ges}}$) um bis zu 1,9 %.

Kapitel 6

Zusammenfassung und Ausblick

Das moderne Wohngebäude zeichnet sich durch einen niedrigen Heizwärmebedarf aus. Mit Zunahme der Sensitivität des Wohngebäudes bezüglich der Solarstrahlung aufgrund neuartiger Systeme wie transparenter Wärmedämmung, Phasenwechselmaterialien oder großer Fensterflächen, erweitert sich der herkömmliche Regelungsansatz zur Einhaltung des behaglichen Raumklimas. Das thermische Gebäudeverhalten definiert sich weitaus komplexer. Es kommen neben der notwendigen Heizung weitere Aktoren (Sonnenschutzeinrichtung, Lüftung) ins Spiel. Die Zunahme der realisierbaren, solaren Erträge bewirken im Winter fossile Energieeinsparungen. Im Sommer sind jedoch ohne geeignete Maßnahmen Überhitzungen die Folge. Mit Hilfe moderner und vernetzter Regelungstechnik können Wirtschaftlichkeit des Systems und Komfort optimiert werden.

Hierzu wurden in der vorliegenden Arbeit bewährte Simulationswerkzeuge erweitert. Moderne Komponenten wie Phasenwechselmaterialien, transparente Wärmedämmung und Verschattungssysteme auf Basis einer schaltenden Schicht im Glasverbund erfahren eine Modellbildung. Umfangreiche Validierungen zu den Teilmodellen und zum Gesamtmodell zeigen, dass eine realitätsnahe Abbildung erreicht wird. Grundlage dieser Validierungssequenzen waren Feldtestmessungen an bewohnten Gebäuden, sowie Ergebnisse von Systemtestständen. Die Aussagesicherheit des gesamten Gebäudemodells wurde durch eine sogenannte "Cross-Validation" mit anderen etablierten Simulationsprogrammen hergestellt.

Mit der Schaffung der realitätsnahen Abbildung eines solaroptimierten Wohngebäudes, welches an eine heizungsunterstützende, solarthermische Anlage gekoppelt ist, wurde die Grundlage zur Entwicklung einer prädiktiven Wärmeflussregelung in Wohngebäuden mit erweitertem thermischen Verhalten gelegt.

Eine Untersuchung zum dynamischen Verhalten auf periodische Anregung von Einflussgrößen, zeigt die dominanten Zeitkonstanten des Gebäudesystems auf. Einfallende Solarstrahlung durch Fenster wirkt sich am schnellsten auf die empfundene Raumtemperatur aus. Dies hat Auswirkung auf die prädiktive Regelung. Während im Winter die Solarstrahlung zur Heizungsunterstützung herangezogen werden soll, gilt es, im Sommer die Bewohner vor Überhitzung zu schützen. Damit die Regelung in der Heizperiode an sonnigen Tagen

nicht unnötig vorheizt¹ und damit Überhitzungen² vermieden werden können, wurde für das untersuchte Gebäudemodell der Prognosehorizont für den Prädiktor auf zwei Stunden bestimmt.

Mit dem modellbasierten Regelungskonzept wurde ein übergreifendes Wärmemanagementsystem entwickelt, welches mit der Information einer lokalen Wettervorhersage den thermischen Zustand des Gebäudes vorhersagt. Aufgrund des im Regler implementierten, reduzierten Modells, berücksichtigt die Prädiktion die besonderen Eigenschaften der eingesetzten Fassadenkomponenten.

Dieser modellbasierte Ansatz zeichnet sich durch seine geringe Anzahl von Sensoren aus. Er benötigt als Messwert nur die aktuelle Raumtemperatur, sowie die zu erwartenden Klimabedingungen. Alle anderen Zustandswerte bestimmt der Prädiktor selbst. Aus der vorhergesagten Raumtemperatur und dem Nutzerprofil bestimmt die Steuereinheit mit Fuzzy-Logik die Stellgrößen für die Aktoren. Hiermit wird ein optimiertes Zusammenspiel von Heizung, Sonnenschutz und Lüftung erreicht.

Mit umfangreichen, simulationsgestützten Untersuchungen wurde das Regelungskonzept einer Bewertung unterzogen. Als Referenzsystem dient ein Gebäude mit herkömmlicher Regelungskonzeption.

Die Ergebnisse zeigen, dass das Zusammenspiel von Sonnenschutzeinrichtung, Lüftung und Heizung optimiert wird. Der Raum wird präziser in dem geforderten Temperatur- und Komfortbereich gehalten. Durch das übergeordnete Regelungskonzept konnte im Vergleich zu einer herkömmlichen Regelungssystematik:

- die Anzahl der Nachtlüftungsstunden um bis zu 10 % reduziert werden.
- die PCM-Wand ca. 400 h (26 %) länger innerhalb der Schmelztemperatur gehalten werden. Daraus folgt eine bessere Ausnutzung der Speicherung von Wärme im Phasenwechsel des Latentmaterials.
- die Verschattungsstunden der Fenster (bis zu 16 %) und die Verschattungsstunden der TWD (bis zu 15 %) beträchtlich reduziert werden. Hiermit erfolgt eine bessere Ausnutzung der Solarstrahlung zum Wärmeeintrag (TWD) wie auch zur Tageslichtnutzung (Fenster).
- die Einsparung an fossiler Zusatzenergie bis zu 2,8 % reduziert werden. Der Kollektorertrag wurde gleichzeitig um 2,4 % verbessert. Damit erhöhte sich der solare Deckungsanteil durch den Kollektor um 3,4 % (relativ).

Die Einsparungen an fossiler Energie weisen nicht die gewünschten Erwartungen auf, die zum Teil in anderen Arbeiten berechnet wurden (siehe Kap. 1.2). Es stellt sich heraus, dass gerade Gebäude in leichter Bauweise durch mangelnde Wärmekapazität den Solarertrag nicht speichern können. Die Momente in denen Heizbedarf besteht, unterscheiden sich kaum

¹d. h. frühzeitig abgeschaltet wird, da der zukünftige Heizbedarf von der Sonne gedeckt werden kann

²vor allem im Sommer

von denen der konventionellen Regelung. Auch zeigt die realitätsnahe Abbildung der Wärmeübertragung durch Heizkörper, dass die konventionell geführte Heizung nicht zu den erwarteten Überhitzungen führt, sondern sich schnell auf Zustandsänderungen einstellt und es somit kaum zu ungewolltem Energieeintrag durch die Heizung kommt. Der prädiktiven Regelung zur Wärmeversorgung im Winter sind damit Grenzen gesetzt.

Im Sommer dagegen ist das Potential der Prädiktion größer. Durch die Vorhersage der zu erwartenden Einstrahlung können Überhitzungen präziser vermieden werden. Obwohl die Verschattungselemente sowie die Nachtlüftung deutlich weniger oft zum Einsatz kommen, wird das Raumklima innerhalb des geforderten Behaglichkeitsfeldes gehalten.

Mit der zusätzlich eingeführten, erweiterten Heizkreisregelung für solaroptimierte Wohngebäude konnten deutliche Einsparungen an Betriebsenergie erreicht werden. Die Simulationen zeigen ein Potential von 40 % auf, bei einer Felduntersuchung in einem bewohnten Wohngebäude, ergab sich bei idealer Anpassung der Regelparameter sogar eine Reduktion des elektrischen Energieverbrauchs um 60 % (vgl. Abbildung Anhang C.12).

Die validierten Modelle zum Gebäude und zur technischen Anlage innerhalb der Simulationsumgebung *ColSim* bieten der Entwicklung moderner Regelungskonzepte die notwendige und realitätsnahe Basis. Modellbasierte Regelungen erlauben durch Adaption an Nutzerverhalten oder an Änderungen der Regelstrecke weitere Systemoptimierungen.

So können im Weiteren z. B. Untersuchungen zum Einfluss der nutzerbedingten Lüftung auf prädiktive Regelungskonzepte und einer möglichen Adaption auf das Nutzerverhalten simulativ untersucht werden. Bei den Regelungsalgorithmen und der Regelungssystematik ist jedoch darauf zu achten, dass eine Realisierung möglich ist. Dies beinhaltet die Portierbarkeit auf Mikro-Controller, sowie eine Sensorik und Aktorik, die ein Preis-Leistungs-Optimum verfolgt.

Anhang A

Erläuterungen zu *ColSim*

Im Bereich der Gebäude- und Anlagensimulation ist das Programm TRNSYS [65] weit verbreitet. TRNSYS basiert auf einem modularen Aufbau der Einzelkomponenten, deren physikalisches Verhalten durch ein mathematisches Modell beschrieben werden und deren Ein- und Ausgangsgrößen in ihrer systemabhängigen Zuordnung ausgetauscht werden. Das Abbruchkriterium innerhalb eines Zeitschrittes ist die Konvergenz der Ausgangsgrößen. Dieses Verfahren ist iterativ. Ein Vorteil von TRNSYS liegt in einer umfangreichen Komponentensbibliothek und seiner internationalen Verbreitung. Zur regelungstechnischen Untersuchung von zeitkritischen Regelkreisen stößt TRNSYS, wegen möglicher Instabilitäten bei kleinen Zeitschritten, oft an seine Grenzen [79].

ColSim verwendet finite Differenzentechnik¹ und erlaubt daher eine zeitliche Auflösung der Systemdynamik im Sekundenbereich. Kleine Schrittweiten haben eine Erhöhung des numerischen Aufwandes zur Folge, die durch die ständig steigende Rechenleistung der Computer kompensiert werden kann.

Auch die anderen gängigen Simulationsprogramme für thermische Systeme verfügen meist nicht über die nötige Zeitauflösung oder bilden die Komponenten für dieses Anwendungsgebiet nur unzureichend genau ab. Die Programme wurden für energetische Jahresbilanzen² konzipiert und arbeiten deshalb mit Zeitschrittweiten typischerweise im Stundenbereich. Reale Regler haben aber im Allgemeinen wesentlich kürzere Reaktionszeiten (z.B. *PI-Regler*). Rechenzeitschritte im Bereich dieser Reaktionszeiten sind also notwendig, um überhaupt von einer wirklichkeitsnahen Abbildung des Regelungsverhaltens sprechen zu können.

Bei der in *ColSim* auf Basis der finiten Differenzentechnik verwandten “Plug-Flow”-Modellierung, wird die Lösung des Material- und Energieflusses innerhalb der Anlage nicht über einen gemeinsamen Löser erreicht, sondern das Anlagenschema wird in der Reihenfolge seiner Vernetzung von Teilobjekt zu Teilobjekt durchlaufen. Jedes Teilobjekt (Modul) wird

¹Das numerische Lösungsverfahren, sowie die erforderliche Stabilitätsbetrachtung wird näher in Kapitel A.3 betrachtet.

²Die grundlegenden Algorithmen entstanden in den frühen 70er Jahren.

in einem Zeitschritt einmalig gelöst. Es findet also keine globale Iteration statt. Pro Zeitschritt wird ein Energie- und Massenplug (“Plug-Flow”-Modell) durch die Anlage gereicht, an dessen Ende jeweils die globale Massen- und Energiebilanz überprüft wird.

A.1 Konzept

Beim Konzeptentwurf von *ColSim* hat die Einbindung von weit verbreiteten *Public Domain* Modulen im Vordergrund gestanden, um unnötigen Programmieraufwand zu vermeiden. Infolge der internationalen Kommunikationstechnik (*INTERNET*) ist es möglich und üblich geworden, wissenschaftliche Arbeiten und Software auszutauschen. Hochwertige Softwarewerkzeuge, die in nahezu allen wissenschaftlichen Bereichen benötigt werden, kann jedermann kostenfrei beziehen. Die Softwarepflege erfolgt durch die fortgeschrittenen Benutzer, die ihre Erfahrungen und Verbesserungsvorschläge direkt an die Softwareentwickler via *email* richten. Grundlage dazu ist die Freigabe der Software im *Sourcecode*. In diese Philosophie gliedert sich *ColSim* ein, d.h. es soll vornehmlich im Forschungs- und Entwicklungsbereich Verwendung finden. *ColSim* ist zunächst für das *PC*-Betriebssystem *Linux* (*PD*) freigegeben, weil in den meisten Distributionen das komplette Softwarepaket zur Verfügung steht, das in der *ColSim* Umgebung zur Anwendung kommt. Einer Portierung des Simulationsprogramms auf andere Plattformen ist möglich, da die Implementierung in der standardisierten Syntax (*ANSI-C*) der Programmiersprache *C* entstand. Ein entsprechender *Compiler* befindet sich auf nahezu jeder Plattform.

Die einzelnen Anforderungen an Simulationsprogramme sind durch die Verwendung von *Windows*-Oberflächen heutzutage wesentlich erhöht worden: eine graphische Eingabe erhöht die Transparenz von komplexen Systemen wesentlich. Wichtig ist allerdings, dass die kompakte, informative Textebene (*ASCII*) nicht verloren geht. Hierin unterscheiden sich kommerzielle und öffentliche Software oft ganz erheblich voneinander.

Um dieser Anforderung gerecht zu werden, wurde *ColSim* mit einer Schnittstelle zu dem Zeichenprogramm *XFIG* [60] ausgerüstet. Ähnlich wie das kommerzielle *TRNSYS-Tool* „*PRESIM*“ oder die blockschaltbildorientierte Oberfläche von *MatLab / Simulink* wird das System aus graphischen Bibliothekselementen zusammengestellt und vernetzt. Die Parametrierung erfolgt im kompakten *ASCII*-Modus oder direkt im Grafikobjekt. Ein wichtiges Werkzeug, um die umfangreiche Parameterverwaltung und den visuellen Überblick zu bewahren. Die Abbildung zeigt A.1 die grafische Darstellung eines Modellaufbaus für ein Wohngebäude mit einer Zone und Heizsystem. Man erkennt die modulartige Struktur der einzelnen *TYPES*, die über Linienzüge miteinander verknüpft sind.

Mit einem Konvertierungsprogramm (*fig2dek*) wird aus dem graphischen Anlagenobjekt in *ColSim* ein Simulationsskript „*sim.dek*“ extrahiert, das die Eingabedatei zur Simulation darstellt.

Die Simultan-Darstellung (*Online-Plotter*) der Simulationsergebnisse ist ein wichtiges Werkzeug für den effizienten Umgang mit Simulationen. Fehler, die durch das Erstellen von

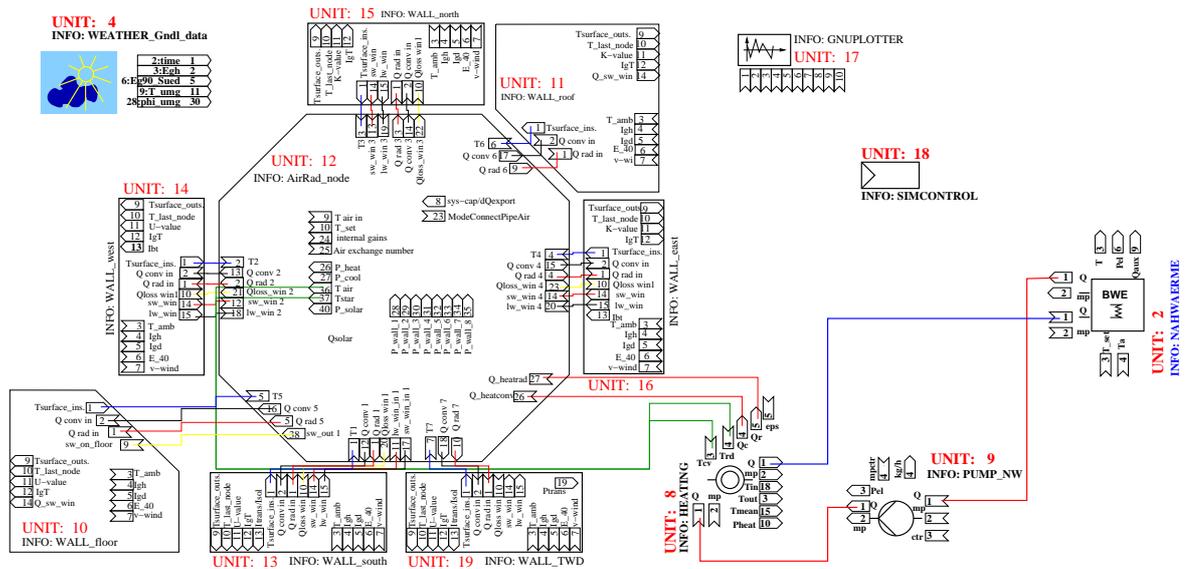


Abbildung A.1: Modular aufgebautes Simulationsmodell einer Zone mit 5 Wänden, einer Bodenplatte und Dach, sowie ein einfaches Heizsystem bestehend aus Brenner, Pumpe und Heizkörper. Weitere Elemente sind ein Online-Plotter und der Wetterdaten-Reader. Die Abbildung zeigt die Realisierung des Simulationsdeks mit Hilfe des Vektorgrafikprogramms XFIG.

Systemen entstehen, können somit interaktiv sehr schnell korrigiert werden. Die *Online-Visualisierung* des Systemzustandes wird in *ColSim* durch die Einbindung des *Public Domain* Programms *GNU PLOT* [78] realisiert, das alle notwendigen *Plot*-Funktionen zur Verfügung stellt. *GNU PLOT* wird aus *ColSim* optional als externer Prozess aufgerufen.

Die Koordination der Simulation kann in *ColSim* via Menü-Umgebung erfolgen, dazu wird ein frei verfügbares Graphik-Tool „*TCL/TK*“ verwendet. *TCL/TK* benutzt eine offene Skriptsprache und ist für *UNIX* und *MS-Windows* verfügbar. Konvertierungen des Simulationskriptes (*fig2dek*) aus dem Grafikobjekt sowie Editierfunktionen, Simulationsstart und -abbruch erfolgen mit Hilfe der Menü-Führung sehr schnell. Alle Funktionen können auch im Kommandofenster per Befehl aufgerufen werden. Eine Nutzung verteilter Rechenleistung in vernetzten Rechnersystemen stellt mit *ColSim* kein Problem dar, da die Simulation unabhängig von einer grafischen Ein- und Ausgabe erfolgen kann.

A.2 Programm-Struktur und Aufbau

Das *ColSim* Verzeichnis wurde funktionsorientiert strukturiert und bezeichnet. Im Stammverzeichnis */ColSim* liegt nach Ausführung des Installationskriptes *INSTALL* das ausführbare Simulationsprogramm ‘*sim*’.

Bei Simulationsbeginn liest das Programm das Simulationskript ‘*sim.dek*’, die Lastprofil-

datei *'load.dat'* und den Tageswetterdatensatz *'./weather/tryXX/JJMMTT.dat'*³ ein. Das Unterverzeichnis *./weather* ist untergliedert in Klimaregionen, sowie benutzerdefinierte Wetterdaten, die im Tagesdatenformat angelegt werden. Der Simulationsaufruf erfolgt ohne Argumente mit *'sim'* und bezieht sich auf das Simulationsskript *'sim.dek'*. Zur Vor- und Nachbereitung der Simulationsberechnung leisten einige nützliche Shell-Skripten und *awk*-Programme⁴ im Unterverzeichnis *./etc* wertvolle Dienste. Für die Simulationsberechnung selbst sind sie nicht erforderlich. Das Unterverzeichnis *./src* enthält den Quelltext der Modelle und das Hauptprogramm.

ColSim ist modular aufgebaut und lässt sich daher beliebig erweitern. Hinter jeder Komponente (*TYPE*) verbirgt sich eine C-Routine, die das Modellverhalten abbildet. Dieses Modell kann durch symbolische Verknüpfungen ausgetauscht werden. So kann beispielsweise bei Bedarf das *2x4*-Knotenmodell des Kollektors gegen ein *1x2*-Knotenmodell ausgetauscht werden. Ein *TYPE* kann als Objekt mehrmals im Simulationsskript *sim.dek*⁵ verwendet werden, jedem *TYPE* wird dafür eine *UNIT*-Bezeichnung zugeordnet. Das Modell wird durch Parameter charakterisiert und über *INPUT* bzw. *OUTPUT*-Vektoren mit der Systemumgebung verknüpft. In der grafischen Oberfläche *XFIG* werden den Vektoren Verknüpfungsboxen zugewiesen, die sich grafisch mit Linienzügen verdrahten lassen. Die grafische Abbildung der *UNIT* kann beliebig um neue *INPUT* und *OUTPUT*-Boxen erweitert werden, indem der Verbund des graphischen Objektes gelöst wird (Compound open). Eine vergleichbare Box wird nun dupliziert⁶ und eine neue Kanalbezeichnung wird zugeordnet, um eine eindeutige Zuweisung zu gewährleisten. Die Gliederungstechnik in *XFIG* unterstützt die Definition und Variationsmöglichkeiten für die Anlagenkomponenten sehr gut. Dabei lassen sich komplette Anlagenteile in andere Simulationsschemata kopieren (cut & paste).

A.3 Numerisches Lösungsverfahren

In diesem Teil des Anhangs wird auf das numerische Lösungsverfahren der Simulationsumgebung *ColSim* hingewiesen. WITTWER geht in seiner Dissertation [79] näher auf die angewandten Verfahren ein.

³XX: 0...99, Nummerierung des Datensatzes / JJ: Jahr / MM: Monat / TT: Tag

⁴gawk - pattern scanning and processing language; die *awk*-Skriptsprache ist ein UNIX-Tool zur zeilenweisen Interpretation von Datensätzen. So kann beispielsweise sehr schnell eine Summation von Tagesenergien für die Jahresbilanz erfolgen.

⁵Dieses Simulationsskript wurde in Anlehnung an das Simulationsprogramm TRNSYS syntaxkompatibel angelegt. *ColSim* ist gewissermaßen ein Derivat von TRNSYS.

⁶Die *INPUT* Box unterscheidet sich von der *OUTPUT* Box nur durch den Polygonlinienzug, der hier hineinragt. Eine Prozedur in *fig2dek* sorgt für die Identifikation der Box.

Diskretisierungsverfahren

Thermische Systeme lassen sich mittels finiter Differenzentechnik bezüglich ihrer Dynamik gut beschreiben. Anstelle der kontinuierlichen Lösung einer partiellen Differentialgleichung erhält man eine diskrete Zustandsbeschreibung im Punkt i zum Zeitpunkt t_n . Durch das Diskretisierungsverfahren erhält man n RC-Glieder⁷, die ein gewöhnliches Differentialgleichungssystem n -ter Ordnung bilden. Dieses lässt sich in ein Zustandsgleichungssystem 1. Ordnung mit n Gleichungen umformen, welches mit Hilfe der numerischen Integration gelöst werden kann[79]. Die Approximation von örtlich partiellen Differentialgleichungssystemen durch ein Differenzgleichungssystem bezeichnet man als finite Differenzentechnik.

Die Vorteile der finiten Differenzentechnik liegen unter anderem darin, dass bei nichtlinearen Problemen eine Berechnung des Systemverhaltens möglich ist. So kann beispielsweise ein Term, der einen nichtlinearen Wärmestrom beschreibt (Solarstrahlung), in einzelne Knotenpunktgleichungen eingehen (diese Methode wird bei der Modellierung der TWD angewandt). Es kann aber auch ein Knotenpunkt mit nichtkonstanter spezifischer Wärmekapazität modelliert werden (wie bei der Modellierung der Phasenwechselmaterialien im Wandverbund). Das beschreibende Differentialgleichungssystem wird dadurch nichtlinear und zeitvariant.

Teilsysteme können mit stark unterschiedlichen Zeitkonstanten ($\tau = RC$) abgebildet werden. Dies ist gerade bei der Betrachtung komplexer Gebäude und Anlagen gepaart mit Regelungssystemen ein weiterer Vorteil. Die Schrittweite für die numerische Berechnung richtet sich dann immer nach der kleinsten Zeitkonstante im System.

Tangentenverfahren nach Euler

Das Euler-Verfahren (auch Polygonzugverfahren) von 1768 gilt als das älteste und einfachste explizite⁸ Einschrittverfahren⁹ zur approximativen Lösung von Differentialgleichungen der Form $y' = f(t, y(t))$. Bedingung ist der bekannte Anfangszustand $y(t_0) = y_0$, dann kann die Lösung eindeutig bestimmt werden. Dieses Verfahren funktioniert bei kleiner Schrittweite h (bezüglich τ) und geringer Krümmung der Lösungskurve.

Die Idee des Verfahrens ist es, dass die lokal unbekannte Lösung durch die bekannte Tangente am Punkt $(t_0, f(t_0, y(t_0)))$ ersetzt wird. Die Zeitachse wird in äquidistante Zeitschritte h zerlegt. Mit der Schrittweite h folgt für $t_1 = t_0 + h$. Durch fortlaufende Approximation (Tangentenverlängerung) nähern sich die äquidistanten Stützstellen:

$$t_n = t_0 + n h$$

⁷siehe dazu Modellbildung durch das thermische Ersatzschaltbild im Anhang A.4

⁸Bei den expliziten Formeln wird der $(n + k)$ -te Wert direkt aus den k vorhergehenden Werten $(y_{n+k-1}, y_{n+k-2}, \dots, y_n)$ bestimmt.

⁹Man unterscheidet bei Lösungsverfahren für Differentialgleichungen nach Einschritt- und Mehrschrittverfahren. Das Einschrittverfahren verwendet zur Berechnung des Folgekpunktes nur den letzten zurückliegenden Wert, das Mehrschrittverfahren bestimmt den Folgewert aus den n letzten Werten. Dies ist unter Umständen genauer, erfordert aber einen aufwendigeren Algorithmus, und damit mehr Rechenleistung.

$$y_n = y_{n-1} + h f(t_{n-1}, y_{n-1})$$

¹⁰sukzessive der Funktion $y(t)$. Der Folgewert y_{n+1} ergibt sich somit aus dem aktuellen Zustand y_n :

$$y_{n+1} = y_n + h f(t_n, y_n)$$

Die Integrationsmethode nach Euler benutzt in den einzelnen Näherungspunkten (t_n, y_n) die Steigung des durch Differentialgleichung definierten Feldes, um den Folgewert zu bestimmen. In Abbildung A.2 wird auch deutlich, dass dieses Verfahren nur für kleine Schrittweiten gute Näherungswerte liefern kann.

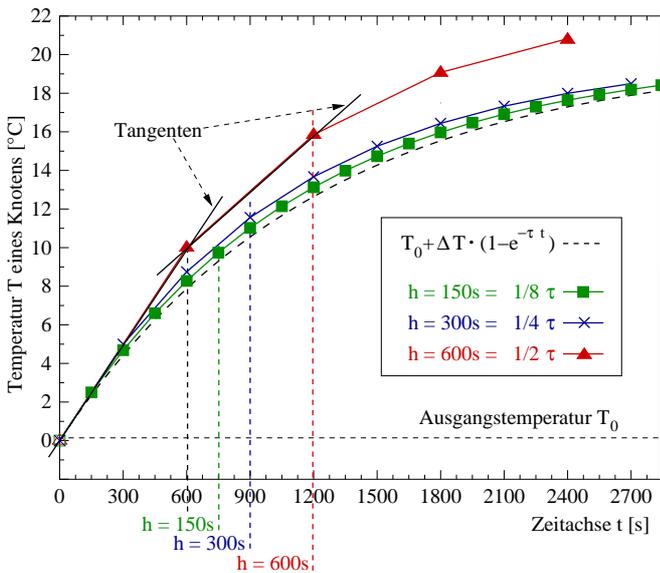


Abbildung A.2: Tangentenverfahren nach Euler (Polygonzugverfahren). Die Zeitachse wird in aquidistante Intervalle unterteilt, so dass an diesen Stützpunkten über die Tangenten (bekannter Differentialquotient) die Folgepunkte bestimmt werden können. Für hinreichend kleine Zeitschrittweiten $h \ll \tau$ folgt die ermittelte Näherung dem Verlauf der Exponentialfunktion.

Stabilitätskriterium

Ein explizites numerisches Integrationsverfahren liefert nicht für beliebige Schrittweiten h sinnvolle Lösungen, die zur Stabilität führen würde. Das Euler-Verfahren neigt bei zu großen Schrittweiten¹¹ ebenfalls zur Instabilität. Man muss daher bei der Berechnung die im System vorkommende kleinste Zeitkonstante τ und die Schrittweite h in Relation setzen, um stabiles Verhalten zu gewährleisten.

Nach [59] muss die Schrittweite für das Euler-Verfahren im Intervall $0 < h < 2\tau$ liegen um absolute Stabilität zu gewährleisten. In [79, 8] wird an Beispielen das Stabilitätsproblem betrachtet.

ColSim führt bei Modellen mit kritischen Zeitkonstanten ggf. eine Stabilisierung durch. Ergibt sich infolge der Integration eine Temperatur, die außerhalb des zulässigen Temperaturbereiches¹² liegt, wird die Temperatur auf die zulässige Temperatur begrenzt. Dieser Eingriff

¹⁰Die Näherung ergibt sich durch Abbruch der Taylorreihe nach dem ersten Glied.

¹¹in Relation zur Zeitkonstante τ

¹²Hierzu werden die Maximal- und Minimaltemperaturwerte des betreffenden Knotens (k) und seiner beiden Nachbarknoten ($k - 1$; $k + 1$) bestimmt.

verhindert Instabilität, nicht aber ungenaue Ergebnisse bei zu grober Zeitauflösung.

A.4 Modellbildung durch das thermisches Ersatzschaltbild

Bei der Modellbildung in *ColSim* bedient man sich der Analogie zwischen elektrischen und thermischen Systemen. Es gibt drei wichtige Elementarelemente linearer Systeme, die man auch als Bauelemente bezeichnet:

- Widerstand (thermisch $R_{therm} = T/\dot{Q}$, elektrisch $R_{elektr} = U/I$)
- Kapazität (thermisch $C_{therm} = Q_{therm}/T$, elektrisch $C_{elektr} = Q_{elektr}/U$)
- Induktivität (elektrisch, kein thermisches Äquivalent)

Die Analogie erlaubt die Übertragung der Begrifflichkeiten und Abhängigkeiten von der elektrischen auf die thermische Anwendung. Die Tabelle A.1 stellt die für eine allgemeine Netzwerkanalyse nötigen Variablen und Elemente vergleichend zwischen elektrischen und thermischen System dar. Durch die Kombination der Bauelemente wird der Funktio-

System	Strom f	Spannung e	Widerstand R	Kapazität C	Induktivität L
elektrisch	el. Strom $[f] = [I] = A$	el. Spannung: $[e] = [U] = V$	Widerstand: $[R] = \Omega = \frac{V}{A}$	Kondensator: $[C] = F = \frac{As}{V}$	Spule: $[L] = H = \frac{Vs}{A}$
thermisch	Wärmestrom $[f] = [\dot{Q}]$ $= \frac{Nm}{s} = W$	Temperatur $[e] = [T] = K$	Wärme- widerstand $[R] = \frac{K}{W}$	Wärme- kapazität $[C] = \frac{Ws}{K}$	—

Tabelle A.1: Elementariübertragungsglieder aus elektrischen und thermischen Systemen.

nalzusammenhang der einzelnen Übertragungsglieder hergestellt. Das Ersatzschaltbild oder auch Netzwerkgraph repräsentiert den Zusammenhang in graphischer Form (siehe Abbildung A.3).

Mit Hilfe der zwei Kirchhoff'schen Regeln lässt sich der Funktionalzusammenhang des Netzwerkes mathematisch beschreiben.

- **Maschenregel:** elektrisch: $\sum U = 0$, bzw. thermisch: $\sum T = 0$
Nach dem Energieerhaltungssatz muss beim Transport einer elektrischen Ladung in einem geschlossenen Stromkreis (Masche) die zugeführte und die abgegebene elektrische Arbeit gleich groß sein. Als Maß dafür gilt, dass die Summe aller treibenden Spannungen gleich der Summe aller Spannungsabfälle ist [29]. Im Thermischen bedeutet dies, dass sich im geschlossenen Wärmestromkreis die Temperaturdifferenzen über den Bauelementen kompensieren.
- **Knotenpunktregel:** elektrisch: $\sum I = 0$, bzw. thermisch: $\sum \dot{Q} = 0$
Nach dem Gesetz der Ladungserhaltung müssen alle einem Knoten zugeführten Ladungen gleich der abfließenden Ladungen sein. Entsprechendes gilt im Thermischen für Zweigwärmeströme auf einen Temperaturknotenpunkt.

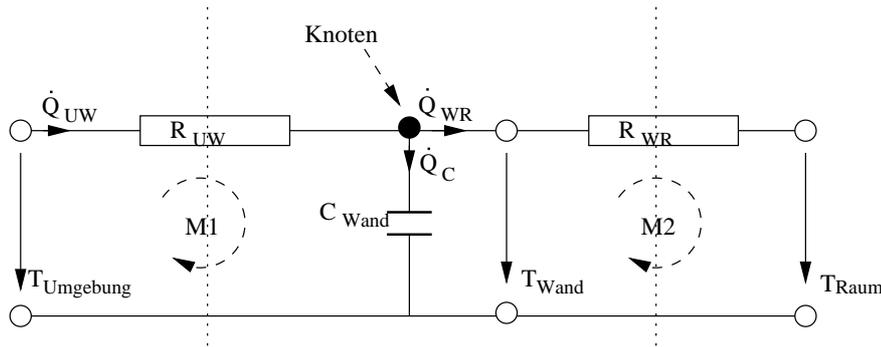


Abbildung A.3: Einfaches thermisches Ersatzschaltbild des Wandmodells (RC-Netzwerk) mit Bauelementen, die in Analogie zum elektrischen Ersatzschaltbild verwendet werden. Zur Aufstellung der Systemgleichungen wendet man die Kirchhoff'schen Regeln für die Knoten und Maschen des Netzwerkes an.

Durch die Analogie zu elektrischen Netzwerken kann aus dem Ersatzschaltbild, durch Anwendung der Kirchhoff'schen Regeln, direkt das Gleichungssystem aufgestellt werden. Es ist zweckmäßig, die sogenannten komplexen Impedanzen des RC-Netzwerkes anzuwenden, um von der Proportionalbeziehung des Ohm'schen Gesetzes Gebrauch machen zu können. Durch Einführung des Laplaceoperators und der damit verbundenen Transformation des Zeitbereiches in den komplexen Laplacebereich (Frequenzbereich)¹³ kann die Differentiation einer Übertragungsfunktion im Zeitbereich in eine einfache Multiplikation im Frequenzbereich dargestellt werden:

$$i(t) = C \cdot \frac{dU(t)}{dt} \longleftrightarrow i(s) = sCU(s) \quad (\text{A.1})$$

Im Beispiel aus Abbildung A.3 kann man mit Gleichung A.1 den Wärmestrom des kapazitiven Zweigs $\dot{Q}_c = sC_{Wand}T_{Wand}$ ermitteln. Die Anwendung der Maschengleichungen erlaubt die Bestimmung des kapazitiven Wärmestroms \dot{Q}_C :

$$M1 : T_{Umgebung} = T_{R_{UW}} + T_{Wand} \quad (\text{A.2})$$

$$M2 : T_{Wand} = T_{R_{WR}} + T_{Raum} \quad (\text{A.3})$$

mit

$$T_{Wand} = \frac{\dot{Q}_C}{sC_{Wand}} \quad (\text{A.4})$$

Mit der Knotenpunktregel wird eine Bilanzierung der Zweigwärmeströme herbeigeführt:

$$K1 : \dot{Q}_{R_{UW}} = \dot{Q}_{R_{WR}} + \dot{Q}_C \quad (\text{A.5})$$

¹³Konvergiert das Laplace-Integral für bestimmte Bereiche von $s = \alpha + j\omega$, so wird $F(s) = L\{f(t)\} = \int_0^\infty f(t)e^{-st} dt$ als die Laplace-Transformierte von $f(t)$ bezeichnet.

Aus der Masche $M1$ und $M2$ gehen die Temperaturen über den thermischen Widerständen hervor: $T_{RUW} = T_{Umgebung} - T_{Wand}$ und $T_{RWR} = T_{Wand} - T_{Raum}$. So folgt durch Umformung und Einsetzen der Gleichungen A.2, A.3 und A.4 in Gleichung A.5 folgende Beziehung:

$$\frac{T_{Umgebung} - T_{Wand}}{R_{UW}} = sC_{Wand}T_{Wand} + \frac{T_{Wand} - T_{Raum}}{R_{WR}} \quad (A.6)$$

Durch Umstellung folgt:

$$sT_{Wand} = T_{Wand}\left(\frac{-1}{C_{Wand}R_{UW}} + \frac{-1}{C_{Wand}R_{WR}}\right) + T_{Umgebung}\left(\frac{1}{C_{Wand}R_{UW}}\right) + T_{Raum}\left(\frac{1}{C_{Wand}R_{WR}}\right) \quad (A.7)$$

Die Gleichung A.7 stellt die Zustandsgleichung im *Laplace-Bereich* dar, durch die Rücktransformation gelangt man zur bekannten Zeitbereichsform:

$$\dot{T}_{Wand} = T_{Wand}\left(\frac{-1}{C_{Wand}R_{UW}} + \frac{-1}{C_{Wand}R_{WR}}\right) + T_{Umgebung}\left(\frac{1}{C_{Wand}R_{UW}}\right) + T_{Raum}\left(\frac{1}{C_{Wand}R_{WR}}\right) \quad (A.8)$$

Werden T_{Raum} und $T_{Umgebung}$ als Eingangsvektor $u = \begin{pmatrix} T_{Umgebung} \\ T_{Raum} \end{pmatrix}$, T_{Wand} als Zustandsgröße mit dem eindimensionalen Vektor x und gleichzeitig auch als interessierende Ausgangsgröße mit dem Ausgangsvektor y betrachtet, so beschreibt sich das System mit der Zustandsgleichung:

$$\dot{x} = Ax + Bu; \quad y = C \cdot x \quad (A.9)$$

wobei A, B Matrizen aus der Gleichung A.8 darstellen und $C = 1$ ist.

Anhang B

Die BESTEST-Vergleichsmethode

In dem Projekt BESTEST wurde eine Methode entwickelt, um thermische Gebäudesimulationsprogramme vergleichend systematisch zu testen und die Ursachen für unterschiedliche Simulationsergebnisse ausfindig zu machen. Die Methode wurde an den folgenden acht sogenannten Referenzprogrammen durchgeführt. In Klammern sind die in Diagrammen und Tabellen verwendeten Abkürzungen angegeben.

- BLAST-3.0 level 193 v. 1 (BLAST)
- DOE2.1D 14 (DOE2)
- ESP-RV8 (ESP)
- SERIRES/SUNCODE 5.7 (SRES/SUN)
- SERIRES 1.2 (SERIRES)
- S3PAS
- TASE
- TRNSYS 13.1 (TRNSYS)

Die Auswahl der Referenzprogramme erfolgte durch die Länder, die am IEA TASK 12 (Solar Heating & Cooling) beteiligt waren. Die Kriterien für die Wahl eines Referenzprogramms sind:

- Stand der Technik
- freier Zugang zum Programm
- dynamische Simulationsrechnungen auf Basis von stündlichen Wetterdaten und einer Schrittweite ≤ 1 h

Die BESTEST-Methode wurde innerhalb von zwei Jahren an den Referenzprogrammen weiterentwickelt. Der Prozess war iterativ in dem Sinne, dass die Ausführungen der Simulationen zu einer Verfeinerung des BESTESTs führten, und die Ergebnisse des BESTESTs wiederum genutzt wurden, die Simulationsprogramme selbst zu verbessern, Fehler zu erkennen und zu korrigieren. BESTEST wurde 1995 abgeschlossen.

Die Ergebnisse der acht Referenzprogramme, wie jährlicher Heiz- und Kühl- Energiebedarf, Maximal- und Minimaltemperaturen, maximale Heiz- und Kühllast sind im BESTEST-Report [63] tabellarisch in Diagrammen und auf Diskette dokumentiert. Für die Simulationsrechnungen ist eigens ein Jahreswetterdatensatz zusammengestellt worden. Der Datensatz enthält Tage mit extremen Verläufen. Es wird mit einem klaren und kalten Winter (bis -24 °C am 4. Januar) und heißen trockenen Sommer (bis $+34\text{ °C}$ am 4. Juli) gerechnet. Die Daten stehen als Stundendatensatz zur Verfügung und enthält folgende Werte:

- Außenlufttemperatur T_{amb} [°C]
- relative Luftfeuchte Φ [%]
- Windgeschwindigkeit V_{wind} [m/s]
- globale Einstrahlung: I_{gh} [W/m^2]
- horizontale Diffusstrahlung: I_{dh} [W/m^2]
- horizontale Direktstrahlung: I_{bh} [W/m^2]
- nachgeführte Direktstrahlung: I_{bn} [W/m^2]
- Zenitwinkel (zwischen Sonne und Vertikale): Θ_z [°]

Neue Gebäudesimulationsprogramme und -versionen können anhand dieser Daten und der BESTEST-Methode durch Vergleiche der Ergebnisse mit den Referenzprogrammen überprüft werden.

B.1 Das Testverfahren

Die Testprozedur beginnt mit einer Serie von genau beschriebenen Qualifikationstests. Modellgrundlage ist ein geometrisch einfaches, kubisches Gebäude ($L \times B \times H$: $8 \times 6 \times 2,7$ m) mit einer Nord-Südausrichtung. Variiert werden Gebäudetyp (Leichtbau/Massivbau), Position der Fenster, Verschattungen, Luftwechsel, Kopplung an das Erdreich und Kontrollstrategien. Die Unterscheidung nach Leichtbauweise und Massivbau ist in den Tabellen B.1 und B.2 aufgelistet.

Im Rahmen der Arbeiten ist ColSim anhand von zehn Fällen getestet worden: Die Beheizung und Kühlung des Gebäudes erfolgt ideal konvektiv, d. h. trägheitslos, ohne Regelabweichung und ohne Strahlungsanteil. In den mit "-FF" (engl.: free-float) gekennzeichneten Fällen wird weder geheizt noch gekühlt, so dass sich die Temperatur frei einschwingen kann.

Aufbau Wände	λ in $\frac{W}{m K}$	s in m	k in $\frac{W}{m^2 K}$	ρ in $\frac{kg}{m^3}$	c_p in $\frac{J}{kg K}$
Gipsbauplatte	0,16	0,012	13,333	950	840
Mineralfaser	0,04	0,066	0,606	12	840
Holzverschalung	0,14	0,009	15,556	530	900
gesamter k-Wert			0,559		
Aufbau Boden					
Holzboden	0,14	0,025	5,600	650	1200
Dämmung	0,04	1,003	0,040		
gesamter k-Wert			0,040		
Aufbau Dach					
Gipsbauplatte	0,160	0,010	16,00	950	840
Mineralfaser	0,040	0,1118	0,358	12	840
Dachdeckung	0,140	0,019	7,368	530	900
gesamter k-Wert			0,334		

Tabelle B.1: Wandaufbauten des leichten Gebäudes (von innen nach außen)

Aufbau Wände	λ in $\frac{W}{m K}$	s in m	k in $\frac{W}{m^2 K}$	ρ in $\frac{kg}{m^3}$	c_p in $\frac{J}{kg K}$
Beton	0,510	0,100	5,100	1400	1000
Polystyrol	0,040	0,0615	0,615	10	1400
Holzverschalung	0,140	0,009	15,556	530	900
gesamter k-Wert			0,556		
Aufbau Boden					
Betonplatte	1,130	0,080	14,125	1400	1000
Dämmung	0,040	1,007	0,040		
gesamter k-Wert			0,040		
Aufbau Dach					
Gipsbauplatte	0,160	0,010	16,000	950	840
Mineralfaser	0,040	0,1118	0,358	12	840
Dachdeckung	0,140	0,019	7,368	530	900
gesamter k-Wert			0,334		

Tabelle B.2: Wandaufbauten des schweren Gebäudes (von innen nach außen)

B.2 ColSim Ergebnisse im BESTEST-Vergleich

Die mit dem *ColSim* Gebäudemodell im Ausgangszustand ermittelten Jahresenergieverbräuche liegen im Mittelfeld der verglichenen Programme. Die Abbildungen B.1 bis B.4 zeigen zum einen das dynamische Verhalten des Gebäudemodells aufgrund der Wetterbedingungen für ausgesuchte Tage und zum anderen in den Balkendiagrammen die Jahresbedarfswerte für Wärme und Kälte.

Die Solarstrahlung und deren Berechnung in entsprechende Orientierungen spielt eine äü-

leicht	schwer	Beschreibung
600	900	Basisfall - Geometrie: $B \times T \times H = 8 \text{ m} \times 6 \text{ m} \times 2,7 \text{ m} = 129,6 \text{ m}^3$ - Fenster nach Süden, 12 m^2 - Infiltrationsrate 0,5-facher Luftwechsel - interne Gewinne 200 W - ideale Heizung bis 20°C - ideale Kühlung ab 27°C
600 FF	900 FF	wie 600/900, jedoch ohne Heizung und Kühlung (<u>F</u> ree <u>F</u> loat)
610	910	wie 600/900, jedoch Fenster mit Überhang
620	920	wie 600/900, jedoch Fenster nach Osten und Westen, je 6 m^2
630	930	wie 620/920, jedoch Fenster mit Überhang und seitlicher Verschattung

Tabelle B.3: Gegenüberstellung der Basisfälle

berst wichtige Rolle in der modellhaften Simulation. BESTEST beinhaltet auch die Überprüfung des sogenannten Strahlungsprozessors, der die Umrechnung der aus dem Wetterdatensatz gegebenen Einstrahlungswerte (I_{gh} , I_{bh} , I_{dh}) auf beliebig orientierte Flächen berechnet. Die Abbildungen B.5 und B.6 zeigen die *ColSim*-Ergebnisse zur Strahlungsumrechnung.

In allen Vergleichsbeispielen bewegt sich ColSim in dem aufgespannten Ergebnisband der Referenzprogramme.

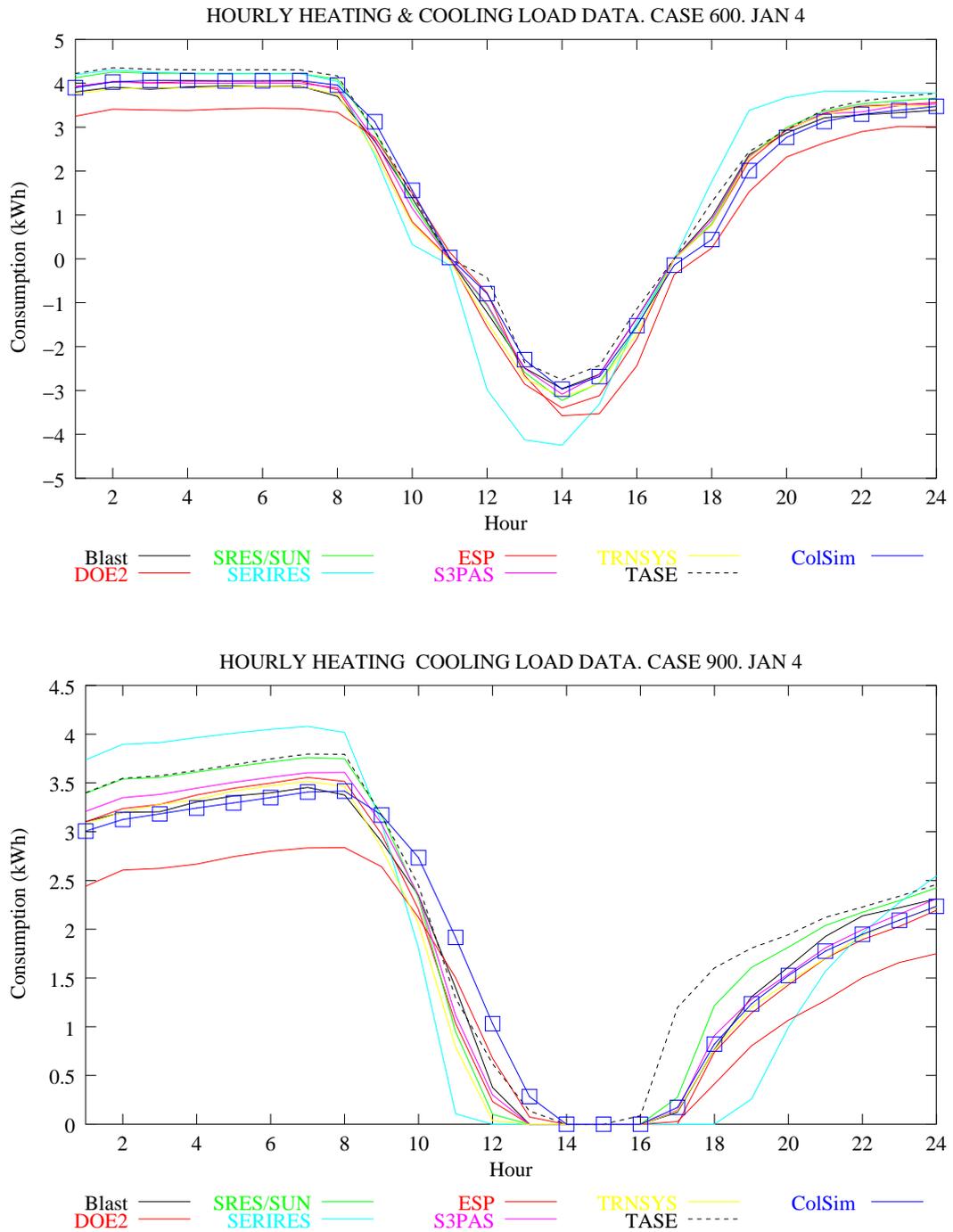


Abbildung B.1: Tagesgang der Heizlast, oben: leichtes Gebäude, unten: schweres Gebäude

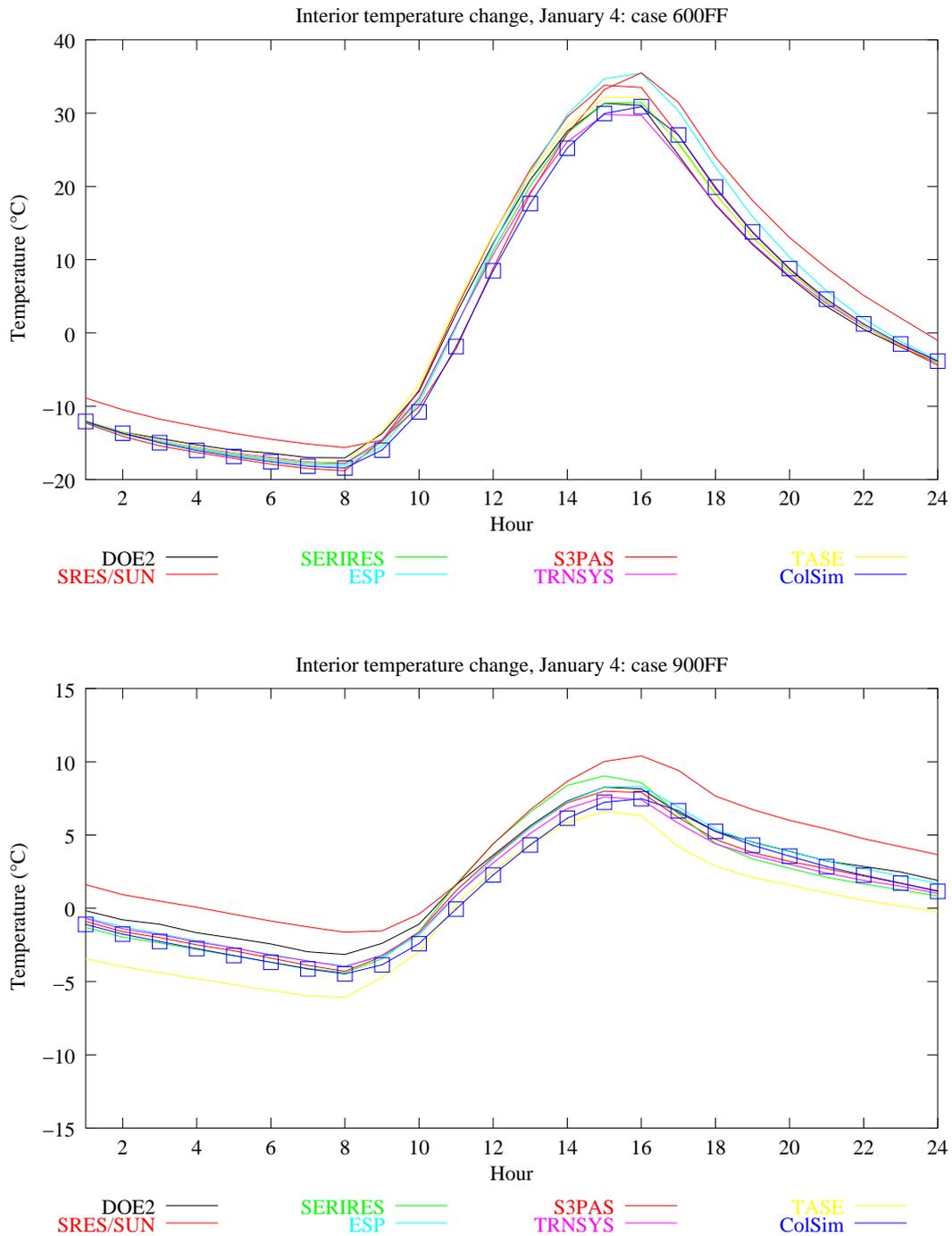


Abbildung B.2: Tagesgang der Raumtemperatur ohne Heizung und Kühlung, oben: leichtes Gebäude, unten: schweres Gebäude

CASE	ESP	BLAST	DOE2	SRES/SUN	SERIRES	S3PAS	TRNSYS	TASE	ColSim
600	4,296	4,773	5,709	5,226	5,596	4,882	4,872	5,362	4,843
610	4,355	4,806	5,786	5,280	5,620	4,971	4,970	5,383	4,851
620	4,613	5,049	5,944	5,554	5,734	5,564	5,073	5,728	5,079
630	5,050	5,359	6,469	5,883	6,001	6,095	5,624	7,018	5,725
-									
900	1,170	1,610	1,872	1,897	1,988	1,730	1,655	2,041	1,672
910	1,575	1,862	2,254	2,174	2,282	2,063	2,097	2,220	1,844
920	3,313	3,752	4,255	4,093	4,058	4,235	3,776	4,300	3,754
930	4,143	4,347	5,335	4,755	4,728	5,168	4,740	6,306	4,796

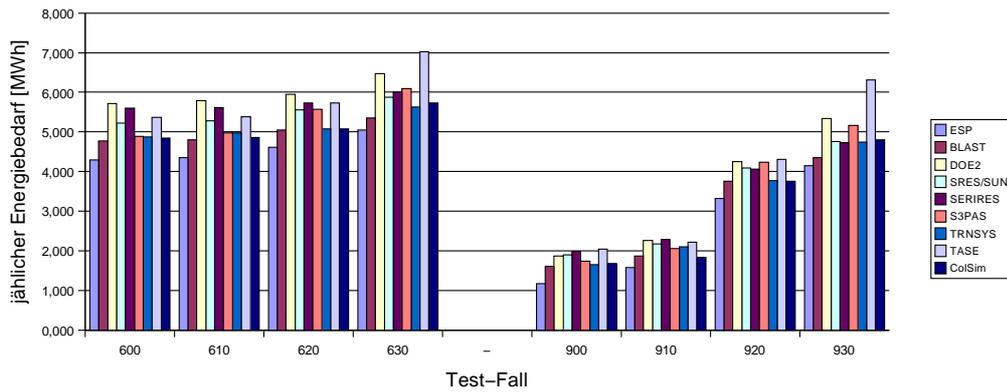


Abbildung B.3: Jahresheizwarmbedarf im Vergleich mit den BESTEST Referenzprogrammen

CASE	ESP	BLAST	DOE2	SRES/SUN	SERIRES	S3PAS	TRNSYS	TASE	ColSim
600	6,137	6,433	7,079	7,278	7,964	6,492	6,492	6,778	6,134
610	3,915	4,851	4,852	5,448	5,778	4,764	4,601	5,506	4,931
620	3,417	4,092	4,334	4,633	5,004	4,011	3,901	4,351	3,895
630	2,129	3,108	2,489	3,493	3,701	2,489	2,416	1,721	1,500
-									
900	2,132	2,600	2,455	3,165	3,415	2,572	2,485	2,599	2,138
910	0,821	1,533	0,976	1,872	1,854	1,428	1,326	1,767	1,388
920	1,840	2,616	2,440	2,943	3,092	2,457	2,418	2,613	2,342
930	1,039	1,934	1,266	2,173	2,238	1,439	1,416	0,894	0,634

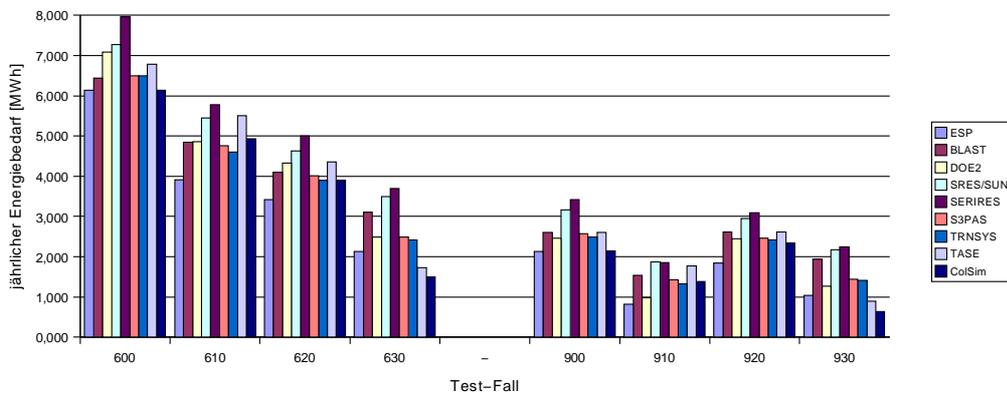


Abbildung B.4: Jahreskaltebedarf im Vergleich mit den BESTEST Referenzprogrammen

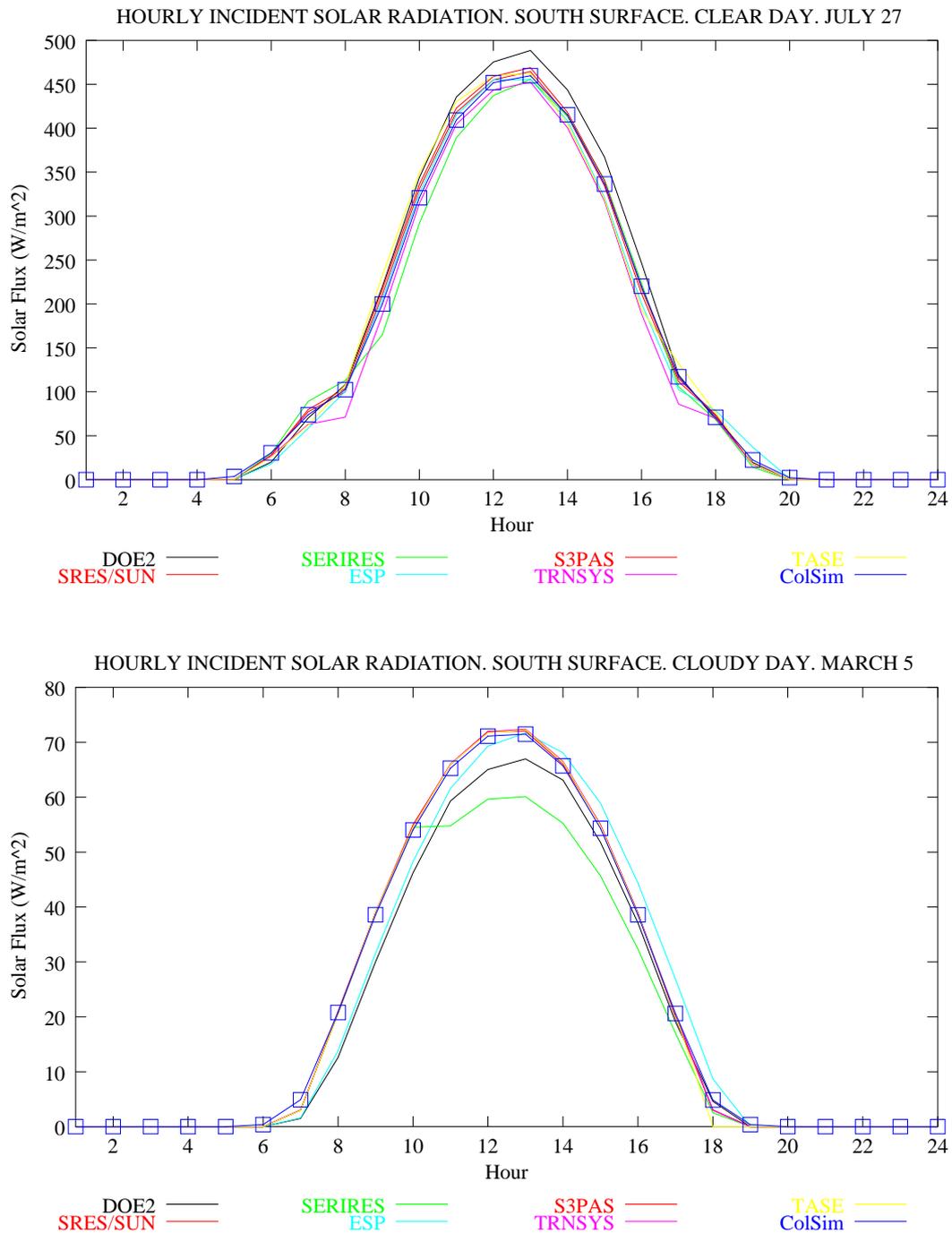


Abbildung B.5: Tagesgang der Einstrahlung auf die Südwand, oben: klarer Tag, unten: dunstiger Tag

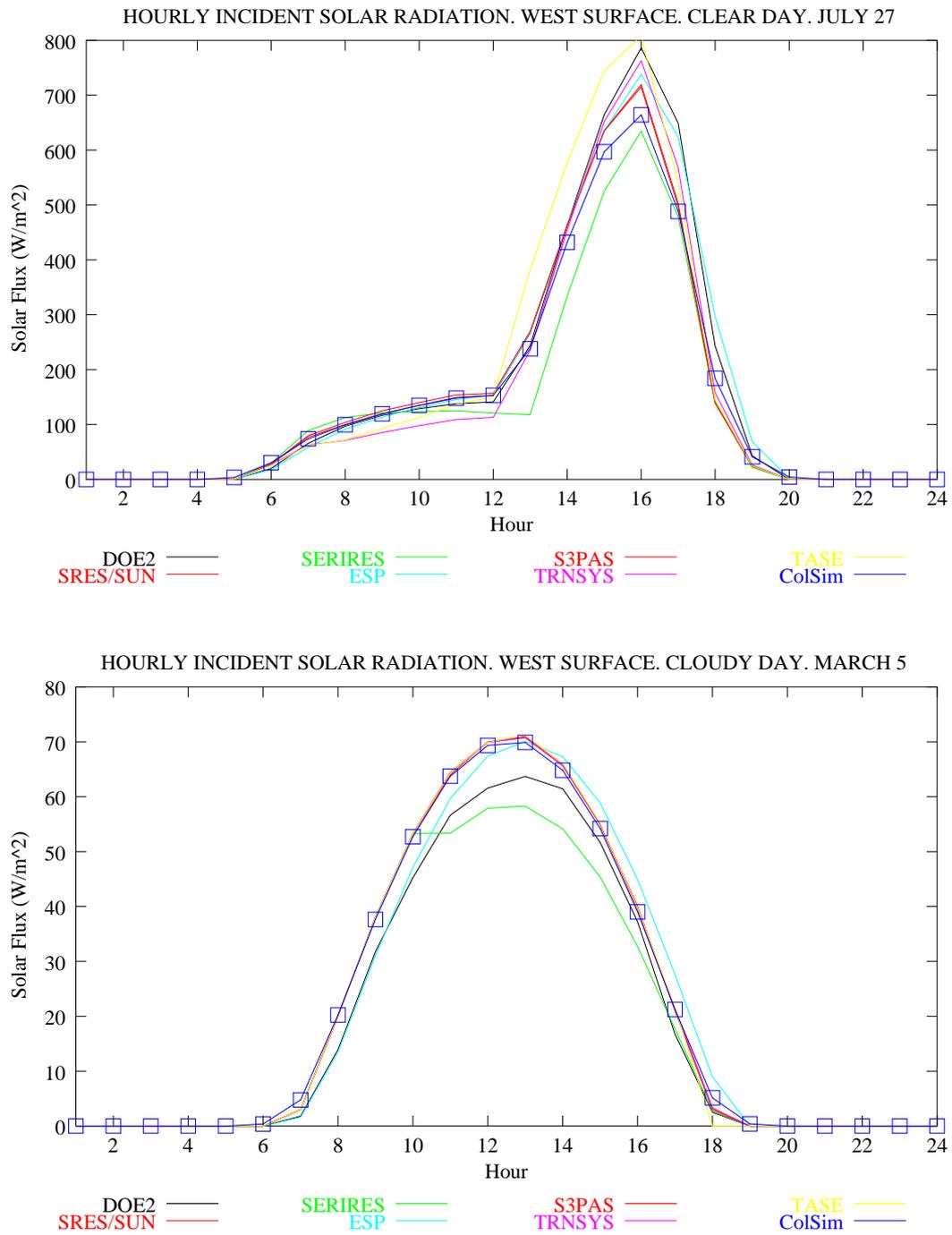


Abbildung B.6: Tagesgang der Einstrahlung auf die Westwand, oben: klarer Tag, unten: dunstiger Tag

Anhang C

Solarhaus Gundelfingen



Beim “Solarhaus Gundelfingen” handelt es sich um ein 4-geschossiges Mehrfamilienhaus mit insgesamt 13 Wohneinheiten. Dieses Objekt ist ein durch das Bundesforschungsministerium gefördertes Forschungsprojekt, welches 1998 als Niedrigenergiehaus realisiert worden ist.

Ziel des Projekts war, durch Einsatz passiver Solarsysteme wie der transparenten Wärmedämmung und effizienter Verglasungssysteme den Nutzwärmebedarf für Raumwärme unter $30 \text{ kWh/m}^2\text{a}$ zu senken. Das Gebäude verfügt über eine komplexe Heizungs- und Brauchwasseranlage, die drei Wärmeerzeuger umfasst: eine Kollektoranlage, eine Abluftwärmepumpe und eine Nahwärmenetzanbindung an ein lokales Blockheizkraftwerk. Abb. C.1 zeigt das Anlagenschema der Solaranlage in Gundelfingen.

Der thermische Zustand des Gebäudes und der Anlage wurde über ein aufwendiges Monitoringprogramm stetig erfasst. Es wurden sämtliche Wärmemengen und Temperaturen in den Fluidkreisläufen erfasst. Es existiert eine Wetterstation auf dem Dach und in allen Wohnungen sind Temperatursensoren angebracht. Insgesamt wurden über 120 Messwerte ausgelesen. Das maximale Messintervall lag bei ca. 20 Sekunden, zur Datenbegrenzung wurde ein Mittelwert von 2 Minuten gespeichert. Der auf LINUX basierte Messrechner konnte via ISDN_Router vernetzt werden. Die Vernetzbarkeit des Messrechners erhöhte die Beobachtbarkeit der Messung erheblich und erlaubte eine Fernwartung. Dank dieser Möglichkeit konnten die im Weiteren beschriebenen Feldversuche an dem bewohnten Objekt mit der geforderten Versorgungssicherheit überhaupt erst durchgeführt werden. Die Messdaten des bewohnten Gebäudes über mehrere Jahre wurde ausgewertet. Ziel der umfangreichen

Solaranlage Gundelfingen

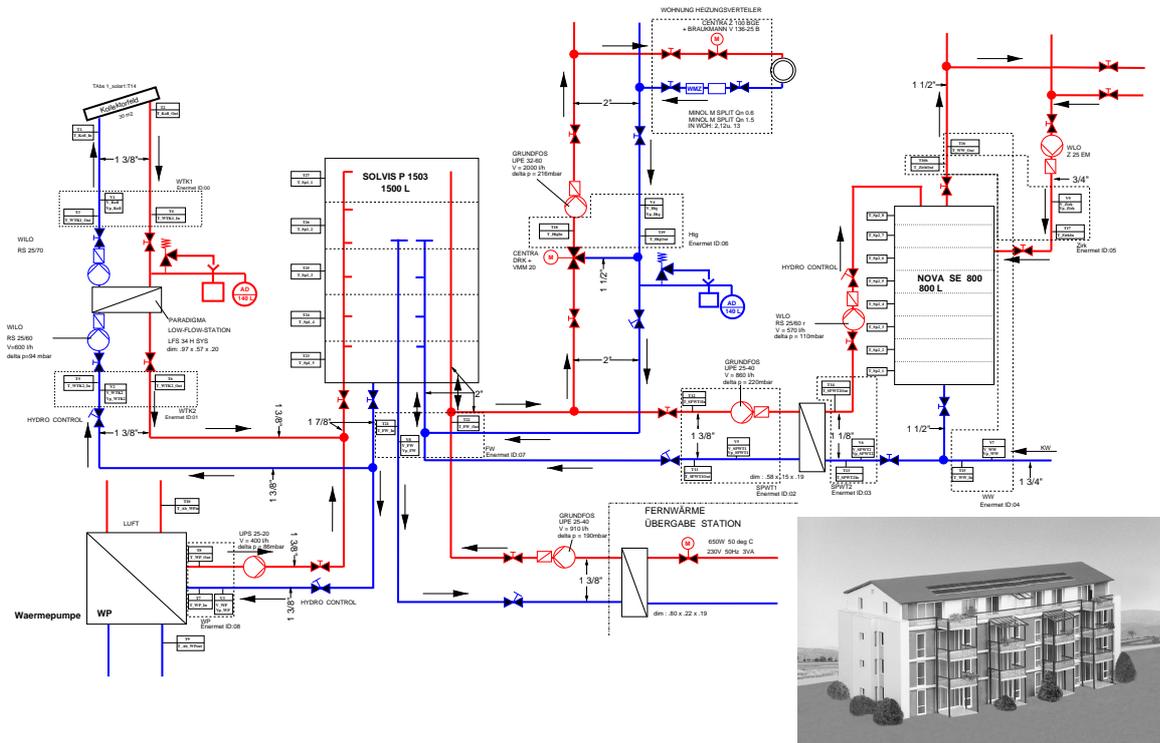


Abbildung C.1: Anlagenschema der solarunterstützten Heizanlage des Mehrfamilienhauses in Gundelfingen. Das kleine Bild zeigt ein Modell des Hauses mit Blick auf die Südseite und den eingesetzten TWD-Elementen.

Messdatenauswertung und der damit gesammelten Erfahrungen war es, die Kombination Anlage und Regelung zu analysieren und zu optimieren.

C.1 Wärmestromanalyse zum Gebäude

Das Haus zeichnet sich durch eine 70 m^2 große TWD-Fläche an der Südseite und eine ca. 150 m^2 große Verglasung aus. Die Transmissionsverluste sind wegen des hohen Dämmstandards sehr gering (ca. 1000 m^2 Wohnfläche, $k * A_{ges} \approx 660 \text{ W/K}$). Ein dominanter Wärmestrom des Gebäudes ist deshalb der erzwungene Luftwechsel, der über die Abluftanlage vorgegeben wird. Ein Teil der Wärme aus dem Abluftstrom kann mittels Wärmepumpe wieder in den Wärmespeicher des Gebäudes eingetragen werden. Aus der messtechnischen Analyse resultiert die eingetragene Heizwärme (Q_{htg}) des Heizkreises, sowie der Wärmeverlust des Abluftmassenstroms (V_{p_abluf} , T_{amb} , T_{abluf}). Die Energie des Warmwassernetzes wird nach Zirkulations- und Zapfanteil gegliedert. Mittels einer automatisierten Messdatenanalyse (Kumulierung, Mittelwertbildung, usw.) wurden aus den 2-minütlichen Daten Tagesenergien berechnet. Die Abbildung C.2 zeigt eine Auswertung der gemessenen Wärmeströme des Gebäudes für die Jahre 1999-2001.

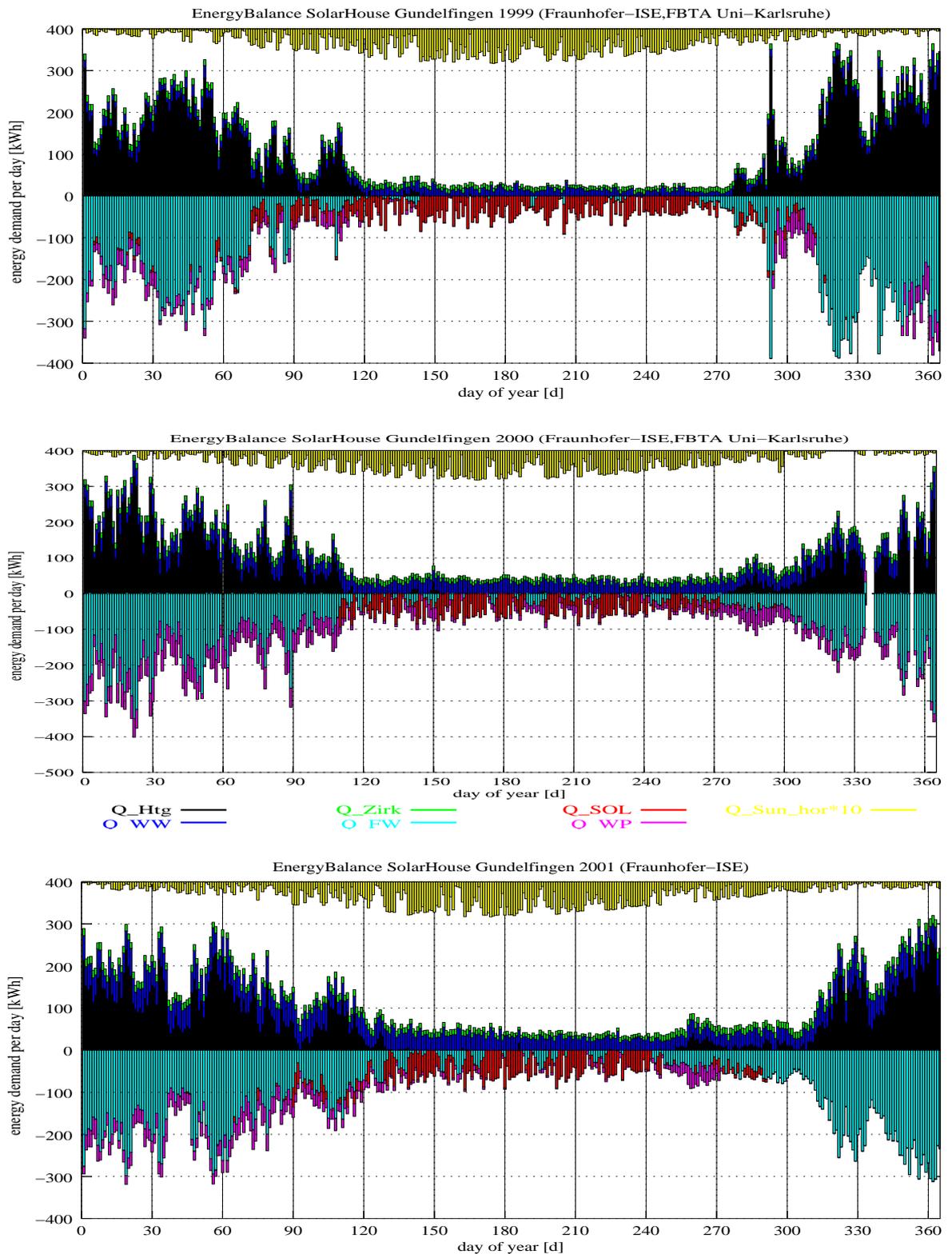


Abbildung C.2: Kumulierte Tagesenergien des Gebäudes für die Jahre 1999-2001.

Die Abszisse bezeichnet die Zeitachse (Tage 0 bis 365), während auf der Ordinate die Energie aufgetragen ist. Die Energieeinträge Heizkreis (Q_htg), Warmwasser und Zirkulation (Q_WW, Q_Zirk) sind summiert positiv aufgetragen, während die Energiequellen Fernwärme (Q_FW) und Wärmerückgewinnung aus der Wärmepumpe (Q_WP) summiert mit negativem Vorzeichen aufgetragen sind. Die Solarstrahlung (Q_SOL) wurde mit einem Skalierungsfaktor von 10 bewertet, und mit einem Offset von 400 kWh im oberen Bereich des Diagramms mit negativem Vorzeichen aufgetragen. Man kann deutlich die Reduktion des Heizwärmebedarfs infolge hoher Strahlungsgewinne erkennen.

Während der Heizperiode wird der Wärmebedarf eines Gebäudes zur Aufrechterhaltung behaglicher Raumtemperaturen größtenteils durch die Gebäudeheizung gedeckt. Zusätzliche Wärmequellen sind sogenannte innere Wärmequellen wie Mensch und Geräte. Durch die Erhöhung der passiven solaren Gewinne mit zusätzlichen Baumaßnahmen kann eine Senkung der für die Gebäudeheizung aufgewendeten Energie erreicht werden. Das Gebäude erfährt eine Solaroptimierung bezüglich des Wärmebedarfs. Hierzu wurde eine jahreszeitliche Auswertung vorgenommen, sowie die Tagesabhängigkeit des Heizbedarfs von der einfallenden Sonnenstrahlung betrachtet.

Folgende genäherte Bilanzierung dient als Ausgangspunkt zur Ermittlung der wesentlichen Energieströme für das Gebäude:

$$\mathbf{Q_Lüftung = Q_Htg - Q_Trans + Q_Zirk + Q_int.Gew. + Q_sol.Gew.}$$

- mit **Q_Lüftung = Q_Abluft + Q_Rest**;

$$\mathbf{Q_Abluft(dry,steam) = V_{p_{dry}} * \rho_{air} * c_{pair_{dry}} * dT + m_{p_{steam}} * c_{p_{steam}} * dT}$$

mit $V_{p_{dry}} \approx 800 \text{ m}^3/\text{h}$ (Messwert); $\rho \approx 1,2 \text{ kg/m}^3$ bei 20°C ; $c_{pair_{dry}} = 1.007 \text{ kWs/kg}\cdot\text{K}$ bei 20°C ; $dT = T_{\text{Abluft}} - T_{\text{Umg}}$ (Messwerte); $m_{p_{steam}} = 0,6222 * \frac{p_D}{p - p_D} * \rho_{air} * V_{p_{dry}}$; $c_{p_{steam}} = 1.86 \text{ kWs/kg}\cdot\text{K}$. Diese Wärmeverluste werden direkt aus Messwerten bestimmt¹. Der Einfluss der Feuchte der transportierten Luft durch das Abluftsystem wird hierbei berücksichtigt.

Q_Rest ist der nicht bestimmbare Anteil an den Lüftungsverlusten, die sich durch freie Lüftung durch Fugen und Fenster und durch manuelle Lüftung der Bewohner ergibt.

- mit **Q_Htg** als direkter Messwert aus einem Wärmemesseinheit mit magnetisch induktiver Volumenstrommessung

- mit **Q_Trans = kA_{ges} * dT**;

[$kA_{ges} \approx 659 \text{ W/K}$; $dT = T_{\text{mean}}^2 - T_{\text{Umg}}$ (Messwerte)]. Die Wärmeverluste des Gesamtgebäudes nach außen können näherungsweise durch einen Gesamtwärmedurchgangskoeffizient kA_{ges} beschrieben werden. Die Bestimmung von kA_{ges} erfolgte über die Bauteilprojektierungsliste (vgl. Anhang B) zur Bestimmung des Energiekennwertes. Hierbei wurden alle

¹ p_D ist der Teildruck des Wasserdampfes (bestimmt sich aus der relativen Feuchte) bei einem atmosphärischen Gesamtdruck p .

² T_{mean} ist der Mittelwert aller Temperaturen aus den Wohnungen und den Treppenhäusern.

Bauteile mit Fläche und k-Wert berücksichtigt und zum Gesamtwärmedurchgangskoeffizient summiert. Die Temperaturdifferenz $\Delta T = T_{\text{mean}} - T_{\text{Umgebung}}$ wurde direkt aus Messwerten bestimmt. Der Wärmeübergang an das Erdreich ist bei der k*A-Summierung mit einem Reduktionsfaktor mit berücksichtigt.

- mit **Q_Zirk**

Die Zirkulationsverluste, die durch die Warmwasserbereitstellung entstehen, gehen direkt ins Gebäude. Die Verluste im Keller sind aufgrund sehr guter Isolierung gering, so dass von einer internen Wärmequelle ausgegangen werden kann.

- mit **Q_int.Gew = 69 kWh/Tag;**

Ausgehend von einer Belegung des Hauses mit durchschnittlich 25 Personen und den Ablesungen der Stromzähler der Wohnungen kann über den betrachteten Zeitraum von einem Wärmegewinn von 69 kWh/Tag ausgegangen werden. Dies entspricht einer kontinuierlichen Leistung von 2.8 W/m^2 . Dieser Wert setzt sich aus der 100% Verfügbarkeit der Wärmeabgabe der Personen und einer 75% Verfügbarkeit des Stromverbrauchs als Wärmequelle zusammen. Es wird Wärmegewinn pro Person und Tag mit 1,21 kWh angenommen werden. Entsprechend kann von einem Wärmegewinn pro Tag durch den abgelesenen Stromverbrauch von 39 kWh ausgegangen werden.

- mit **Q_sol.Gew:**

Zur Ermittlung der Solaren Gewinne werden die originalen Messdaten der auf dem Dach befindlichen Wetterstation genommen. Die Diffusstrahlung wird direkt aus E_{gh} bestimmt³. Die Direktstrahlung findet bei diesem Ansatz nur auf die Südfassade Berücksichtigung, da die Solargewinne auf der Südseite dominant sind und die West- und Ostfassade im Winter durch Bebauung größtenteils verschattet ist. Für die Heizperiode 1999/2000 ergeben sich aus diesem Ansatz Anteile an Diffus- und Globalstrahlung auf die Südfassade wie in Abbildung 6 dargestellt. Der Systemwirkungsgrad der Kalksandsteinwand mit TWD berechnet sich nach:[74]

$$\eta = g_{dif} * [1 + (k_{TWD}/k_{wand})]^{-1}$$

Mit der Differenzierung in Diffus- und Direktanteil können folgende Anteile an den solaren Gewinnen ermittelt werden:

- Gewinne aus E_{dif} auf Fenster des gesamten Gebäudes:

$$= E_{dif} * g_{dif_{Fenster}} * Red.faktor * A_{Gesamtfenster}$$

- Gewinne aus $E_{dir90Sued}$ auf Fenster der Südfassade:

$$= E_{dir90Sued} * g_{dir_{\perp Fenster}} * Red.faktor * A_{Suedfenster}$$

- Gewinne aus E_{dif} auf TWD der Südfassade:

$$= E_{dif} * \eta_{dif_{TWD}} * Red.faktor * A_{TWD}$$

- Gewinne aus $E_{dir90Sued}$ auf TWD der Südfassade:

$$= E_{dir90Sued} * \eta_{dir_{\perp TWD}} * Red.faktor * A_{TWD}$$

³In diesem Zusammenhang wird davon ausgegangen, dass bei geringer Einstrahlung praktisch nur Diffusanteil anfällt, und dass an sonnigen Tagen ca. 20% der Energie als Diffusstrahlung einfällt. [26] (Ansatz der Näherung für $f(x)=a*x*\exp(b*x)$ mit $x=E_{g90_Süd}$; $a=1,2541$; $b=-0,0018$)

Tabelle C.1 führt die Gesamtenergien, die sich aus der Bilanzierung ergeben, für die Heizperiode 99/00 und für den Messzeitraum eines Jahres vom 1. August 1999 bis 31. Juli 2000 auf⁴. Als Grenzwert zur Berechnung der Transmissions- und Lüftungsverluste so wie der

Summe für	Heizperiode 1999/2000 in kWh (1. 10. '99 bis 30. 4. '00)	Messzeitraum 1Jahr [kWh] (1. 8. '99 bis 31. 7. '00)
Q_htg	28788 (28,4 kWh/m ²)	28913 (28,5 kWh/m ²)
Q_zirc	3166 (3,1 kWh/m ²)	4723 (4,7 kWh/m ²)
Q_int.Gew	14697 (14,5 kWh/m ²)	21736 (21,4 kWh/m ²)
Q_sol.Gew	25608 (25,2 kWh/m ²)	40252 (39,6 kWh/m ²)
Q_Trans	44149 (43,5 kWh/m ²)	53526 (52,7 kWh/m ²)
Q_Lüftung	28111 (27,7 kWh/m ²)	42092 (41,5 kWh/m ²)
Q_Abluft	17554 (17,3 kWh/m ²)	22182 (21,9 kWh/m ²)
Q_nat.+man.-Lüft.	10557 (10,4 kWh/m ²)	19909 (19,6 kWh/m ²)

Tabelle C.1: Auflistung der Gesamtenergien, die sich aus der Bilanzierung ergeben, zum einen für die Heizperiode 99/00 und zum anderen für den Messzeitraum eines Jahres vom 1. August 1999 bis 31. Juli 2000.

solaren und internen Gewinne wird die Außentemperatur $T_{\text{umg}} = 20 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ⁵ gewählt. Dies ist die Solltemperatur, die in der Heizperiode als typische Zimmertemperatur vorgegeben wird. Ist es draußen kälter als $20 \text{ }^{\circ}\text{C}$ treten für das Gebäude Transmissions- und Lüftungsverluste auf.

Stellt man aus diesen Ergebnissen die Wärmebilanz nach Bedarf und Deckung auf, ergibt sich das Schaubild nach Abbildung C.3:

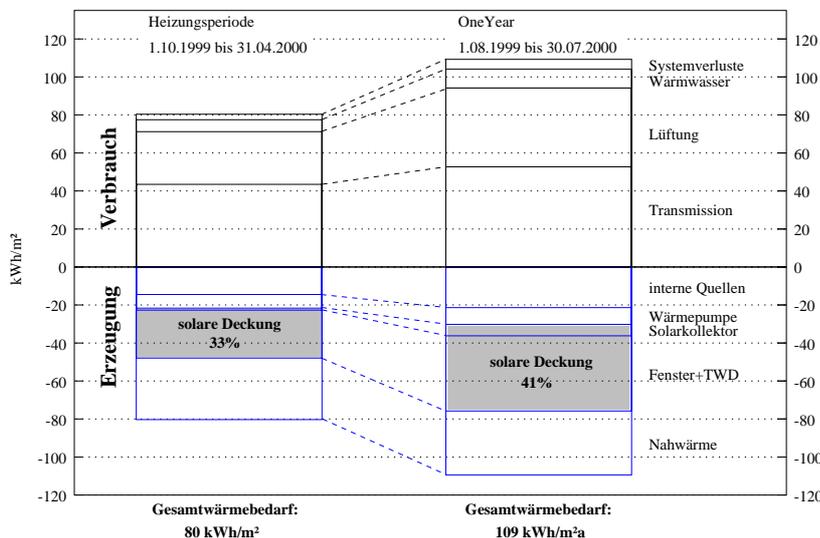


Abbildung C.3: Bilanzierung der Wärmeströme im "Solarhaus Gundelfingen" differenziert nach Bedarf und Deckung.

Der Gesamtwärmebedarf steigert sich ausgehend von der Heizperiode um 29 kWh/m^2 auf 109 kWh/m^2 für ein ganzes Jahr. Dieser zusätzliche Bedarf kann beinahe komplett ohne weiteren Wärmeeintrag durch die Fernwärme gedeckt werden. Zusätzlicher Heizbedarf für den

⁴Es wurde dieser Zeitraum gewählt, da er den Zeitraum der untersuchten Heizperiode beinhaltet.

⁵Da hier mit einem Tagesdatensatz gerechnet wird, ist T_{umg} ein Mittelwert des jeweiligen Tages.

Rest des Jahres ist nicht vorhanden und beträgt in der Summe 28,5 kWh/m²a (vgl. Tabellen 1+2). Die Solare Deckung des Bedarfs beträgt über das ganze Jahr ca. 41 %. Die Solare Deckung von 33 % für die Heizperiode ist etwas zu klein, da in diesem Zeitraum der Kollektor zu einem großen Teil ausgefallen war. Die höhere solare Deckung für das ganze Jahr kommt unter anderem dadurch zustande, dass der Solarkollektor in den Sommermonaten den kompletten Warmwasserbedarf deckt.

Betrachtungen zum Feuchtetransport durch das Abluftsystem

Um den Wärmeverlust durch das Abluftsystem genauer zu bestimmen, wurde Q_Abluft nach trockener Luft und feuchter Luft differenziert:

$$\mathbf{Q_Abluft(dry,steam)} = V_{p_{dry}} * \rho_{air} * c_{p_{air,dry}} * dT + m_{p_{steam}} * c_{p_{steam}} * dT$$

Für Q_Abluft(steam) konnte zum einen die eingetragene Wassermenge sowie die abgezogene Wassermenge durch das Abluftsystem bestimmt werden. Da die jeweiligen relativen Feuchten und die Temperaturen bekannt sind, ermitteln sich die Wassermengen wie folgt:

Unter der relativen Luftfeuchte versteht man das Verhältnis

$$\varphi = \frac{p_D}{p''} \quad (\text{C.1})$$

mit p_d : Teildruck des Wasserdampfes und p'' : Sättigungsdruck des Wasserdampfes.

Der Sättigungsdruck kann nach Glück mit folgender Approximation für einen Temperaturbereich 0-100°C bestimmt werden.

$$p'' = 611 * e^{7,257*10^{-2}*t - 2,937*10^{-4}*t^2 + 9,81*10^{-7}*t^3 - 1,901*10^{-10}*t^4} \quad (\text{C.2})$$

Ist φ und p'' bekannt folgt über p_D die Bestimmung der Wassermenge x pro kg trockener Luft über:

$$x = 0,6222 \frac{p_D}{p - p_D} \quad (\text{C.3})$$

mit p : Gesamtdruck der Luft in mbar

Mit bekanntem weil gemessenem Luftvolumenstrom ist auch die transportierte Wassermenge bekannt:

$$m_{p_{steam}} = 0,6222 * \frac{p_D}{p - p_D} * \rho_{air} * V_{p_{dry}} \quad (\text{C.4})$$

Da zum einen die relative Luftfeuchte der Außenluft und zum anderen die relative Luftfeuchte der abgezogenen Raumluft gemessen wird, kann mit den Tageswerten eine Auswertung stattfinden.

In Abb. C.4 ist über die Heizperiode 1999/2000 der Verlauf der relativen Luftfeuchten mit den jeweiligen mittleren Tagestemperaturen dargestellt. Zu sehen ist ein konstanter Verlauf der Raumtemperatur um 20 °C. Auffällig dagegen ist die starke Schwankung der relativen Raumluftfeuchte. Diese Werte bewegen sich im Tagesmittelwert um 60-90%. Konstanter dagegen ist wieder die relative Außenluftfeuchte (45-50%) mit Ausnahme der Randmonate. Mit Zunahme der Umgebungstemperatur steigt auch die Luftfeuchtigkeit.

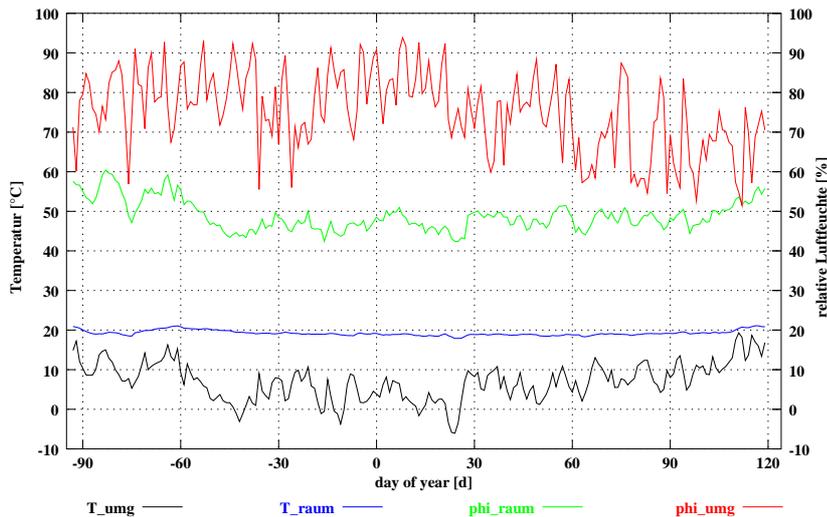


Abbildung C.4: Verlauf der relativen Luftfeuchten mit den jeweiligen mittleren Temperaturen über die Heizperiode 1999/2000. Grundlage sind Tagesmittelwerte.

Abbildung C.5 zeigt die transportierten Wassermengen auf, die durch das Abluftsystem dem Gebäude pro Tag zugeführt und abgeführt werden.

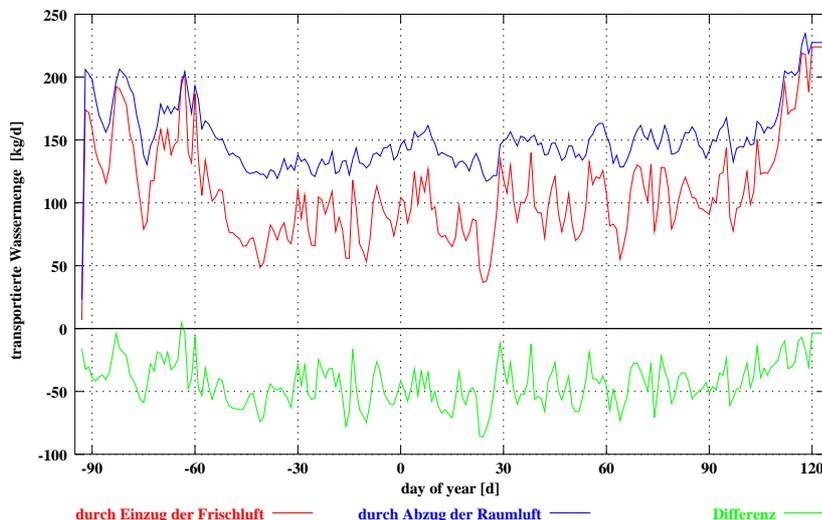


Abbildung C.5: Täglich zugeführte und abgeführte Wassermenge durch das Abluftsystem.

Die Differenz, die durchschnittlich bei etwa 50 kg liegt, wird durch den zusätzlichen Wasserdampfeintrag durch Personen (hauptsächlich Atmung), Duschen, Kochen, Wäschetrocken und Pflanzen gedeckt. Die Verdunstungswärme, die z. B. für das Trocknen von Wäsche oder zum Verdunsten von Wasser von Pflanzen nötig ist, kann abgeschätzt werden. Geht man beispielsweise pro Wohnung und Tag von 1 Liter Wasser aus, welches bei ca. 20 °C

verdunstet, so muss hierfür eine Verdampfungswärme von 2458 kJ aufgebracht werden. Für das gesamte Gebäude sind es dann 31954 kJ. Dies entspricht 8,9 kWh pro Tag. Dies ist in der Berechnung der Abluftverluste berücksichtigt.

C.2 Untersuchungen zur Heizkennlinie

Die Einstrahlung auf die Südfassade beeinflusst den Heizwärmebedarf des Gebäudes deutlich. Während ein konventionelles Gebäude näherungsweise gemäß der spezifischen Heizkennlinie in Abhängigkeit der Übertemperatur ($T_{\text{innen}} - T_{\text{umgebung}}$) Heizenergie benötigt, wird im Solarhaus Gundelfingen der Heizwärmeaufwand infolge der Einstrahlung geringer (vgl. Abb. C.6 und 2.3).

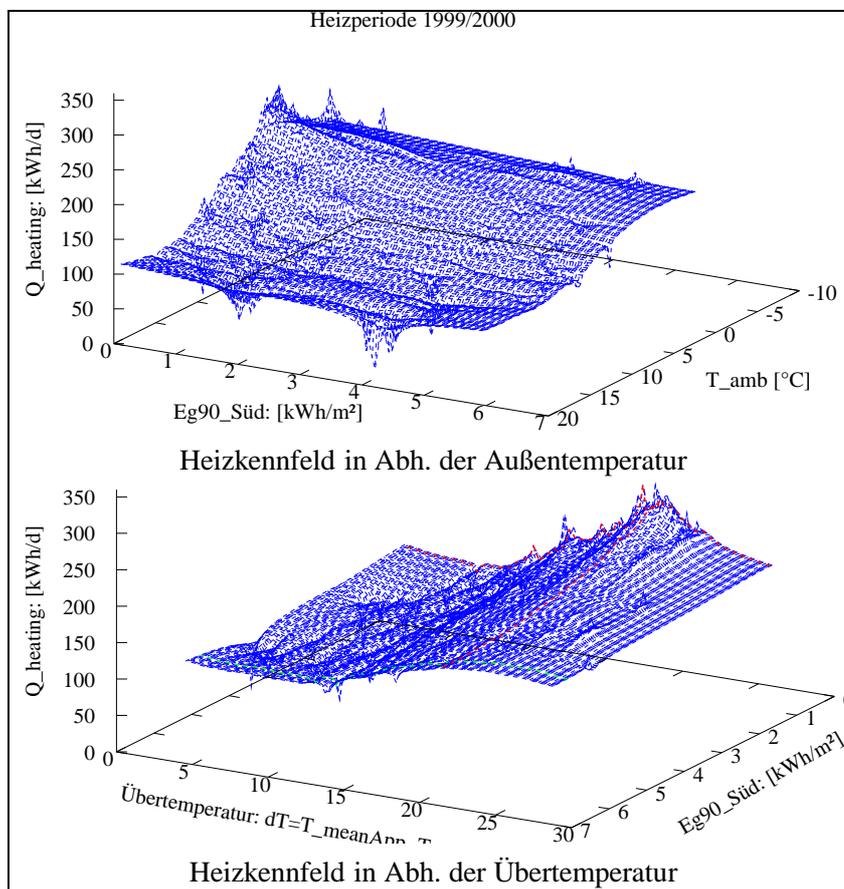


Abbildung C.6: Flächendarstellungen des Heizbedarfs für die Heizperiode 1999/2000 in Abhängigkeit der Einstrahlung und der Temperatur.

Die Kennfelder der Abbildung C.6 stellen den Heizenergiebedarf in Abhängigkeit der Einstrahlung und der Außentemperatur dar. Wie die 3D-Abbildungen zeigen, steigt die Heizenergie erwartungsgemäß mit fallender Außentemperatur an. Dies ist deutlich an der Steigung des Kennfeldes im oberen Bild zu erkennen. Im unteren Diagramm erkennt man die maximalen Heizenergieeinträge bei Übertemperaturen im Bereich von 20K (ca. 0°C Außentemperatur). Des Weiteren ist bei hohen Einstrahlungen auf die Südfassade eine Reduktion

des Heizenergiebedarfs zu beobachten. Bei noch größeren Übertemperaturen fällt die Heizenergie infolge der Solarstrahlung wieder (vgl. unteres Diagramm). Das heißt, dass mit zunehmender Kälte (-5 bis -10°C) der Heizenergiebedarf wieder sinkt. Dies hängt an dem Effekt der Korrelation von niedriger Außentemperatur und erhöhter Globalstrahlung. An diesen typisch kalten, klaren und sonnigen Wintertagen wirken sich die Baumaßnahmen zur Steigerung der passiven solaren Gewinne am deutlichsten aus.

Eine weitere Aussage bietet auch der Heizbedarf als Jahresdauerlinie. Durch ein Sortieren aller mittleren spezifischen Tagesheizleistungen, die auch die Grundlage zu Abbildung 2.3 lieferten, ergibt sich ein Diagramm nach Abbildung C.7.

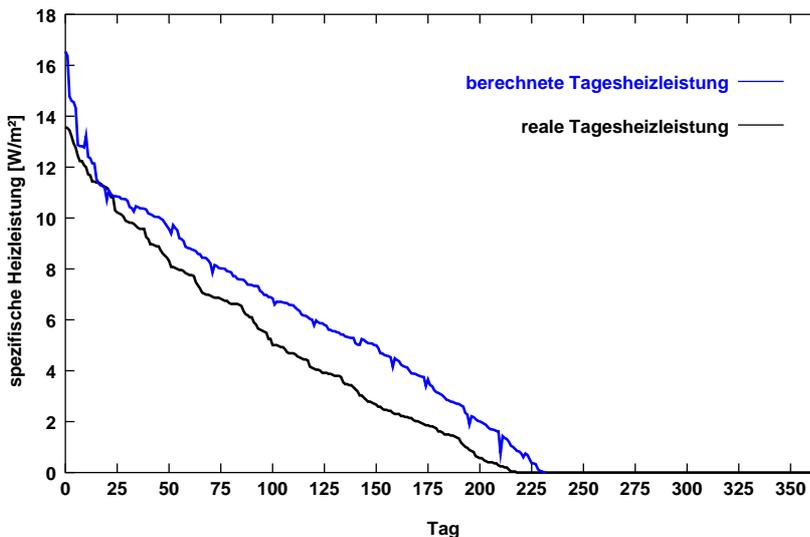


Abbildung C.7: Betrachtung der spezifischen Heizleistung über eine Jahresdauerlinie. Vergleich realer Messwerte mit berechneten Werten, die sich aus Außentemperatur und typischer Heizkennlinie ergeben.

Das Diagramm zeigt einen Vergleich realer Messwerte mit berechneten Werten. Die berechneten Werte ergeben sich aus der typischen Vorgehensweise der Wärmebedarfsbestimmung von Gebäuden. Die Grundlage hierfür bildet die Außentemperatur und die Heizkennlinie. Als Heizkennlinie wurde die Kennlinie (Fit $0-1,6 \text{ kWh/d}$) aus Abb. 2.3 genommen. Diese Kennlinie repräsentiert ein Haus wie das in Gundelfingen, welches keine zusätzlichen Wärmegewinne durch Solareinstrahlung aufweist.

Ein Vergleich der beiden Linien zeigt auf, dass der Einfluss der Sonne deutlich die Heizbedarfskennlinie reduziert. Zum einen reduziert sich die Maximalleistung um bis zu 5 W/m^2 und zum anderen ist die Heizperiode früher zu Ende.

C.3 TWD-Wand im Wandel

Eine Thermokamera konnte für eine längere Studie einer TWD-Fassade herangezogen werden. Im März 2000, während einer Schönwetterphase, wurde das Verhalten einer Rauminnenwand mit TWD-Elementen an der Außenfassade untersucht. Hierzu wurde über drei Tage hinweg mit der Thermografiekamera jede 1/4 h ein Bild aufgenommen. Die Abbildung C.8 zeigt 13 Bilder in einem größeren zeitlichen Verlauf (Abstand 2 h).

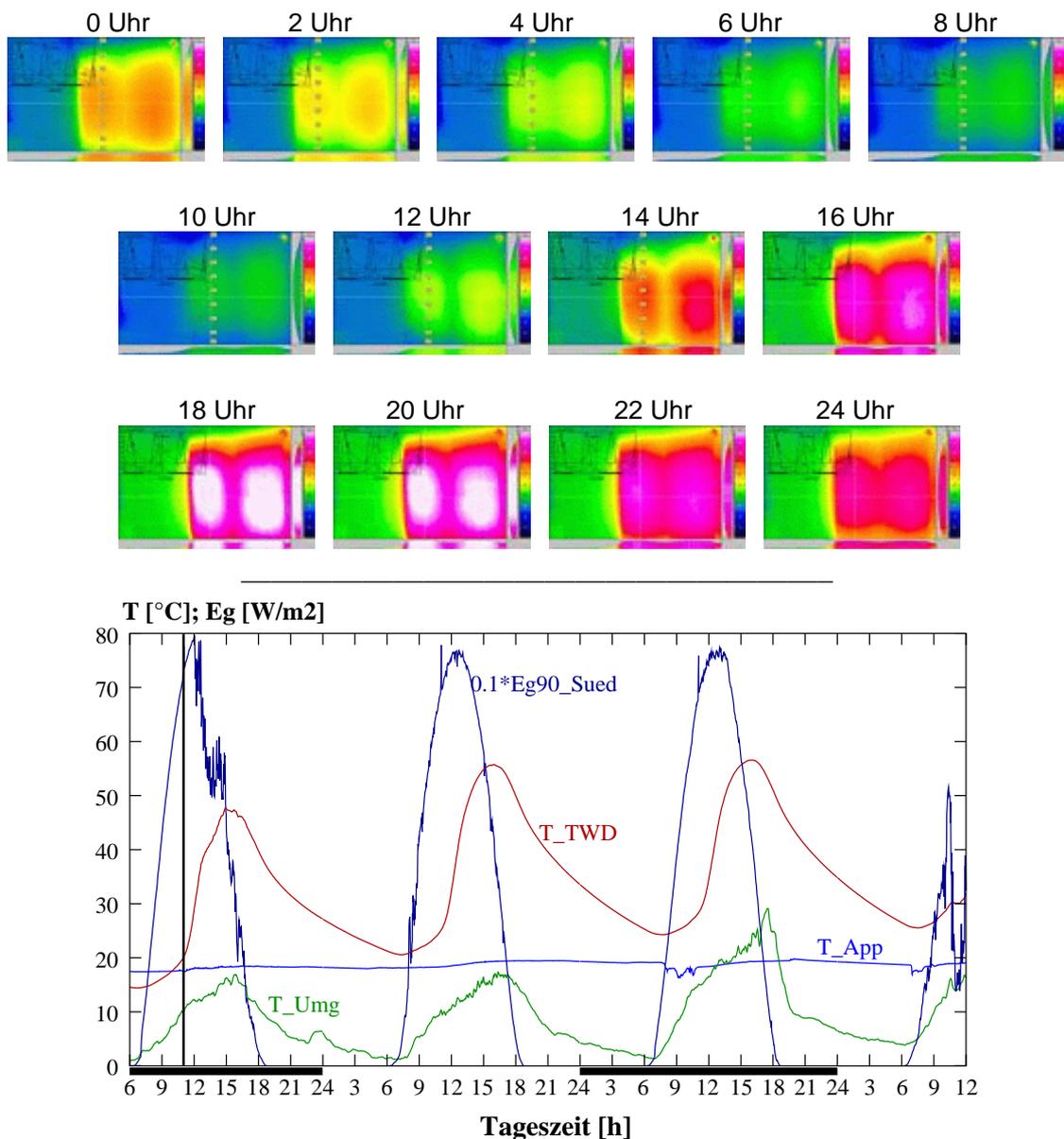


Abbildung C.8: Bilderauswahl aus den 260 Thermografieaufnahmen einer Rauminnenwand mit TWD. Unten ist ein Zeitdiagramm dargestellt, welches weitere wichtige Zustandswerte zum Zeitpunkt der Aufnahme aufzeigt. (Die Bilder sind vom zweiten Tag.)

Die Aufnahmen wurden in der Wohnung von einer Innenwand gemacht und veranschaulichen, wie sich die Oberflächentemperatur der Innenwand innerhalb von 24 Stunden aufgrund der Solareinstrahlung auf die TWD verhält. Zu sehen ist eine Wandecke, links die nach Osten gerichtete, opak isolierte Wand und rechts, die nach Süden gerichtete Wand. An dieser Mauer sind zwei TWD-Module angebracht (jeweils ca. 100x220 cm).

Die 260 entstandenen Bilder sind zu einem Film⁶ zusammengefasst worden. Der Film zeigt deutlich die Verzögerung der Wärmeabgabe in den Raum und die Speicherfähigkeit der Wand auf. In jedes Frame ist links oben das unten in Bild C.8 dargestellte Zeitdiagramm integriert worden. In diesem Zeitdiagramm verläuft entsprechend der Aufnahmezeit senkrecht ein dünner schwarzer Balken. Dieser Balken bildet den Schnittpunkt mit folgenden Zustandswerten:

- solare Einstrahlung senkrecht zur Wand,
- Außentemperatur,
- Temperatur am Absorber (d.h. an der schwarzen Außenwand nach dem TWD-Modul),
- Raumtemperatur
- im Schnittpunkt mit der X-Achse die Tageszeit.

Zum besseren Verständnis zeigt die Abbildung C.9 nochmals ein Einzelbild in hoher Auflösung. Am rechten Rand ist eine Temperaturskala mit den zugehörigen Farben entsprechend

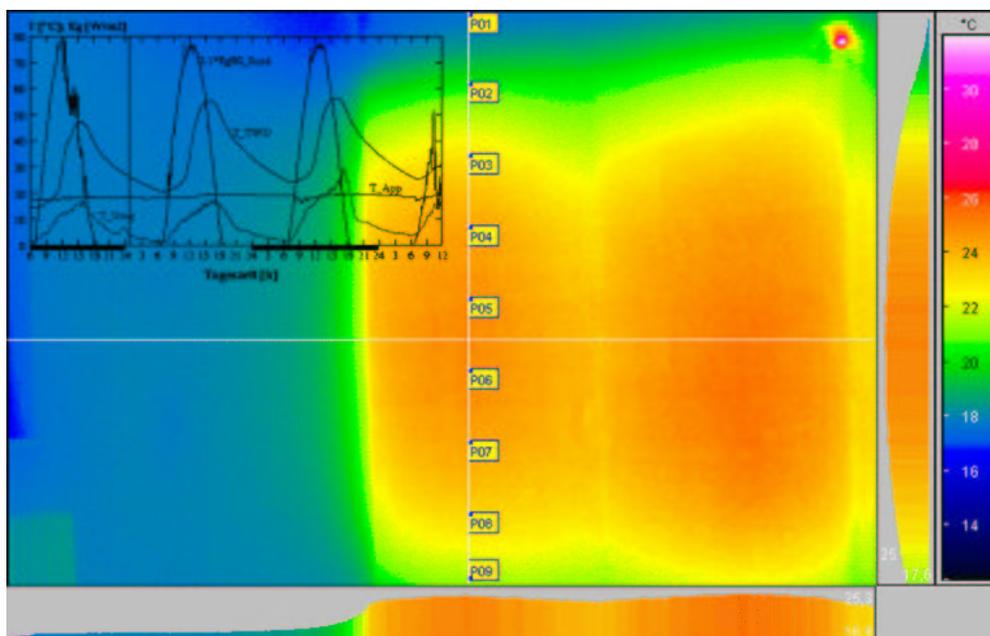


Abbildung C.9: vergrößertes Einzelbild der Thermografieaufnahmen

⁶Es existiert ein mpeg-Film (ca. 1.5MB) und ein besserer gif-Film (ca. 112MB). Diese und noch weitere Thermografieaufnahmen sind in einer HTML-Seite zusammengefasst worden.

des Bildes dargestellt. Zusätzlich ist auf dem Einzelbild ein Fadenkreuz mit neun Punkten (P01-P09) markiert. Diese Temperaturmesspunkte ergeben über den zeitlichen Verlauf von drei Tagen hinweg das Schaubild in Abbildung C.10. Der Sprung am Ende des zweiten Berges ist die Folge einer Messpause von drei Stunden.

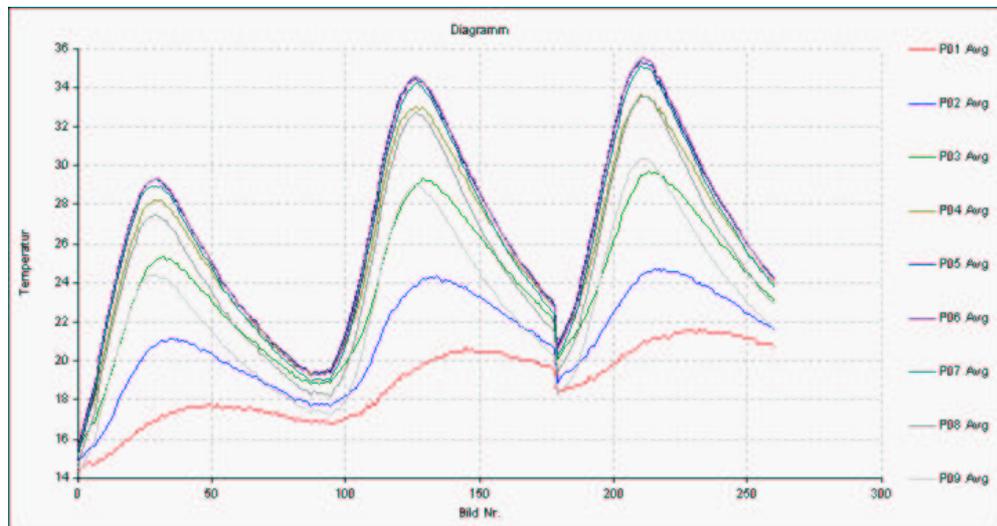


Abbildung C.10: Oberflächentemperaturverlauf der Innenwand mit TWD-Element über drei Tage mit neun Messpunkten (vgl. Abb. C.9).

Anhand dieser Diagramme und Aufnahmen lassen sich Aussagen über mit TWD isolierte Wände machen. So erreicht der Absorber erst 31/2 h nach der maximalen solaren Einstrahlung um ca. 12.30 Uhr seine Höchsttemperatur von ca. 56 °C. 6 bis 6 1/2 h später erreicht die Innenwand ihre Höchsttemperatur. Während sie am ersten Tag (die Tage vor der Messung waren einstrahlungslose Tage) eine Temperatur von fast 30 °C erreicht, steigt die Temperatur am dritten Tag sogar auf fast 36 °C an. Sieht man die aktuelle Raumtemperatur von 19 bis 20 °C, so ist die Wand bei 36 °C ein großflächiger Wärmestrahler, der langsam und verzögert zur Sonneneinstrahlung Energie zu den Abendstunden an den Raum abgibt. Auch das Auskühlverhalten bzw. die Speicherfähigkeit wird in den Diagrammen dargestellt.

Diese Auswertungen gingen direkt in die Modellentwicklungen mit ein und wurden zur Validierung herangezogen (siehe Abschnitt 3.2.1).

C.4 "Low Flow" im Heizkreis

Es bestand die Möglichkeit den technischen Anlagenteil insoweit zu erweitern, dass ein direkter Zugriff auf Aktoren möglich wurde. Die damit erschlossene Testumgebung eignete sich, eigene Regelstrategien und -entwicklungen direkt an einem bewohnten, mit realen Störgrößen behafteten Objekt zu erproben. Abgesichert durch die umfangreiche Messtechnik konnte gleichzeitig eine Überprüfung der Umsetzbarkeit einzelner Strategien und die Validierung der entwickelten Modelle erfolgen. Zusätzlich zu der installierten Messtechnik

wurden einige Veränderungen an Hard- und Software nötig, um die Feldversuche durchführen zu können.

Es wurde ein Konzept entwickelt, welches die externe Regelung unabhängig von der installierten Standardregelung des Systems erlaubte. Das Subnetz um den Messrechner wurde um einen zweiten Computer via Ethernet erweitert. Diese Maßnahme wurde notwendig um die geforderte Messdatensicherheit⁷ zu erfüllen. Der zweite Rechner, der als Regelkomponente eingesetzt wurde, stand über Netzwerkverbindung und einem "Shared-Memory"-Prozess mit dem Messcomputer in Kontakt. Über den "Shared-Memory"-Prozess und über einen "Client/Server"-Dienst wurden die erforderlichen Daten vom Messrechner geholt, um dann unabhängig vom Messrechner, diese Daten im Regelalgorithmus zu verarbeiten. Die resultierende Ansteuerung der Aktoren wurde auch von dem Regelrechner übernommen.

Dies erfolgte durch eine Relaisumschaltung einzelner Pumpen (Aktoren) auf einen zweiten Strompfad und deren Anbindung über einen Kommunikationsbus mit speziellem Protokoll an den auf Linux basierten Rechner. So konnte eine gezielte Ab- und Anschaltung sowie eine Drehzahleinstellung⁸ erfolgen. Die entwickelten Regelungsalgorithmen wurden unter Berücksichtigung der aktuellen Messdaten auf dem Linux-Server ausgeführt und in der Feldanlage getestet.

Mit der Idee, das "Low Flow" Prinzip von der Erzeugerseite (Sonnenkollektor) auch auf der Verbraucherseite einzusetzen, entstand das Konzept des "Low Flow" im Heizkreis. Wie aus Abb. C.1 ersichtlich, entnimmt der Heizkreis die Wärme dem Schichtenpufferspeicher (1500 Liter). Die Wärmeerzeuger sind die Nahwärme, die Wärmepumpe und der Solarkollektor, die ihre Wärmeenergie in den großen Pufferspeicher eintragen. Um den Betrieb des Solarkollektors zu optimieren, sind niedrige Speichertemperaturen nötig. Mit dem Ansatz einer rücklauftemperaturgeregelten Heizungspumpe lässt sich dies erreichen. Durch den variablen Massenstrom im Heizkreis ist eine Maximierung der Temperaturspreizung von Vor- und Rücklauftemperatur möglich. Die herkömmlichen Heizungsregelungen arbeiten mit einer außentemperaturgeführten und vorlauftemperaturregulierenden Heizkennlinie⁹ und einer Pumpe¹⁰, die auf einer festen Betriebsstufe betrieben wird.

Die Abb. C.11 zeigt repräsentative Temperaturverläufe für Heiztage mit herkömmlicher Regelung und mit Regelung über Rücklauftemperaturbegrenzung. Diesen Diagrammen liegen reale Messwerte aus Feldversuchen zu Grunde. Deutlich ist die erhöhte Spreizung zwischen Vor- und Rücklauftemperatur ersichtlich. So erreicht die RL-Regelung ein ΔT von 25K. Die RL-Temperatur wurde um mindestens 10 Kelvin auf ca. 30-35 °C gesenkt. Bei der Betrachtung des Volumenstroms im Heizkreis erkennt man den Unterschied der Regelungen. Während bei der herkömmlichen Regelung die Pumpe mit stetigem (bis zu 1500 l/h) Volumenstrom fördert, arbeitet die Pumpe bei RL-Regelung nur bei Bedarf mit hohem Volumen-

⁷gefordert war ein lückenloser Datensatz

⁸Dies erfolgt über Pulsweitenmodulation oder bei busfähigen Pumpen über die Frequenzrichtung.

⁹Die Heizkennlinie für das betreffende Haus ist relativ flach eingestellt, da große Radiatoren installiert sind. Bei stetig hohem Massenstrom wird die Vorlauftemperatur über einen Mischer eingestellt. Bei dem Ansatz der rücklauftemperaturgeregelten Heizungspumpe wird die maximal zur Verfügung stehende Speisetemperatur (ca. 58-62°C) dem Heizkreis zugeführt.

¹⁰Es handelt sich hier um die differenzdruck geregelte Grundfos Pumpe UPE 32-60.

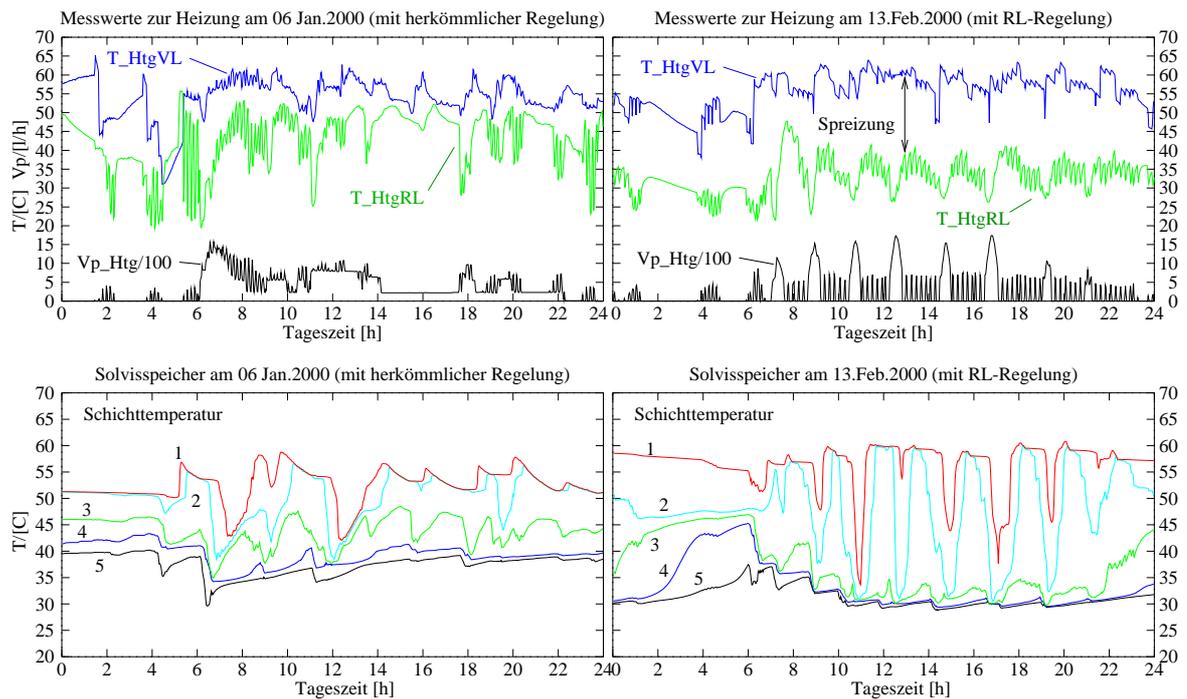


Abbildung C.11: Vergleich von Temperaturverläufen im Heizkreis und im Pufferspeicher bei unterschiedlicher Regelung.

strömen. Dazwischen wird die Pumpe sogar zeitweise ausgeschaltet, damit die geforderte Abkühlung im System stattfindet. Dieses Ausschalten wurde nötig, da der Volumenstrom pumpenbedingt nicht beliebig reduzierbar ist. Welche Auswirkungen die tieferen Rücklauf-Temperaturen haben, erkennt man an der Temperaturschichtung im zugehörigen Speicher. Besonders gut sieht man, dass fast 3/5 des Speichervolumens ein Temperaturniveau von 30-35°C erreicht. Die herkömmliche Regelung erreicht für nur 2/5 des Speichervolumens ein Temperaturniveau von 35-40°C. Es wird die Schichtungsfähigkeit des Speichers besser genutzt. Durch diese Reduzierung der unteren Speichertemperaturen werden die Schaltbedingungen für den Kollektor frühzeitig erfüllt, der solare Deckungsgrad steigt.

Während der Versuchsphase wurde Kontakt zu den Bewohnern gehalten und es wurden kontinuierlich die Raumtemperaturen der Wohnungen erfasst. So konnte eine Versorgungssicherheit gewährleistet werden. Es zeigte sich, dass die Versorgung der Bewohner mit Heizenergie durch die Versuche nicht beeinträchtigt wurde. Stattdessen verhielten sich die Wohnungstemperaturen in der Heizphase durch die höheren VL-Temperaturen dynamischer. Die Bewohner äußerten den positiven Nebeneffekt, dass ihre Heizung nun besser funktioniere. Dies ließ sich auf die Tatsache zurückführen, dass die Heizkörper nun bei Bedarf "heiß" wurden¹¹.

Ein weiteres Einsparpotential an Energie erschließt sich mit der Möglichkeit die Pumpe in

¹¹Während der herkömmlichen Regelung hatten die Bewohner öfter das Gefühl, dass die Heizkörper nicht heiß wurden. Bei reduzierten Vorlauf-Temperaturen fühlen sich die Heizkörper warm an, während bei der RL-Regelung die Radiatoren mit maximaler Temperatur (58-62 °C) gespeist werden.

der Drehzahl zu regeln. Es erfolgt nicht nur eine optimalere Nutzung einzelner Komponenten wie z. B. Sonnenkollektor oder Wärmeübergabe in die Wohnungen, sondern es erfolgt zusätzlich eine deutliche Einsparung der aufgenommen elektrischen Pumpenenergie. Eine Reduzierung der umgewälzten Masse hat erhebliche Auswirkungen auf die Leistungsaufnahme der Umwälzpumpen. Abb. C.12 zeigt den elektrischen Energieverbrauch der Hei-

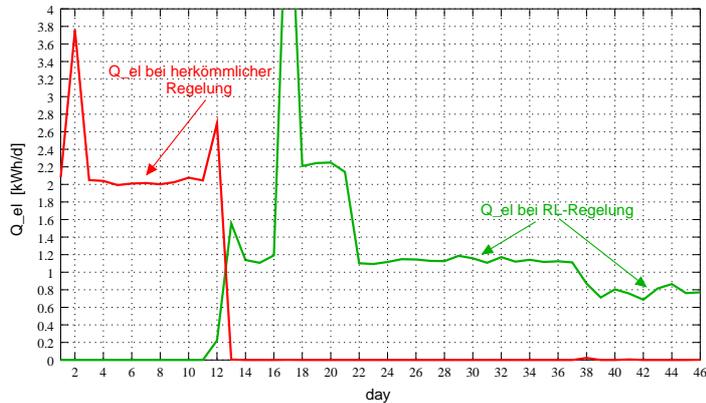


Abbildung C.12: Elektrischer Energieverbrauch der Heizungspumpe pro Tag. Mit Einsatz der Regelung über die Rücklauf-temperatur, kann der elektrische Energieverbrauch der Umwälzpumpe um 60 % gesenkt werden.

zungspumpe pro Tag. Während der Energiebedarf der Heizungspumpe an den Tagen 3 bis 11 bei herkömmlicher Regelung einen typischen Bedarf von 2 kWh/Tag hat, konnte dieser Wert in einer ersten Versuchsphase der RL-Regelung an den Tagen 22 bis 37 auf ca. 1,1 kWh/Tag reduziert werden. Nach einer weiteren Optimierung (Tag 39-46) werden sogar 0.8 kWh/Tag erreicht. Dies entspricht einer Reduktion der Leistungsaufnahme um 60 %.

Anhang D

D.1 Implikationen zur Regelbasis

1. WENN "Low Comfort", DANN ist gewünschte Raumtemperatur im Heizfall "niedrig".
2. WENN "Medium Comfort", DANN ist gewünschte Raumtemperatur im Heizfall "mittelhoch".
3. WENN "High Comfort", DANN ist gewünschte Raumtemperatur im Heizfall "hoch".
4. WENN "Low Comfort", DANN wird Heizung "früh" abgestellt.
5. WENN "Medium Comfort", DANN wird Heizung leicht verspätet ("mittel") abgestellt.
6. WENN "High Comfort", DANN wird Heizung "spät" abgestellt.
7. WENN "Low Comfort", DANN sind "hohe" Raumtemperaturen gestattet.
8. WENN "Medium Comfort", DANN sind "mittelhohe" Raumtemperaturen gestattet.
9. WENN "High Comfort", DANN sind "keine hohen" Raumtemperaturen gestattet.
10. WENN Jahreszeit "Herbst/Frühjahr" (z. B. $13\text{ }^{\circ}\text{C}$), DANN wird TWD-Verschattung leicht verspätet ("mittel") herabgelassen.
11. WENN Jahreszeit "Sommer" ($>15\text{ }^{\circ}\text{C}$), DANN wird TWD-Verschattung "früh" herabgelassen.
12. WENN Jahreszeit "Winter" ($<13\text{ }^{\circ}\text{C}$), DANN wird TWD-Verschattung "spät" herabgelassen.
13. WENN Jahreszeit "Herbst/Frühjahr" (z. B. $13\text{ }^{\circ}\text{C}$), DANN wird Fenster-Verschattung leicht verspätet ("mittel") aktiviert.
14. WENN Jahreszeit "Sommer" ($>15\text{ }^{\circ}\text{C}$), DANN wird Fenster-Verschattung "früh" aktiviert.

15. *WENN Jahreszeit "Winter" ($<13\text{ }^{\circ}\text{C}$), DANN wird Fenster-Verschattung "spät" aktiviert.*
16. *WENN Jahreszeit "Herbst/Frühjahr" (z. B. $13\text{ }^{\circ}\text{C}$), DANN wird Nachtlüftung "mittelstark" aktiviert.*
17. *WENN Jahreszeit "Sommer" ($>15\text{ }^{\circ}\text{C}$), DANN wird Nachtlüftung "stark" aktiviert.*
18. *WENN Jahreszeit "Winter" ($<13\text{ }^{\circ}\text{C}$), DANN wird Nachtlüftung "leicht" aktiviert.*

D.2 Nomenklatur

A	m^2	Fläche
α, α_λ	$^\circ$	Winkel, Absorptionsgrad
α_{conv}	$\frac{W}{m^2 K}$	konvektiver Wärmeübergangskoeffizient
B	m	Breite
C	$\frac{W s}{K}$	thermische Kapazität
c_p	$\frac{J}{kg K}$	spezifische Wärmekapazität
E, E_0	$\frac{W}{m^2}$	Einstrahlung, Solarkonstante
\dot{E}	$\frac{W}{m^2}$	Ausstrahlungsdichte
ε	–	Emissionsverhältnis
g	–, $\frac{m}{s}$	Gesamtenergiedurchlassgrad, Fallbeschleunigung
H, h	$\frac{J}{kg}, s, m$	Enthalpie, Zeitschrittweite bei der Simulation, Höhe
I, I_{gt}	$\frac{W}{m^2}$	Einstrahlungsstärke, (engl: Irradiation global tilted)
J	–	Güteindex, quadratische Regelfläche
k, k_0	$\frac{W}{m^2 K}$	Wärmeverlustkoeffizient
k_1	$\frac{W}{m^2 K^2}$	temperaturabhängiger Wärmeverlustkoeffizient
kA	$\frac{W}{K}$	Wärmedurchgangswert
L, l	m	Länge, Anströmlänge
λ	$\frac{W}{mK}, m$	Wärmeleitkoeffizient, Wellenlänge
m	kg	Masse
\dot{m}	$\frac{kg}{s}$	Massenstrom
n_{50}	h^{-1}	Luftwechselrate bei 50 Pa Druckdifferenz; Blower Door Test
ϕ	–	Einstrahlzahl
φ	$^\circ$	Phasenverschiebung
P	W	Leistung (thermisch oder elektrisch)
$Q, \Delta Q$	$W s$	Energie, Wärmeenergieinhalt
\dot{Q}	W	Wärmestrom, Heizleistung
R	$\frac{K}{W}$	thermischer Widerstand
r	–	Reflexionsgrad
ρ	$\frac{m^3}{kg}$	Dichte
σ	$\frac{W}{m^2 K^4}$	Strahlungskonstante
$t, \Delta t$	s	Zeitpunkt, Zeitschritt
τ	–	Transmissionsgrad
τ	s	Zeitkonstante
T	$^\circ C, s$	Temperatur, Periodendauer, Zeitkonstante
ΔT	K	Temperaturdifferenz
θ	$^\circ$	Einfallswinkel

U_f	$\frac{W}{m^2 K}$	Wärmedurchgangskoeffizient für Rahmenprofil des Fensters
U_g	$\frac{W}{m^2 K}$	Wärmedurchgangskoeffizient für Glasscheibe des Fensters
U_w	$\frac{W}{m^2 K}$	Wärmedurchgangskoeffizient für gesamtes Fensters
V	m^3	Volumen
ν	$\frac{m^2}{s}$	kinematische Viskosität
ω	s^{-1}	Kreisfrequenz
Gr	–	Grashofzahl,
Nu	–	Nußeltzahl
Pr	–	Prandtlzahl
Ra	–	Rayleighzahl
Re	–	Reynoldszahl

weitere Abkürzungen:

BESTEST	Building Energy Simulation TEST and Diagnostic Method
cc	cloud cover
DGL	Differentialgleichung
DBU	Deutsche Bundesstiftung Umwelt
DWD	Deutscher Wetterdienst
iam	incidence angle modifier (Winkelkorrekturfaktor)
IEA-SHC	International Energy Agency - Solar Heating & Cooling
IMC	Internal Model Control
ISE	Institut für Solare Energiesysteme
EnEV	Energieeinsparverordnung
FF	Free Float
FFE	Fenster- und Fassaden-Entwicklung
HLK	Heizungs-, Lüftungs- und Klimatechnik
μC	Mikrocontroller
MBPC	Model Based Predictive Control
PCM	Phasenwechselmaterial
PD	Public Domain
PI	Proportional-Integral- Regler
REM	Raster Elektronen Mikroskop
RLB	Rücklauftemperatur-Begrenzung
TAK	Thermische Anlagen und Komponenten
TOS	Thermische und Optische Systeme
TWD	Transparente Wärmedämmung
WschVo	Wärmeschutzverordnung
WWF	World Wildlife Found

D.3 Veröffentlichungen

Wittwer, Christof; Hube, W.:

“Virtuelle Testumgebung für Regelungssysteme auf Basis der Simulationsumgebung ColSim”

9. Symposium Thermische Solarenergie, OTTI-Kolleg, Staffelstein 1999, 385-389

Hube, Werner; Wittwer, C.

“Entwicklung von neuartigen Regelungskonzepten mit Hilfe der Simulationsumgebung ColSim und deren Validierung im Feldtest”

10. Symposium Thermische Solarenergie, OTTI-Kolleg, Staffelstein 2000, 288-292

Hube, Werner; Wittwer, C.

“Experimentelle Untersuchung von neuartigen Regelungskonzepten für aktive thermische Systeme an einem Mehrfamilienhaus”

12. Internationales Sonnenforum, Freiburg 2000, CD-ROM

Hube, Werner; Wittwer, C.

“Betrachtungen zur Heizkennlinie eines Niedrigenergie-Mehrfamilienhauses und ColSim-Erweiterungen zur Untersuchung integraler Regelungen zur Wärmeversorgung”

11. Symposium Thermische Solarenergie, OTTI-Kolleg, Staffelstein 2001, 214-219

Wittwer, Christof; Wagner, A.; Hube, W.; Schossig, P.:

“ColSim - A new Simulation Environment for Complex System Analysis and Controllers”

Building Simulation Conference, Rio de Janeiro ,Brasil 2001

Hube, Werner; Wittwer, C.; Schossig, P.; Buschmann, S.:

“Modellentwicklungen neuer Wandelemente in ColSim zur Untersuchung von Wärmeflussregelungen in solarthermischen Gebäudesystemen”

12. Symposium Thermische Solarenergie, OTTI-Kolleg, Staffelstein 2002

Buschmann, Stephan; Hube, W.; Wittwer, C.:

“Das ColSim-Gebäudemodell: Eine realistische Wärmesenke zur Simulation solarer Kombianlagen”

12. Symposium Thermische Solarenergie, OTTI-Kolleg, Staffelstein 2002

Hermann, Michael; Wittwer, Christof; Hube, W.:

“Solarhaus Gundelfingen - Digitales Durchflusskonzept für minimalen Energieverbrauch”

12. Symposium Thermische Solarenergie, OTTI-Kolleg, Staffelstein 2002

Voss, Karsten; Engelmann, P.; Hube, W.; Bühring, A.:

“Solarenergie und Energieeffizienz im Geschosswohnungsbau - Ergebnisse, Erfahrungen und Trends aus aktuellen Demonstrationsprojekten”

12. Symposium Thermische Solarenergie, OTTI-Kolleg, Staffelstein 2002

Hube, Werner; Huljic Dominik; Schlegl Thomas; Kieliba Thomas; Hein, Mathias

“Klimaschutz durch Solarenergienutzung - Solaroptimierte Gebäudesysteme”

Woche der Umwelt; Ausstellung und Fachprogramm im Park des Schloss Bellevue, Veranstalter: dt. Bundespräsident, Berlin 2002

Hube, Werner; Wittwer, C.; Buschmann, S.:

“Rücklauftemperatur der Heizung als Zustandsindikator solarer Gebäude - Systemoptimierung durch Rücklauftemperatur-Begrenzung”

12. Internationales Sonnenforum, Berlin 2002, CD-ROM

D.4 Lebenslauf

Zur Person

Name	Werner Hube
Anschrift	Mettackerweg 28; 79111 Freiburg
Geboren	20. Dezember 1970 in Schwenningen
Familienstand	verheiratet, 3 Kinder
Staatsangehörigkeit	deutsch

Bildungsgang

Schule	1977 - 1981	Grundschule Weigheim
	1981 - 1990	Gymnasium Trossingen
Studium	10/1992 - 03/1999	Universität Kaiserslautern
		Studium der Elektrotechnik, Diplom
		Studienarbeit: Klinikum Kaiserslautern: Medizinische Physik u. Technik “Vergleich und Bewertung bestehender Optimierungs- algorithmen in der Bestrahlungsplanung“
		Industriepraktikum: Siemens Erlangen
		Diplomarbeit: Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme Freiburg “Systemmodellierung und Validierung einer hybriden Heizanlage für ein Niedrigenergiehaus und Entwicklung einer lastabhängigen Regelungsstrategie“
Stipendium	10/1999 - 09/2002	Promotionsstipendium der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU) Doktorand am Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme Freiburg
	10/2002 - 03/2003	Freiberufliche Tätigkeit für das Fraunhofer-ISE
	seit 04/2003	Wissenschaftlicher Mitarbeiter der Fa. PSE - Freiburg

Literaturverzeichnis

- [1] Bandemer, H.; Gottwald, S.: Einführung in FUZZY-Methoden. Thun: Harri Deutsch-Verlag 1990. Zitiert nach [81]
- [2] Bergold, S.: Methoden zur Regelung von Mehrgrößenprozessen in der Verfahrenstechnik. Dissertation Universität Kaiserslautern 1999
- [3] Bernard, T.: Ein Beitrag zur Gewichtung multikriteriellen Optimierung von Heizungs- und Lüftungsregelkreisen auf Grundlage des Fuzzy Decision Making. Dissertation Universität Karlsruhe 2000
- [4] Beuken, D. L.: Wärmeverluste bei periodisch betriebenen Öfen. Dissertation Universität Freiburg 1936
- [5] Bine-Informationdienst: Schaltbare und regelbare Verglasungen. Themeninfo 01/02, Fachinformationszentrum Karlsruhe 2002
- [6] Bine-Informationdienst: Latentwärmespeicher in Baustoffen. Projektinfo 06/02, Fachinformationszentrum Karlsruhe 2002
- [7] Bronstein, I.; Semendjajew, K.: Taschenbuch der Mathematik. 22. Auflage, Harri Deutsch-Verlag, Frankfurt 1985
- [8] Buschmann, S.: Simulationsgestützte Untersuchung zum Energiesparpotential ausgewählter Fassadenkonstruktionen -Validierung eines Gebäudemodells in der Simulationsumgebung ColSim. Diplomarbeit Fachhochschule Münster 2002
- [9] Buschmann, S.; Hube, W.; Wittwer, C.: Das ColSim-Gebäudemodell: Eine realistische Wärmesenke zur Simulation solarer Kombianlagen. 12. Symposium Thermische Solarenergie, OTTI-Energie-Kolleg, Staffelstein 2002
- [10] Chen, T.: Entwicklung und Implementierung eines Raummodells in der Simulationsumgebung ColSim. Studienarbeit Technische Hochschule Karlsruhe 1999
- [11] Churchill, S. W.: Free Convection around immersed bodies. In: Heat Exchanger Design Handbook. Düsseldorf: VDI-Verlag, 1983, Kap. 2.5.7 . Zitiert nach [VDI94, Kap. Fa]. Zitiert nach [71]
- [12] Churchill, S. W.; Chu, H. H. S.: Correlating equations for laminar and turbulent free convection from a vertical plate. In: Int. J. Heat Mass Transfer. 18 (1975), S. 1323 - 1329. Zitiert nach [71]
- [13] Clarke, J. A.: Energy simulation in building design. 1. Aufl. Bristol: J W Arrowsmith, 1985.

- [14] Duffie, J. A.; Beckmann, W. A.: Solar Engineering of Thermal Processes. New York: John Wiley & Sons 1991
- [15] DWD; Deutscher Wetterdienst: Gärtner, U.: 50 Jahre DWD - Möglichkeiten und Grenzen der Wettervorhersage heute und morgen. Pressekonferenz des DWD am 14. November 2002, Offenbach.
- [16] Eisenmann, G.: Ist das Heizsystem im künftigen Niedrigenergiehaus problematisch? Bauphysik Bd. 20, S. 115-121, 1998
- [17] Erker, H.: Vorausschauende Regelung von Heizungsanlagen basierend auf einer lokalen Wettervorhersage. Dissertation Universität Kaiserslautern, Kaiserslautern 1992
- [18] Fanger, P. O.: Raumklimattechnik (Kap.: Mensch und Raumklima). Hrsg.: Esdorn H.; Berlin: Springer-Verlag 1994
- [19] Feist, W.: Thermische Gebäudesimulation. Kritische Prüfung unterschiedlicher Modellansätze. Heidelberg: C.F.Müller-Verlag 1994
- [20] Feist, W.: Das Niedrigenergiehaus, Neuer Standard für energiebewusstes Bauen. Heidelberg: C.F.Müller-Verlag 1997
- [21] Ferguson, A. M.: Predictive Thermal Control of Building Systems. Dissertation EPFL, Lausanne (Schweiz) 1990
- [22] Föllinger, O.: Regelungstechnik, Heidelberg: Hüthig-Verlag 1994
- [23] Frank, W.: Raumklima und thermische Behaglichkeit. Berichte aus der Bauforschung; Heft 104, 1975
- [24] Fujii, T.; Imura, H.: Natural-convection heat transfer from a plate with arbitrary inclination. In: Int. J. Heat Transfer 91C (1969), S. 755- 767. Zitiert nach [71]
- [25] Garcia, C. E.; Prett D.; Morari, M.: Model Predictive Control: Theorie and Practise. Automatica Volume 23 No. 3 pp.335-348; 1989. Zitiert nach [2]
- [26] Goetzberger, A.; Wittwer, V.: Sonnenenergie - Thermische Nutzung. Teubner Studienbücher Physik; Teubner-Verlag Stuttgart 1993
- [27] Gütermann, A.: Mehrfamilien-Passivhaus mit solarem Luftsystem. Bundesamt für Energie, Bern 2002, <http://www.empa.ch/ren>
- [28] Häberle, A.: Vermessung und Modellierung von stationären, konzentrierenden Kollektoren. Dissertation Albert-Ludwig-Universität Freiburg, Freiburg 1999
- [29] Hering, E.; Martin, R.; Stohrer, M.: Physik für Ingenieure. VDI-Verlag 1988
- [30] Hube, W.: Systemmodellierung und Validierung einer hybriden Heizanlage für ein Niedrigenergiehaus und Entwicklung einer lastabhängigen Regelungsstrategie. Diplomarbeit Universität Kaiserslautern, Kaiserslautern 1999
- [31] Hube, W; Wittwer, C.: Entwicklung von neuartigen Regelungskonzepten mit Hilfe der Simulationsumgebung ColSim und deren Validierung im Feldtest. 10. Symposium Thermische Solarenergie, OTTI-Kolleg, Staffelstein 2000, S. 288-292

- [32] Hube, W.: Experimentelle Untersuchung von neuartigen Regelungskonzepten für aktive thermische Systeme an einem Mehrfamilienhaus. 12. Internationales Sonnenforum, Freiburg 2000
- [33] Hube, W.: Rücklauftemperatur der Heizung als Zustandsindikator solarer Gebäude - Systemoptimierung durch Rücklaufbegrenzung-. 13. Internationales Sonnenforum, Berlin 2002, S. 310-317
- [34] DIN ISO7730: Ermittlung des PMV und des PDD und Beschreibung der Bedingungen für thermische Behaglichkeit. Deutsches Institut für Normung 1995
- [35] Kahlert, J.; Frank, H.: Fuzzy-Logik und Fuzzy-Control. Wiesbaden: Vieweg-Verlag 1993
- [36] Kast, W.: Raumklimatechnik (Kap.: Wärmeübertragung). Hrsg.: Esdorn H.; Berlin: Springer-Verlag 1994
- [37] Kerskes, H.; Drück, H.; Bachmann, S.: Kombianlagen - Solaranlage zur kombinierten Trinkwassererwärmung und Heizungsunterstützung. Abschlussbericht des ITW, Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik, Universität Stuttgart, Stuttgart 2001
- [38] Klingner, M.; Knabe, G.; Lauckner, G.; Werdin, H.; Billerbeck, G.: Bedarfsgerechte Regelung des Raumluftzustandes in Wohngebäuden. Heizung, Lüftung/Klima, Haustechnik (HLH) Bd.50, S. 46-55, 1999
- [39] RWE: RWE Energie Bau Handbuch. Heidelberg: Energie-Verlag 1996
- [40] Lunze, J.: Regelungstechnik 1. 3., erw. Auflage; Berlin: Springer-Verlag 2001
- [41] Lute, P.; Paassen, van A.: Indoor temperature control using predictions. Building Management Systems Copenhagen, Denmark, 1988
- [42] Marko, A.; Braun, P.: Thermische Solarenergienutzung an Gebäuden. Berlin: Springer-Verlag 1997
- [43] Merz, R.: Objektorientierte Modellierung thermischen Gebäudeverhaltens. Dissertation Universität Kaiserslautern, Kaiserslautern 2002, <http://kluedo.ub.uni-kl.de/volltexte/2002/1500>
- [44] Modelica - a unified object-orientated language for physical system modeling. Publikationsliste: <http://www.modelica.org/publications.shtml>
- [45] Möller, D.: Modellbildung, Simulation und Identifikation dynamischer Systeme. Berlin: Springer-Verlag 1992
- [46] El-Khoury, M.; Krauss, J.; Bauer, M.; Morel, N.: NEUROBAT: Predictive Neuro-fuzzy Building Control System. National Research Programme "Energy Conservation in Buildings", CSEM Neuchatel, EPF Lausanne, 1998
- [47] Nytsch-Geusen, C.; Bartsch, G.: An object oriented multizone thermal building model based on the simulation environment smile, in Proc. Int. IBPSA Conf., Rio de Janeiro, Brazil 2001
- [48] Papular, L: Mathematische Formelsammlung für Ingenieure und Naturwissenschaftler. 4. verbesserte Aufl. Wiesbaden: Vieweg, 1994

- [49] Peper, S.: Untersuchung der Luftdichtheit in der Passivhaussiedlung in Hannover-Kronsberg. PHI-Darmstadt 1999. Zitiert nach Energie Effizientes Bauen 1/2002
- [50] Pettenkofer, M.: Über den Luftwechsel in Wohnungsgebäuden. München: Literarisch-Artistische Anstalt der J.G.Cotta'schen Buchhandlung 1858. Zitiert nach [53]
- [51] Quaschnig, V.: Regenerative Energiesysteme. München: Hanser-Verlag 1998
- [52] Rawling, J. B.: Tutorial Overview of Model Predictive Control. IEEE Control Systems Magazine pp.38-52; 2000
- [53] Recknagel, H.; Sprenger, E.; Schramek, E. u. a.: Taschenbuch für Heizung und Klimatechnik. 70. Aufl. München: Oldenbourg Industrieverlag 2001
- [54] Rexroth, S.: Wärmende Sonnenstrahlung wohl dosiert. Sonnenenergie 11/2001
- [55] Rohlfss, K.: Modellierung des thermischen Verhaltens komplexer Gebäude und Untersuchungen zum Potential prädiktiver Regelungen im thermischen Bereich. Diplomarbeit Universität Freiburg, Freiburg 1997
- [56] Santa, K.: Fuzzy-basierte Sollwertvorgabe für die Raumklimaregelung. Technik am Bau (TAB) S. 31-38 10/1996
- [57] Schossig, P.; Henning, H.-M.; Raicu, A.; Haussmann, T.: Mikroverkapselte Phasenwechselmaterialien in Wandverbundsystemen zur Komfortsteigerung und Energieeinsparung. 12. Symposium Thermische Solarenergie, OTTI-Kolleg, Staffelstein 2002, S. 169-173
- [58] Schumacher, W.; Leonhard, W.: Grundlagen der Regelungstechnik. Vorlesungsskript der Technischen Universität Braunschweig 2002
- [59] Schwarz, H.: Numerische Mathematik. Teubner-Verlag, Stuttgart 1986
- [60] Smith, B.: XFIG - Facility for Interactive Generation of figures, Version 2.0: coordination by Brian Smith bvsmith@lbl.gov
- [61] Stewartson, K.: On the free convection from a horizontal plate. In: Z. Angew. Math. Phys. 9 (1958), S. 276 - 281. Zitiert nach [71]
- [62] Streicher, W.: Einführung in die Simulation von solarthermischen Systemen. 13. Internationales Sonnenforum, Berlin 2002, S. 301-308
- [63] Suter, J.; Weiss, W.: IEA-SHC TASK 26: Solar Combisystems, 2000
- [64] International Energy Agency: www.iea.shc.org/task26/
- [65] Klein, S. A.; Beckmann, W. A.: TRNSYS - A Transient System Simulation Program. Wisconsin: Solar Energy Lab. Madison 1988
- [66] Hiller, M.: Handbuch für TRNSYSlite 3.0 - Ein neues Nutzerinterface zur einfachen, schnellen und sicheren Simulation einer thermischen Gebäudezone. Stuttgart 2003, <http://www.transsolar.com>
- [67] Trombe, F.; Robert, J.F.; Cabanot, M.; Sesolis, B.: Concrete Walls to Collect and Hold Heat. Solar Age Vol. 2,13; 1977

- [68] Kerschberger, A.; Platzer, W.; Weidlich, B.: Transparente Wärmedämmung; Produkte, Projekte, Planungshinweise. Wiesbaden: Bauverlag 1998
- [69] van de Boom, T. J. J.: Model Based Predictive Control: Status and Perspectives. Symposium on Control, CESA '96 IMACS Multiconference Lille S. 1-12; 1996. Zitiert nach [2]
- [70] VDI Richtlinie 6020: Anforderung an Rechenverfahren zur Gebäude- und Anlagensimulation, VDI, Düsseldorf, Beuth-Verlag, Berlin 2001
- [71] Verein Deutscher Ingenieure: VDI-Wärmeatlas. 7. erw. Auflage. Düsseldorf: VDI-Verlag 1994
- [72] Virk, G.; Loveday, D.: Design for on-line models for multi-zone office air conditioning to aid commissioning and maintenance. Appendix to Final Report - EPSRC Reference GR/J46326, (Quelle: www.port.ac.uk/research/c&r/control/multiappen.htm)
- [73] Voss, K.; Bühring, A.; Russ, C.; Neumann, C.; Ufheil, M.: Solares Bauen - Demonstrationsprojekte und Technologieentwicklung für den Wohnungsbau. Fraunhofer-Institut Solare Energiesysteme, Freiburg 2000
- [74] Wagner, A.: Transparente Wärmedämmung an Gebäuden. TÜV-Verlag Rheinland 1998
- [75] Weise, E.: Strahlungsheizung. Essen: Vulkan-Verlag 1973
- [76] Weiss, W.; Suter J.; Letz, T.: Solare Kombianlagen im europäischen Vergleich -Ergebnisse der IEA SHC Task 26. 12. Symposium Thermische Solarenergie, OTTI-Energie-Kolleg, Staffeldstein 2002
- [77] Wilke, W.: Transparente Wärmedämmung in der Architektur - Anwendungen, thermisches Systemverhalten und optimale Raumklimakonditionierung. Dissertation an der Technischen Universität Karlsruhe, Karlsruhe 1991
- [78] Williams, T; Kelly, C.: GNUPLOT: An Interactive Plotting Program. info-gnuplot@dartmouth.edu 1997
- [79] Wittwer, C.: ColSim -Simulation von Regelungssystemen in aktiven solarthermischen Anlagen. Dissertation an der Technischen Universität Karlsruhe, Karlsruhe 1999
- [80] Institut Wohnen und Umwelt GmbH: "Baustelle Klimaschutz" Potentiale und Strategien für eine Reduktion der CO_2 -Emissionen aus der Beheizung von Gebäuden. Studie im Auftrag der Umweltstiftung WWF-Deutschland. Darmstadt: 1997
- [81] Zacharias, V.: Entwicklung adaptiver und modularer Fuzzy-Controller zur Regelung komplexer dynamischer Systeme. Shaker-Verlag
- [82] Zadeh, L. A.: Fuzzy Sets. Information and Control, Vol. 8, 1965

Abbildungsverzeichnis

2.1	<i>Der Wärmebedarf in kWh/m^2a von Wohngebäuden mit unterschiedlichen Dämmstandards und Solartechnik im Vergleich. (Quelle: Fraunhofer ISE)</i>	10
2.2	<i>Gemessener Tagesheizenergiebedarf eines modernen sehr gut gedämmten Wohngebäudes mit geringen passiven solaren Gewinnen, in Abhängigkeit der Außentemperatur.</i>	11
2.3	<i>Gemessener Tagesheizenergiebedarf eines modernen sehr gut gedämmten Wohngebäudes mit erhöhten passiven solaren Gewinne, in Abhängigkeit der Außentemperatur und der Solarstrahlung.</i>	12
2.4	<i>Vereinfachte Darstellung einer exemplarischen Kombination von transparenter Wärmedämmung (TWD), optisch schaltbarer Schicht, Phasenwechsellmaterial (PCM) und Fenster mit außen liegendem Sonnenschutz.</i>	13
2.5	<i>Gaschrome Verglasung in verschiedenen Schaltzuständen: Rechts jeweils eine unbeschichtete Standardverglasung, links oben jeweils die gaschrome Verglasung im maximal gefärbten Zustand, links unten die gaschrome Verglasung: a) klar, b) teilweise gefärbt, c) stark eingefärbt. (Quelle: Fraunhofer Gesellschaft-ISE)</i>	15
2.6	<i>Aufbau einer Wand mit transparenter Wärmedämmung als passives Fassadenelement. (Quelle: [68])</i>	16
2.7	<i>REM-Aufnahme von PCM-Kapseln im Gipsputz. (Quelle: Fraunhofer Gesellschaft-ISE)</i>	18
2.8	<i>Vereinfachte schematische Darstellung zur Funktionsweise eines solaren Kombisystems. Entgegen der herkömmlichen Auslegung der Kollektoranlagen zur Trinkwassererwärmung werden zur Heizungsunterstützung Kollektor und Warmwasserspeicher größer ausgelegt.</i>	20
2.9	<i>a): Behaglichkeitskennfeld in Abhängigkeit der mittleren Oberflächentemperatur und der Raumtemperatur (nach Frank [23]).</i>	22
2.10	<i>Wellenlängenabhängige Bestrahlungsstärke für das extraterrestrische Spektrum (AM_0) und für das direkte terrestrische Spektrum (AM_1) (Quelle: [14]) Die schwarzen Flächen kennzeichnen die Reduktion der Solarstrahlung durch Absorption und Streuung, verursacht durch Luftmoleküle. (Die AM-Zahl (Air Mass) ist ein Maß für die Weglänge des Sonnenlichtes durch die Atmosphäre. Je größer die AM-Zahl ist, umso länger der Weg der Strahlung durch die Atmosphäre, umso intensiver die Schwächung. [14, S.65ff])</i>	29

2.11	<i>Thermisches Ersatzschaltbild zur Darstellung der Wärmeströme im Raummodell.</i>	32
2.12	<i>Wärmeströme an der Innenoberfläche</i>	37
2.13	<i>Diskretisierungsschema einer mehrschichtigen Wand</i>	40
2.14	<i>Wärmeströme an der Außenoberfläche</i>	45
2.15	<i>Energiebilanz an der inneren Verglasungsoberfläche.</i>	47
2.16	<i>links: Zenitwinkel, Neigung, Azimutwinkel der Oberfläche und Azimutwinkel der Sonne für eine geneigte Oberfläche; rechts: Azimutwinkel der Sonne im Grundriss (Quelle: [14, S. 14]).</i>	49
3.1	<i>Vergleich der ColSim-Ergebnisse mit den Ergebnissen der BESTEST-Referenzprogrammen zum Heiz- und Kühlbedarf eines leichten Gebäudes für einen ausgewählten Wintertag mit hoher Einstrahlung.</i>	52
3.2	<i>Stundenmittelwerte der Heizkörperbeladeleistung für ein Einfamilienhaus nach TASK 26 mit dem Dämmstandard von $60 \text{ kWh/m}^2\text{a}$ und der Klimaregion Zürich (Quelle: [9]).</i>	53
3.3	<i>Thermisches Ersatzschaltbild einer TWD-Wand. Die Transparente Wärmedämmung erhält im Wandaufbau einen Knoten, während die restliche Wand sich aus mehreren Layern (Baustofftyp) mit m Knoten zusammensetzen kann. Die k-Werte müssen für die jeweilige Schicht angepasst sein.</i>	55
3.4	<i>Vergrößerte Darstellung des TWD-Wand-Moduls in ColSim.</i>	57
3.5	<i>Ergebnis eines Vergleiches von dynamischer Simulation einer TWD-Wand mit Messwerten für einen Zeitabschnitt von 24 h.</i>	57
3.6	<i>IR-Aufnahme der inneren Wandoberfläche einer Wand mit zwei TWD-Elementen (15:00 Uhr). Erkennbar ist der drei-dimensionale Wärmeleitungseffekt.</i>	58
3.7	<i>Beispiel eines Temperatur/Enthalpiediagrammes für ein Kilogramm reines Paraffin (PCM) mit einer Schmelztemperatur von ca. 26°C. Die Kennlinie für Wasser ist zum Vergleich mit aufgetragen.</i>	59
3.8	<i>Wenn Schmelztemperatur und Erstarrungstemperatur sich unterscheiden, ergibt sich im Temperatur/Enthalpie-Diagramm eine Kennlinie mit Hysterese.</i>	61
3.9	<i>Simulationsrechnungen eines 1-Zonenmodells mit und ohne Phasenwechselmaterial im Innenputz der vier Wände. (Die durchgezogenen Kurven zeigen den Verlauf ohne PCM, die Marker den entsprechenden Verlauf mit PCM.)</i>	62
3.10	<i>Bei der Simulation des Referenzraumes (Innenputz ohne Phasenwechselmaterial) wird zuerst das Modell an den realen Testraum angepasst. Es zeigt sich eine gute Übereinstimmung der Temperaturverläufe für Raumluft- und Putztemperatur über den gegebenen Zeitraum.</i>	64

3.11	Mit dem Setzen der spezifischen Kennwerte für den PCM-Putz, kann eine Simulation durchgeführt werden, deren Ergebnisse vergleichend mit den Messergebnissen aus der Kabine mit PCM-Innenputz hier dargestellt ist. Wieder zeigt sich eine gute Übereinstimmung der Temperaturverläufe für Raumluft- und Putztemperatur über den gegebenen Zeitraum. Der Moment des Aggregatswechsels offenbart die Vereinfachung im Modell. Die konstant angenommene Schmelztemperatur (konstant bei $26\text{ }^{\circ}\text{C}$) entspricht nicht der Realität. Laut Messung findet der Phasenwechsel in einem Temperaturbereich von ca. 2 Kelvin ($25\text{-}27\text{ }^{\circ}\text{C}$) statt.	65
3.12	RC-Ersatzschaltbild des Heizkörpermodells in ColSim in einer Diskretisierung mit m Knoten. \dot{Q}_{in} wird zunächst auf den gemeinsamen Knotenpunkt von Wärmeträgermedium und Heizkörperelement abgelegt. Daraufhin folgt die getrennte Abgabe (konvektiv und radiativ) der Wärme an den Raum.	68
3.13	Darstellung zur grafischen Realisierung des Heizkörpermodells in XFIG und die dazugehörige Parameterliste.	68
3.14	Vergleich von Simulationsergebnissen zur Austrittstemperatur mit Messwerten des ISE Systemteststandes. Volumenstrom und Vorlauftemperatur werden variabel vorgegeben, während die Raumtemperatur nahezu fest zwischen $23\text{-}25\text{ }^{\circ}\text{C}$ liegt (stationäre Bedingungen).	69
3.15	Vergleich von Simulationsergebnissen für dynamisches Beladen und Auskühlen des Heizkörpers mit Messwerten.	70
3.16	Sprungantwort der Wohnzone, die mit PCM-Innenputz versehen ist, auf einen Temperatursprung der Umgebungstemperatur von 10 auf $30\text{ }^{\circ}\text{C}$. Die dünne rote Linie ohne Einbruch zeigt das Verhalten der gleichen Zone ohne PCM-Putz.	72
3.17	Modular aufgebautes Simulationsmodell des untersuchten Systems: Zwei Zonen mit insgesamt 12 Wandelementen, die die modernen passiven Entwicklungen beinhalten, der solaren Kombianlage bestehend aus Kollektor, Wärmetauscher, Pufferspeicher und Nachheizeinrichtung, sowie Trinkwasserkreis und Heizkreis mit zwei Wärmeübertragern.	74
3.18	Die Übertragung der Kreisbewegung mit Kreisfrequenz ω auf eine Linearbewegung bewirkt die Sinusschwingungen mit den Amplituden \hat{X}_e und \hat{X}_a . Die Ausgangsschwingung ist um den Phasenwinkel φ verschoben.	75
3.19	Antwort der empfundenen Raumtemperatur auf die periodische Erregung der Umgebungstemperatur. Erkennbar ist die Dämpfung im Verlauf der Antwort (bedingt durch die thermische Masse des Gebäudes), sowie die Phasenverschiebung φ zum Erregungssignal die zwischen 60° und 71° liegt.	77
3.20	Antwort der empfundenen Raumtemperatur und der TWD-Außenwandtemperatur auf die sinusförmige Schwingung der globalen Solarstrahlung auf die transparente Wärmedämmung.	78
3.21	Antwort der Raumtemperatur auf die sinusförmige Schwingung der globalen Solarstrahlung auf die nach Süden orientierten Fenster. Die Raumtemperatur zeigt hierbei die schnellste Reaktion.	79

3.22	<i>Antwort der empfundenen Raumtemperatur auf eine periodische Erregung durch die Heizung, sowie auf einen Sprung des Volumenstroms des Heizkreises bei konstanter Heizkreisvorlauftemperatur. Bei der Erregung mit einer harmonischen Schwingung, zeigt die Antwort der Raumtemperatur den nichtlinearen Einfluss des Systems. Aus der Sprungantwort kann die Zeitkonstante mit $T_1 \approx 26$ h bestimmt werden.</i>	80
4.1	<i>Standardisierter, geschlossener Regelkreis mit Stelleinrichtung und dynamischer Strecke in Blockschemadarstellung.</i>	83
4.2	<i>Aufbau der gesamten Regeleinheit mit Prädiktor, Steuereinheit mit Fuzzy-Logik und Heizungsregelung, integriert in den geschlossenen Regelkreis.</i>	88
4.3	<i>Struktur eines modellbasierten Reglers. Internal Model Control (IMC) -Regelkreises nach [40].</i>	90
4.4	<i>Funktionsweise eines prädiktiven Reglers zur Heizenergieeinsparung. (Quelle: Ferguson [21])</i>	91
4.5	<i>Reduziertes Gebäudemodell mit der Abbildung der thermischen Masse und der Charakteristika von TWD und PCM. Dieses Modell wurde in den Regelungsalgorithmus integriert und erlaubt mit Hilfe der Klimavorhersage die prädiktive Regelung des Systems.</i>	92
4.6	<i>Damit der Prädiktor eine Vorhersage treffen kann, benötigt er die Wettervorhersage auf Basis stündlicher Mittelwerte sowie die aktuell gemessene Raumtemperatur. Daraus folgt eine Raumtemperaturprognose für einen festgelegten Prädiktionshorizont. Störungen, die durch Lüftung, Verschattung oder Heizung stattfinden könnten werden nicht berücksichtigt. Das Gebäude wird für die Prognose im "free float"-Zustand betrachtet.</i>	94
4.7	<i>Reaktion des Prädiktors auf die Umgebungstemperatur im Vergleich mit den Simulationsergebnissen des realistischen Simulationsmodells. Als Systemerregung werden Außentemperatursprünge aufgeprägt.</i>	97
4.8	<i>Vergleich von reduzierten- und komplexen Modellen auf Störungen durch das Wetter. Das Diagramm zeigt die dynamische Reaktion des reduzierten Modells. Die Temperaturverläufe der Vorhersage sind um den Prädiktionshorizont verschoben.</i>	98
4.9	<i>Setzt man als "scharfe" Eingangsgrößen z. B. eine Zimmertemperatur von $17,5$ °C um 19.00 Uhr voraus, dann kann über die im Vorfeld festgelegten linguistischen Terme für die Eingangsgrößen eine Bewertung der im Text genannten Prämissen erfolgen. Innerhalb dieser Fuzzifikation wird jeder Verknüpfung des "WENN-Teils" ein Erfüllungsgrad zugewiesen und mit dem MIN-Operator der niedrigste Erfüllungsgrad selektiert. Dieser Wert wird zur Bewertung der Schlussfolgerungen (Konklusion) herangezogen.</i>	100
4.10	<i>Ist eine Bewertung der Schlussfolgerungen erfolgt, wird durch Abschneiden aller aktiven Regeln auf Höhe des Erfüllungsgrades die Ausgangsmenge bestimmt.</i>	100
4.11	<i>Mit der Ermittlung des Flächenschwerpunktes der aus der Inferenz resultierenden Fuzzy-Ausgangsmenge wird eine "scharfe" Ausgangsgröße berechnet. (Defuzzifizierung)</i>	101

4.12 *Darstellung der tolerierten Temperaturen in Abhängigkeit der vom Nutzer gewählten Komfortparameter.* 103

5.1 *Dynamischer Verlauf der empfundenen Raumtemperatur in Abhängigkeit der Störgrößen. Dargestellt sind 20 Tage im März mit einer Soll-Raumtemperatur im Heizfall von 20 °C. Es gibt keine Sonnenschutzvorkehrungen und keine Nachtlüftung, so dass das PCM-Material nicht aktiv entladen werden kann. Die Folge ist eine sehr hohe Raumtemperatur von ca. 30 °C schon nach 2-3 Tagen, die sich durch den solaren Eintrag ergibt.* 108

5.2 *Simulationsergebnisse zum solaroptimierten Gebäude mit **herkömmlicher Heizungsregelung** und **konventioneller Verschattung** für Fenster und TWD. Zusätzliche **Nachtlüftung** ermöglicht das Entladen des Latentmaterials. Diagramme a) u. b) zeigen Jahresdauerlinien der empfundenen Raumtemperatur und der Temperatur des PCM-Putzes in Abhängigkeit der Komfortvorgabe. Die Tabelle zeigt Energien und Betriebszeiten, Diagramm d) den dynamischen Verlauf über mehrere Tage.* 112

5.3 *Simulationsergebnisse zum solaroptimierten Gebäude mit Regelung der Stellglieder über **Prädiktor** und **Fuzzy-Logik**. Diagramme a) u. b) zeigen Jahresdauerlinien der empfundenen Raumtemperatur und der Temperatur des PCM-Putzes in Abhängigkeit der Komfortvorgabe. Die Tabelle zeigt Energien und Betriebszeiten, Diagramm d) den dynamischen Verlauf über mehrere Tage.* 115

5.4 *Simulationsergebnisse zum solaroptimierten Gebäude mit Regelung der Stellglieder über **Prädiktor**, **Fuzzy-Logik** und **Heizkreisregelung** über eine witterungsgeführte Rücklauftemperatur. Diagramme a) u. b) zeigen Jahresdauerlinien der empfundenen Raumtemperatur und der Temperatur des PCM-Putzes in Abhängigkeit der Komfortvorgabe. Die Tabelle zeigt Energien und Betriebszeiten, Diagramm d) den dynamischen Verlauf über mehrere Tage.* 117

5.5 *Dynamischer Verlauf der Raum- (links) und PCM-Wandtemperaturen (rechts) für unterschiedliche Parameter, Regelungskonzepte und Jahreszeit (oben:März; unten: Juli). 1. Raum ohne PCM und ohne Verschattungseinrichtung für TWD und Fenster sowie Nachtlüftungsmöglichkeit 2. Raum mit PCM und ohne Einrichtungen 3. Raum mit PCM und Verschattungseinrichtung Fenster 4. Raum mit PCM und herkömmlicher Regelung aller Verschattungseinrichtungen und der Nachtlüftung 5. wie 4. jedoch mit Regelung der Einrichtungen über Prädiktor und Fuzzy-Logik.* 119

5.6 *Häufigkeitsverteilung der empfundenen Raumtemperatur der Wohnzone in 0,5 Kelvin-Schritten. 1. Raum mit PCM; keine Wärmeschutzvorkehrungen 2. Raum mit PCM; herkömmliche Regelung aller Verschattungseinrichtungen und der Nachtlüftung 3. wie 2. jedoch mit Regelung der Einrichtungen über Prädiktor und Fuzzy-Logik 4. wie 3 mit zusätzlicher Rücklauftemperaturbegrenzung im Heizkreis.* 120

5.7 *Beispiel zur vorzeitigen Abschaltung der Heizung durch den Prädiktor aufgrund zu erwartender passiver Gewinne. Das frühe Abschalten führt zu einer geringeren Raumtemperatur und damit in Folge zu einem vorzeitigen Heizenergiebedarf. Die Vergleichskurven für eine herkömmliche Regelung sind mit eingetragen.* 121

A.1	<i>Modular aufgebautes Simulationsmodell einer Zone mit 5 Wänden, einer Bodenplatte und Dach, sowie ein einfaches Heizsystem bestehend aus Brenner, Pumpe und Heizkörper. Weitere Elemente sind ein Online-Plotter und der Wetterdaten-Reader. Die Abbildung zeigt die Realisierung des Simulationsdeks mit Hilfe des Vektorgrafikprogramms XFIG.</i>	131
A.2	<i>Tangentenverfahren nach Euler (Polygonzugverfahren). Die Zeitachse wird in aquidistante Intervalle unterteilt, so dass an diesen Stützpunkten über die Tangenten (bekannter Differentialquotient) die Folgepunkte bestimmt werden können. Für hinreichend kleine Zeitschrittweiten $h \ll \tau$ folgt die ermittelte Näherung dem Verlauf der Exponentialfunktion.</i>	134
A.3	<i>Einfaches thermisches Ersatzschaltbild des Wandmodells (RC-Netzwerk) mit Bauelementen, die in Analogie zum elektrischen Ersatzschaltbild verwendet werden. Zur Aufstellung der Systemgleichungen wendet man die Kirchhoff'schen Regeln für die Knoten und Maschen des Netzwerkes an.</i>	136
B.1	<i>Tagesgang der Heizlast, oben: leichtes Gebäude, unten: schweres Gebäude</i>	143
B.2	<i>Tagesgang der Raumtemperatur ohne Heizung und Kühlung, oben: leichtes Gebäude, unten: schweres Gebäude</i>	144
B.3	<i>Jahresheizwärmebedarf im Vergleich mit den BESTEST Referenzprogrammen</i>	145
B.4	<i>Jahreskältebedarf im Vergleich mit den BESTEST Referenzprogrammen</i>	145
B.5	<i>Tagesgang der Einstrahlung auf die Südwand, oben: klarer Tag, unten: dunstiger Tag</i>	146
B.6	<i>Tagesgang der Einstrahlung auf die Westwand, oben: klarer Tag, unten: dunstiger Tag</i>	147
C.1	<i>Anlagenschema der solarunterstützten Heizanlage des Mehrfamilienhauses in Gundelfingen. Das kleine Bild zeigt ein Modell des Hauses mit Blick auf die Südfassade und den eingesetzten TWD-Elementen.</i>	150
C.2	<i>Kumulierte Tagesenergien des Gebäudes für die Jahre 1999-2001.</i>	151
C.3	<i>Bilanzierung der Wärmeströme im "Solarhaus Gundelfingen" differenziert nach Bedarf und Deckung.</i>	154
C.4	<i>Verlauf der relativen Luftfeuchten mit den jeweiligen mittleren Temperaturen über die Heizperiode 1999/2000. Grundlage sind Tagesmittelwerte.</i>	156
C.5	<i>Täglich zugeführte und abgeführte Wassermenge durch das Abluftsystem.</i>	156
C.6	<i>Flächendarstellungen des Heizbedarfs für die Heizperiode 1999/2000 in Abhängigkeit der Einstrahlung und der Temperatur.</i>	157
C.7	<i>Betrachtung der spezifischen Heizleistung über eine Jahresdauerlinie. Vergleich realer Messwerte mit berechneten Werten, die sich aus Außentemperatur und typischer Heizkennlinie ergeben.</i>	158
C.8	<i>Bilderauswahl aus den 260 Thermografieaufnahmen einer Rauminnenwand mit TWD. Unten ist ein Zeitdiagramm dargestellt, welches weitere wichtige Zustandswerte zum Zeitpunkt der Aufnahme aufzeigt. (Die Bilder sind vom zweiten Tag.)</i>	159
C.9	<i>vergrößertes Einzelbild der Thermografieaufnahmen</i>	160

C.10	<i>Oberflächentemperaturverlauf der Innenwand mit TWD-Element über drei Tage mit neun Messpunkten (vgl. Abb. C.9).</i>	161
C.11	<i>Vergleich von Temperaturverläufen im Heizkreis und im Pufferspeicher bei unterschiedlicher Regelung.</i>	163
C.12	<i>Elektrischer Energieverbrauch der Heizungspumpe pro Tag. Mit Einsatz der Regelung über die Rücklauf­temperatur, kann der elektrische Energieverbrauch der Umwälzpumpe um 60 % gesenkt werden.</i>	164

Tabellenverzeichnis

2.1	<i>Typische Kennwerte für Verglasungen.</i>	14
2.2	<i>Vergleich der Speichereigenschaften von Wasser und Paraffin. Deutlich wird die hohe Speicherfähigkeit, die im Phasenwechsel begründet liegt. Während beim Phasenwechsel die Materialtemperatur nicht ansteigt, bedeutet eine entsprechende Wärmezufuhr im sensiblen, flüssigen Zustand eine deutliche Temperaturzunahme.</i>	17
2.3	<i>Einflussgrößen auf die Behaglichkeit nach Frank [23]. Die nach Fanger [18] wesentlichen Einflussgrößen sind die Lufttemperatur, die Temperatur der Umschließungsflächen, die Luftgeschwindigkeit, die Luftfeuchte, der Aktivitätsgrad und die Art der Bekleidung.</i>	23
3.1	<i>Jahresheizwärmebedarf im Vergleich mit den Referenzprogrammen. Die jeweils höchsten und niedrigsten Verbräuche sind “fett” geschrieben. (Weitere Erläuterungen sind im Anhang B zu finden.)</i>	53
3.2	<i>Beschreibung des Innenputzes für den Referenzraum ohne PCM und die identische Kabine mit mikroverkapselten Paraffin im Putz.</i>	63
3.3	<i>Auslegungsbeschreibung der an das solaroptimierte Wohngebäude gekoppelten aktiven, thermisch-solaren Heizanlage für Trinkwasser und Heizung.</i>	73
4.1	<i>Gegenüberstellung der Parameterwahl von reduziertem und komplexen Modell.</i>	97
5.1	<i>Ergebnisse zur Variation des Stellwertes zur Verschattung der Südfenster. Der Referenzfall beschreibt das Gebäude mit fehlender Einrichtung zum Sonnenschutz.</i>	109
5.2	<i>Ergebnisse zur Variation des Stellwertes der TWD-Verschattung. Der Referenzfall beschreibt das Gebäude ohne Einrichtungen zum Wärmeschutz.</i>	110
5.3	<i>Einfluss der “Nachtlüftung” und deren Auswirkung auf das Gebäudeverhalten.</i>	111
5.4	<i>Robustheitsbewertung der Regelungskonzepte durch Variation von Streckenparametern. Vergleich von konventioneller Regelung mit übergreifendem Prädiktor-Fuzzy-Konzept. (Die Prozent-Angaben geben die relativen Veränderungen zum jeweiligen konventionellen Fall an.)</i>	123
A.1	<i>Elementarübertragungsglieder aus elektrischen und thermischen Systemen.</i>	135

B.1	<i>Wandaufbauten des leichten Gebäudes (von innen nach außen)</i>	141
B.2	<i>Wandaufbauten des schweren Gebäudes (von innen nach außen)</i>	141
B.3	<i>Gegenüberstellung der Basisfälle</i>	142
C.1	<i>Auflistung der Gesamtenergien, die sich aus der Bilanzierung ergeben, zum einen für die Heizperiode 99/00 und zum anderen für den Messzeitraum eines Jahres vom 1. August 1999 bis 31. Juli 2000.</i>	154

