

Forschungsprogramm "Rationelle Energienutzung in Gebäuden"

Neurobat – Neuronaler Heizungsregler Schlussbericht Phase II



J. Bichsel, Sauter S.A.
J. Krauss, CSEM S.A.
M. Bauer, ESTIA S.A.R.L.
N. Morel, LESO / EPFL

Im Auftrag des
Bundesamtes für Energie

September 2000

Projekt:

NEUROBAT II:
Neurofuzzy-Heizungsregler

Projekt-Dauer:

31.11.1998 - 27.09.2000

BfE Projektverantwortlicher:

M.Stettler
BFE
Abteilung „Haustechnik“
3003 Bern / BE
Tel.: 031 / 322 55 53

F&E Projektverantwortlicher:

J.Bichsel
SAUTER S.A.
Abteilung „Controls Division“
4016 Basel / BS
Tel.: 061 / 695 56 30

F&E Projekt-Partner (mit Kontaktpersonen):

SAUTER S.A.
R.Jenny
Im Surinam 55
4016 Basel / BS

CSEM S.A.
J.Krauss
Jaquet-Droz 1
2007 Neuchâtel / NE

ESTIA S.a.r.l.
M.Bauer
PSE-B - Parc Scientifique de l'EPFL
1015 Lausanne / VD

LESO-PB/EPFL
N.Morel
1015 Lausanne / VD

Expertengruppe:

M.Brückner
Graf&Reber
Arnold-Böcklin Strasse 19
4051 Basel / BS

J.-C. Hadorn
Chef de Programme 'Chaleur Solaire'
1035 Bournens / VD

Inhaltverzeichnis

1.	Einleitung	3
1.1	NEUROBAT I: Resultatsübersicht	3
1.1.1	Konzept	3
1.1.2	Simulationsstudie	4
1.1.3	Testresultate	5
1.2	Projektzielsetzung NEUROBAT II	6
2.	Technische Spezifikation: NEUROBAT Heizungsregler.....	8
2.1	Evaluation der Rechenplattform.....	8
2.2	Globales Design der NEUROBAT Controller Software	11
2.3	H/W Realisierung	12
3.	Optimierung NEUROBAT Regelalgorithmus.....	13
3.1	NEUROBAT Inbetriebnahmeprozedur.....	13
3.1.1	Meteo Service-Eingabeparameter Sensitivitätsanalyse	13
3.1.1.1	<i>Sensitivitätsanalyse auf Funktionsniveau.....</i>	<i>14</i>
3.1.1.2	<i>Sensitivitätsanalyse auf Prädiktionsniveau:</i>	<i>16</i>
3.1.1.3	<i>Sensitivitätsanalyse auf Reglerniveau:</i>	<i>16</i>
3.1.2	Gebäude Service-Eingabeparameter Sensitivitätsanalyse.....	17
3.1.2.1	<i>Gebäudetypensensitivität</i>	<i>19</i>
3.1.2.2	<i>Sensitivitätsstudie betreffend der Gebäudedimensionen</i>	<i>21</i>
3.1.2.3	<i>Sensitivitätsstudie betreffend P_{MAX}.....</i>	<i>21</i>
3.1.3	Schlussfolgerung Service-Parameter.....	23
3.2	Benutzer-Eingabeparameter	25
3.2.1	Schlussfolgerung	25
3.3	Optimierung der NEUROBAT Reglermodule	26
3.3.1	Gebäudemodell	26
3.3.1.1	<i>Aktualisierung des Gebäude-Datenspeichers</i>	<i>27</i>
3.3.1.2	<i>Schlussfolgerung der beschleunigten Lernphase.....</i>	<i>38</i>
3.3.2	Klimamodell.....	39
3.3.2.1	<i>Modelloptimierung</i>	<i>39</i>
3.3.2.2	<i>Datenspeicheroptimierung</i>	<i>40</i>
3.3.3	Schlussfolgerung	43
3.4	Heizungsreglerversion	44
3.4.1	Einführung	44
3.4.2	Reglerversion ohne Sonnenfühler.....	44
3.4.2.1	<i>Heizungsregler-Betriebsleistung ohne Sonnenfühler</i>	<i>46</i>
3.4.2.2	<i>Schlussfolgerung</i>	<i>47</i>
3.4.3	„Low-Cost“-Reglerversion ohne Raum- und Sonnenfühler.....	47
3.4.3.1	<i>Einführung</i>	<i>47</i>
3.4.3.2	<i>Schätzalgorithmus mittels der Identifikation der Modellparameter.....</i>	<i>50</i>
3.4.3.3	<i>Rekonstruktion der Raumtemperatur mittels Schätzung</i>	<i>53</i>
3.4.3.4	<i>Empirische Rekonstruktion der Raumtemperatur.....</i>	<i>55</i>
3.4.3.5	<i>Schlussfolgerung</i>	<i>59</i>
3.4.4	Datenevaluation der „Low-Cost“ Reglerversion.....	60
3.4.4.1	<i>Evaluationbasis I: Chemin des Libellules</i>	<i>60</i>
3.4.4.2	<i>Evaluationbasis II: Münchenstein (Testgebäude Im Weissgrien).....</i>	<i>63</i>

3.4.5	Schlussfolgerung	72
3.5	Kontroll- und Ueberwachungsfunktionen.....	73
3.6	Installationsprozedur – Durchflussbestimmung	74
3.6.1	Prozedur ohne Temperaturmessfehler.....	75
3.6.2	Prozedur mit korrigierten Temperaturmessfehler	75
3.6.3	Kalibrierungszeitkonstanten.....	76
3.6.4	Evaluationsdaten	76
4.	NEUROBAT Prototypenentwicklung.....	79
4.1	Heizungsregler-Spezifikationen und Benutzerschnittstelle	79
4.2	H/W-Design	80
4.3	S/W Implementation	82
5.	NEUROBAT Testphase	85
5.1	Beschreibung der Test-Installationen.....	85
5.1.1	Test-Installation in Basel.....	85
5.1.2	Test-Installation in Lausanne	89
5.2	Datenevaluations-Methoden	91
5.3	Datenevaluation der Testphase IIA (kommerzieller SAUTER Regler)	93
5.3.1	Regelparameter-Einstellungen und Analyse der Gebäudethermik.....	93
5.3.2	Funktionsanalyse während der Winterperiode	95
5.3.3	Funktionsanalyse der Ferienabwesenheit.....	97
5.3.4	Funktionsanalyse der täglichen Absenkung.....	99
5.3.5	Funktionsanalyse während einer Zwischensaison	100
5.3.6	Funktionsanalyse gegen Ende der Heizsaison	102
5.3.7	Leistungsbilanz des kommerziellen SAUTER Reglers (QRK 151)	104
5.3.8	Schlussfolgerung Testphase IIA	107
5.4	Datenevaluation der Testphase IIB (NEUROBAT Heizungsregler).....	108
5.4.1	NEUROBAT-S/W Versionenübersicht.....	108
5.4.2	NEUROBAT Evaluationsmethoden.....	109
5.4.3	Funktionsanalyse der Inbetriebnahmeprozedur	109
5.4.4	Funktionsanalyse bei Abwesenheit.....	111
5.4.5	Funktionsanalyse in der Zwischensaison.....	113
5.4.6	Direkter Betriebsvergleich SAUTER- und NEUROBAT-Regelung.....	114
5.4.7	Leistungsbilanz des NEUROBAT Heizungsreglers	116
5.5	Schlussfolgerung Testphase IIB	118
6.	Schlussfolgerung und Ausblick.....	120
6.1	Zusammenfassung	120
6.2	Ausblick	121
	Literaturhinweise	123

1. Einleitung

Das vorliegende Dokument entspricht dem Schlussbericht des Projektes NEUROBAT, Phase II. Als Einführung zur Resultatsübersicht sollen die Resultate des Projektes NEUROBAT, Phase I zusammengefasst werden und die Zielsetzungen des NEUROBAT Projektes, Phase II, erörtert werden.

1.1 NEUROBAT I: Resultatsübersicht

Im Sinne der Förderung von betriebsoptimierenden Massnahmen für HLK-Anlagen verfügen die auf dem Markt erhältlichen regeltechnischen Produkte über adaptive Regelstrukturen, moderne Algorithmen für die Start/Stop-Prozedur und benutzerorientierte Bedienungsflächen. Allen regeltechnischen HLK-Produkten gemeinsam ist das Konzept des Regelsystems, welches auf vordefinierten Heizkurven basiert und welche in einen erhöhten Aufwand betreffend der Inbetriebnahme und des Unterhaltes der HLK-Anlage resultiert. Im Hinblick auf diese Problematik entwickelte das CSEM und das LESO-EPFL im Auftrag des BfE (Bundesamt für Energie) ein prädiktives, auf neuronalen Netzwerken und der Fuzzy Logik basierendes Heizungsregelsystem [1].

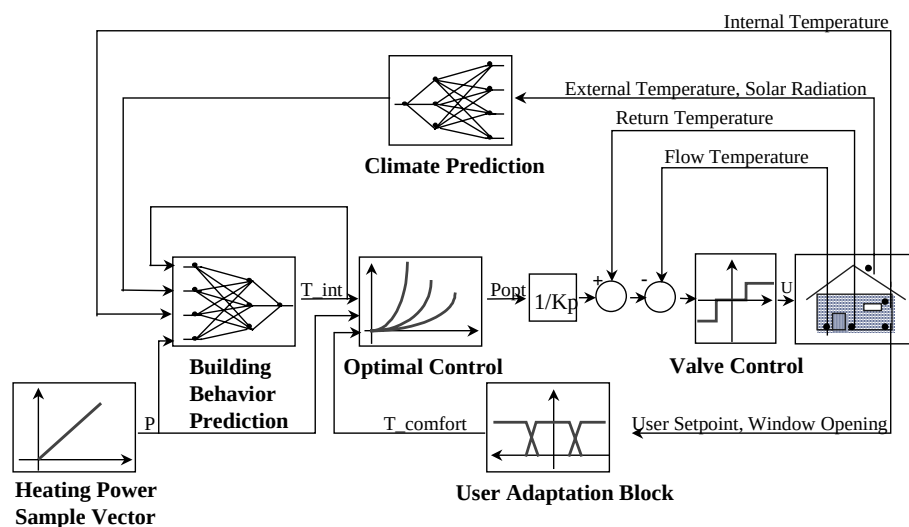
Der aus einer extensiven Simulationsstudie resultierende neuro-fuzzy Heizungsregler, wurde während zweier Heizperioden in Büroräumlichkeiten des LESO-PB/EPFL getestet und mit den Betriebsdaten eines kommerziellen, fortgeschrittenen Heizungsreglers verglichen. Als Einführung zum vorliegenden technischen Zwischenbericht sollen im folgenden die Projektergebnisse von NEUROBAT 1 zusammengefasst werden.

1.1.1 Konzept

Im Vergleich zu den heute eingesetzten Heizungsreglern, welche die Vorlauftemperatur des Heizkreises aufgrund von vordefinierten Heizkurven ('open loop control' wie z.B. für Zentralheizungsregler) respektive mittels einer Rückführung der Raumtemperatur ('closed loop control' wie z.B. für Raumheizungsregler) regeln, basiert das NEUROBAT Regelkonzept auf der Optimierung der Heizleistung über einen vordefinierten Zeithorizont. Der NEUROBAT Regler optimiert dabei eine Kostenfunktion mit dem Benutzerkomfort sowie dem Energieverbrauch als Funktionskomponenten.

Den fortgeschrittenen herkömmlichen HLK-Regelsystemen gleich, stehen dem NEUROBAT Regler die Aussentemperatur, die Sonneneinstrahlung, die Raumtemperatur, die Vorlauf- und die Rücklauftemperatur als Sensorsignale zur Verfügung. Optional kann das NEUROBAT Regelkonzept ohne Sonneneinstrahlungs-Sensor sowie mit einer zusätzlichen Messung der Präsenz des Benutzers betrieben werden.

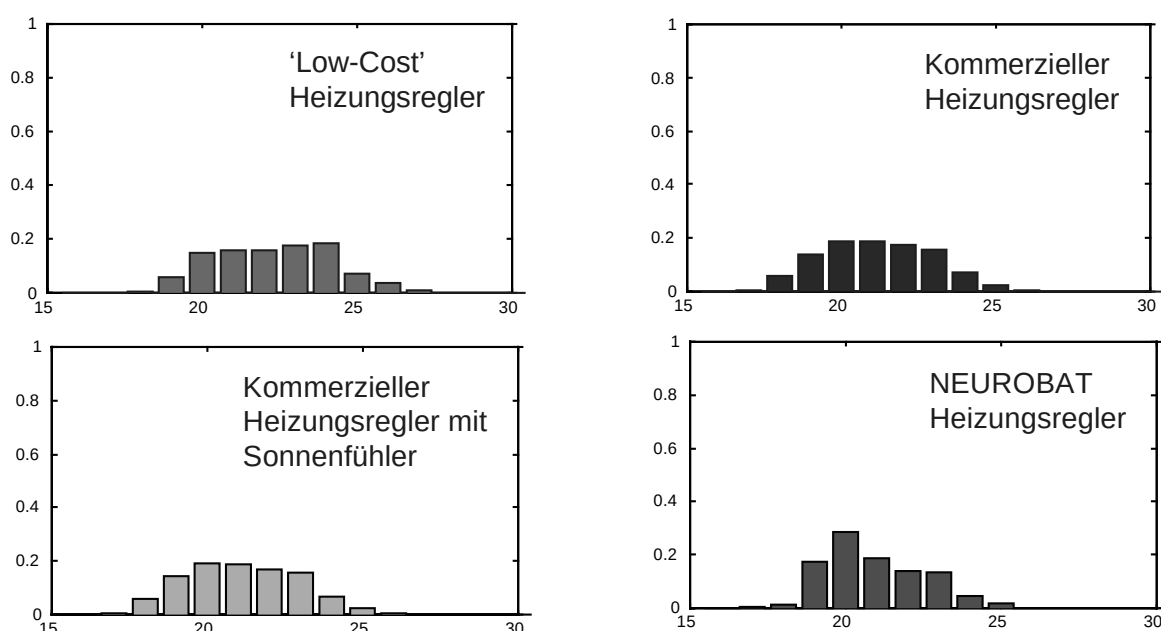
Dem prädiktiven NEUROBAT Regelkonzept eigen ist ein neuronales Klimavorhersagemodul (Vorhersage der Aussentemperatur und Sonneneinstrahlung) und ein neuronales Gebäudethermikmodell. Diese zentralen Regelmodule ermöglichen ein besseres Managements der Fremdwärme (Sonneneinstrahlung, Abwärme von Mensch und Maschine), die Adaptation der Regelparameter in Abhängigkeit der Präsenz und des Verhaltens der Benutzer, sowie eine einfache und kostensparende Inbetriebnahme. Die Erweiterung des NEUROBAT Regelkonzeptes durch einen Mischventilregelkreis gewährleistet eine einfache Schnittstelle mit herkömmlichen HLK-Regelsystemen. Die einfache Realisierung des NEUROBAT Reglers geschieht mittels der Ersetzung der Regelungs- und Steuerungssoftware von herkömmlichen HLK-Regelsystemen. Figur 1 zeigt das Konzept des während der Phase 1 entwickelten NEUROBAT Heizungsreglers.



Figur 1: Heizungsreglerkonzept NEUROBAT

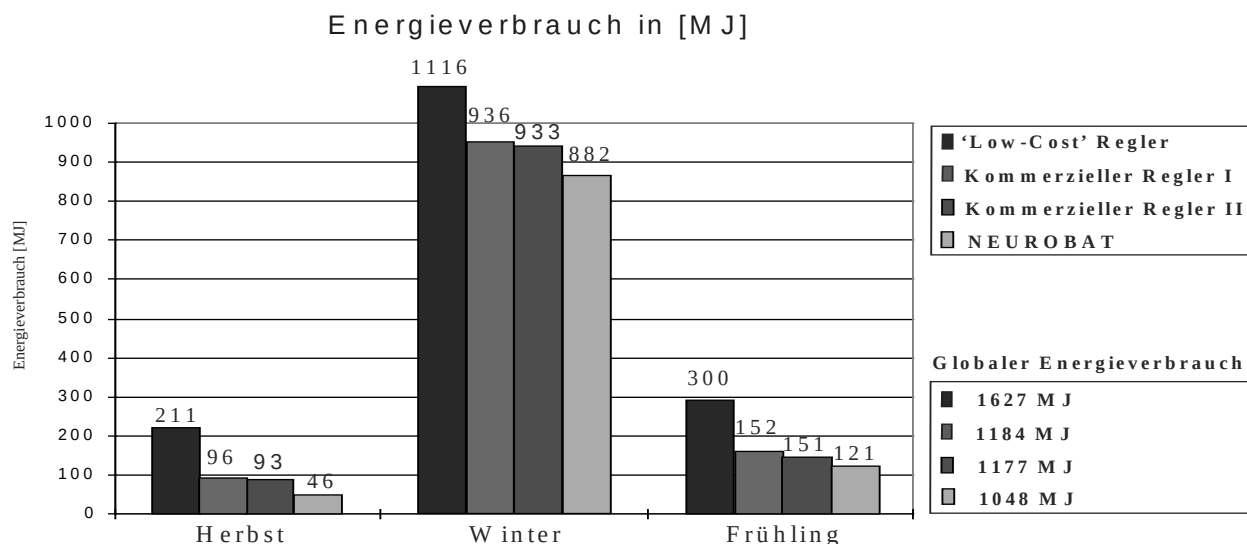
1.1.2 Simulationsstudie

Der NEUROBAT Heizungsregler wurde auf einer MATLAB Simulationsplattform entwickelt, implementiert und getestet. Die Simulationsumgebung basiert auf einem 30-knotigen Gebäudemodell und ermöglicht die Definition von Randbedingungen, wie z.B. die Position der Fensterblenden, die Präsenz der Benutzer, die künstlichen Lichtverhältnisse usw.. Das mit reellen Meteorodaten arbeitende Simulationspaket wurde mit Hilfe der Firma SAUTER durch einen 'Low-Cost' Heizungsreglers, sowie durch zwei moderne, adaptive mit dem Start/Stop-Algorithmus und der Raumtemperaturumschaltung ausgerüsteten Heizungsreglern erweitert (eine der kommerziellen Reglerversionen arbeitet mit einem aufgeschalteten Sonnenfühler). Figur 2 sowie Figur 3 fassen die Resultate dieser Simulationsstudie zusammen. Mittels des prädiktiven NEUROBAT Heizungsreglers kann der Energieverbrauch mit einem vergleichbaren bzw. optimierten Benutzerkomfort wesentlich reduziert werden.



Figur 2: Benutzerkomfort der simulierten Heizungsreglerversionen im Vergleich

Die Simulationsdaten zeigen einen globalen Energiegewinn von 11%, wobei gerade in den Zwischensaisons mit dem Einsatz von NEUROBAT eine Energieeinsparung von bis 30% (Frühling) und mehr (Herbst) im Vergleich zum modernen, adaptiven Heizungsregler erreicht wird. Erwähnenswert ist die in Figur 3 dargestellte globale Energieeinsparung von 40% mittels NEUROBAT im Vergleich zu häufig eingesetzten 'Low-Cost' Heizungsreglern, welche die Vorlauftemperatur des Heizkreises aufgrund den Messdaten der Aussentemperatur und vordefinierten Heizkurven bestimmen.



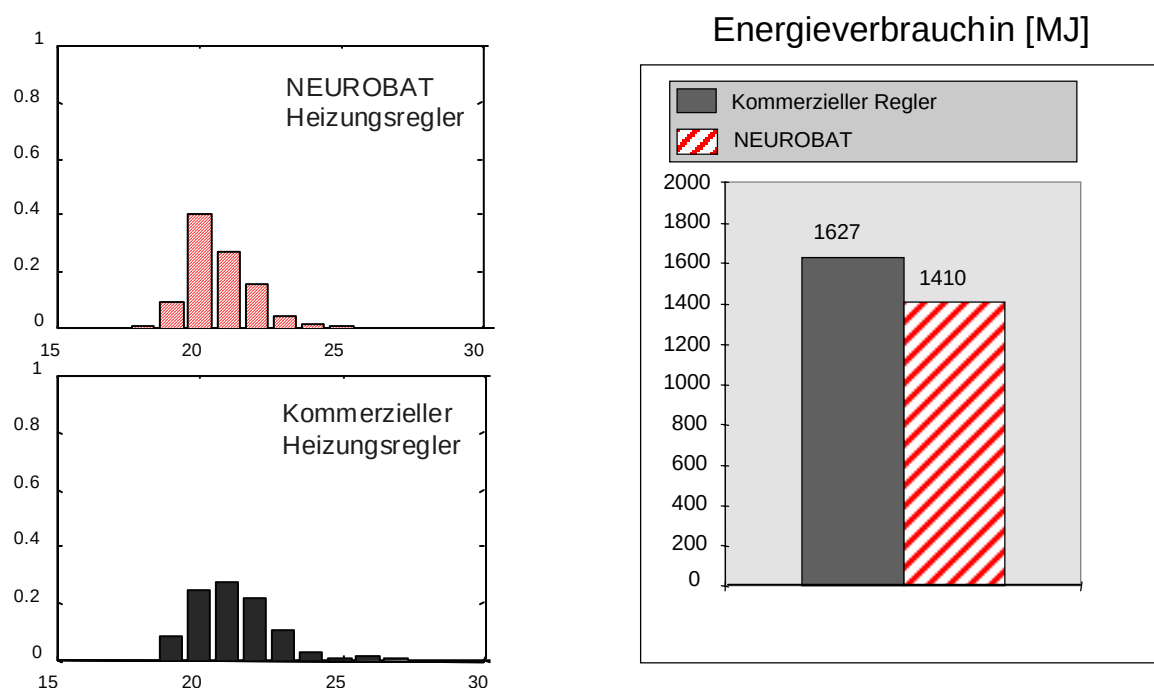
Figur 3: Energieverbrauch der simulierten Heizungsreglerversionen im Vergleich

1.1.3 Testresultate

Das NEUROBAT Regelkonzept wurde während zweier Heizperioden ('96/'97 und '97/'98) in Büroräumlichkeiten des LESO-PB/EPFL getestet und mit den Betriebsdaten eines kommerziellen, adaptiven und mit dem Start/Stop-Algorithmus und einer Raumtemperaturaufschaltung ausgerüsteten Heizungsreglers verglichen. Zwei thermisch unabhängige Büroräumlichkeiten von gleicher Dimension und Orientierung wurden mit zwei unabhängigen Heizkreisen ausgerüstet. Die Kommutierung der Heizungsregelsysteme mittels eines eingebauten Schalters ermöglichte den fairen Vergleich der Betriebsdaten der beiden HLK-Regelsysteme (regelmässiges Umschalten nach einem Zeitraum von 3 Wochen). Damit konnte das für den Betrieb eines Heizungsregelsystemes entscheidende Verhalten der Benutzer teilweise kompensiert werden. Die im folgenden dargestellten Testresultate entsprechen den gemittelten Heizdaten einer Heizperiode (Dez.'96-Dez.'97), d.h. die Betriebsdaten des NEUROBAT respektive des kommerziellen Heizungsreglers wurden unabhängig der Büroräumlichkeit aufsummiert.

Figur 4 illustriert die Quantifizierung des Komforts sowie den Energiekonsum während einer Heizperiode im Vergleich. Das Histogramm der Raumtemperaturen (in °C) im linken Graph von Figur 4 entspricht der während einer Heizsaison gemessenen durchschnittlichen Raumtemperatur während der Benutzerpräsenz. Der Sollwert der Raumtemperatur wurde für die beiden Regelsysteme auf 20°C während der Präsenzzeit des Benutzers festgelegt. Das Zeitprogramm der beiden Heizungsregler entspricht einer Benutzerpräsenz von 8 bis 18 Uhr während den Wochentagen und einer Abwesenheit während den Wochenenden (Bürozeiten-Zeitprogramm). Der Graph rechts in Figur 4 fasst den Energiekonsum während der Heizperiode Dez.'96-Dez.'97 zusammen und zeigt den totalen Energieverbrauch der Heizungsregelsysteme der beiden Räumlichkeiten in MJ aufsummiert. Die Graphik bestätigt die Resultate der Simulationsphase, welche eine Einsparung des Energieverbrauches von

11% errechnete. Im vorliegenden Testfall konnte eine Energieeinsparung von 13% gemessen werden.



Figur 4: Testdaten des Benutzerkomforts und des Energieverbrauches im Vergleich

1.2 Projektzielsetzung NEUROBAT II

Die Phase II des NEUROBAT Projektes zielt im Hinblick auf ein zukünftiges HLK-Reglerprodukt auf eine Umsetzung des in der Phase I konzipierten Regelalgorithmus ab. Dabei soll im Besonderen die Realisierbarkeit des NEUROBAT Regelkonzeptes auf einer industriellen Rechenplattform und die Validierung des NEUROBAT Reglers auf einem mehrstöckigen Wohngebäude untersucht werden. Zielsetzung der Untersuchungen des NEUROBAT Projektes, Phase II, sind:

- Optimierung des NEUROBAT Regelalgorithmus im Hinblick auf Installations-Rahmenbedingungen wie z.B. Heizregelsysteme mit mengengeführter Durchflusssteuerung, ohne Raumtemperaturfühler respektive Sonnenfühler, etc.
- Definition und Tests der Inbetriebnahmeprozedur des NEUROBAT-Reglers
- Machbarkeitsanalyse des NEUROBAT Regelkonzeptes im industriellen Kontext
- Validierung des NEUROBAT Zentralheizungsregler-Prototypen auf einem mehrstöckigen Wohngebäude.
- Realisierung eines NEUROBAT Prototypen

Die Machbarkeitsanalyse des NEUROBAT-Regelkonzeptes entspricht der Konzeption und dem Entwurf eines industriell umsetzbaren Zentralheizungsreglers. Die Konzeptions- und Entwurfsphase umfasst die Definition der Benutzer- und Serviceschnittstelle, der Inbetriebnahmeprozedur, der Regleroptionen (mit/ohne Sonneneinstrahlungssensor, mit/ohne Raumfühler etc.) und der Hardware und Software Spezifikationen. Die Analysephase endet mit dem detaillierten Pflichtenheft des NEUROBAT Heizungsreglers.

Die Entwicklungsarbeiten des NEUROBAT Projektes, Phase II, entsprechen der Umsetzung des NEUROBAT Heizungsregelalgorithmus auf einer industriellen Rechenplattform. Der NEUROBAT Heizungsreglerprototyp soll während einer Heizsaison auf einer Zentralheizung

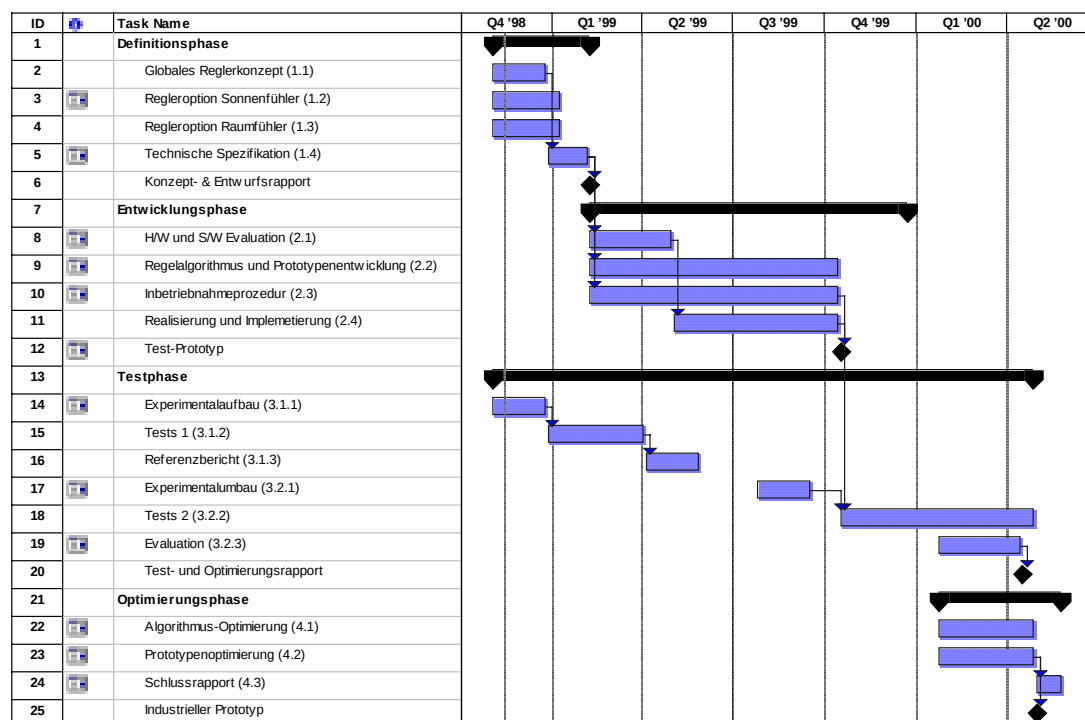
eines Wohngebäudes getestet werden. Hierbei soll eine Kontroll- und Monitorstation die Validierung des NEUROBAT Zentralheizungsregelalgorithmus gemäss vordefinierten Evaluationsprozeduren ermöglichen.

Folgende funktionale Spezifikationen liegen dem NEUROBAT Zentralheizungsregler zugrunde:

- Das NEUROBAT Regelkonzept basiert auf einer neuronalen Modellierung für die Vorhersage von Klimadaten und des Gebäudeverhaltens. Mittels des dynamischen Programmieralgorithmus wird die Kostenfunktion, bestehend aus dem PMV-Komfortfaktor und dem Energieverbrauchsfaktor, minimiert und berechnet die optimale Heizleistung.
- Der NEUROBAT Zentralheizungsregelalgorithmus optimiert die zu lieferenden Heizleistung.
- Der NEUROBAT Zentralheizungsregler entspricht einem selbsteinstellenden und unterhaltsfreien Regelgerät.
- Die Zahl der während der Inbetriebnahme zu definierenden Serviceparameter für einen optimalen Betrieb des NEUROBAT Zentralheizungsreglers ist auf ein Minimum beschränkt (<10).
- Der NEUROBAT Regelalgorithmus ermöglicht den Verbund mit Standard-Schnittstellen von HLK-Regelgeräten, wie Benutzerschnittstelle, Serviceschnittstelle, Stellmotor etc.

Die verwendeten Sensoren des NEUROBAT Zentralheizungsregler entsprechen den Sonden für Aussen-, Innen-, Vorlauf- und Rücklauftemperatur, sowie der Sonneneinstrahlung. Die NEUROBAT Regleroptionen ermöglichen einen Betrieb mit reduzierter Betriebsleistung ohne Raum- respektive Sonnensensor.

Mit Referenz zu dieser Zielsetzung zeigt Figur 5 die Planung des Projektes NEUROBAT, Phase II, unterteilt in Definitionsphase, Entwicklungsphase, Testphase und Optimierungsphase.



Figur 5: Projektplanung Projekt NEUROBAT, Phase II

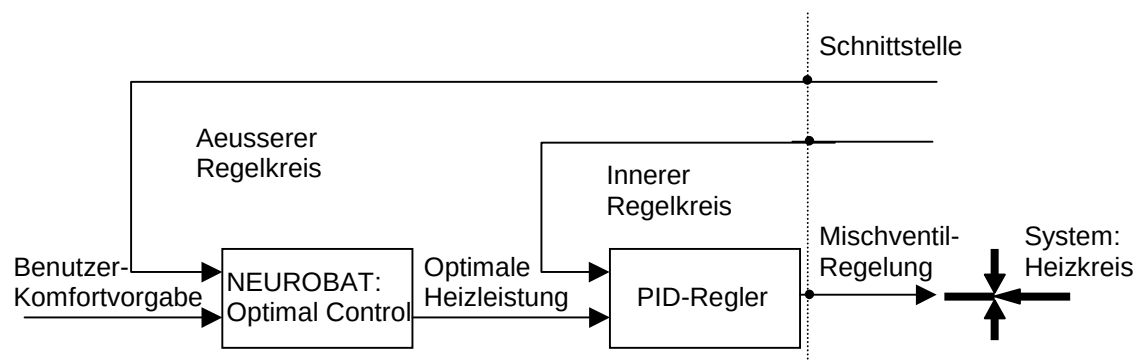
2. Technische Spezifikation: NEUROBAT Heizungsregler

Mit Referenz zu den Anforderungen der Inbetriebnahmeprozedur und der NEUROBAT Regleroptionen des NEUROBAT Heizungsreglers, welche in Kapitel 3.1 und 3.4 zusammengefasst wurden, sollen im vorliegenden Kapitel die Anforderungen an die Hardware evaluiert, das globale Redesign des NEUROBAT Regelalgorithmus konzipiert und die technischen Spezifikationen zusammengefasst werden.

2.1 Evaluation der Rechenplattform

Um eine dem Preis/Leistungsverhältnis entsprechende optimale H/W Plattform zu bestimmen, soll im folgenden die Anforderungen welche sich durch den NEUROBAT Regelalgorithmus ergeben, bestimmt werden.

Global gesehen kann der NEUROBAT Regelalgorithmus in zwei hintereinandergeschaltete Regelkreise schematisiert werden. In Figur 6 ist das globale Blockdiagramm des NEUROBAT Heizungsreglers abgebildet.



Figur 6: Globales NEUROBAT Blockdiagramm

- Der 'innere', nachgeschaltete Regelkreis arbeitet mit einer Tastfrequenz von 0.2 bis 1 Hz und stabilisiert die Vorlauftemperatur des Heizkreises auf die nominale Sollwertvorlauftemperatur. Beim Vorlauftemperaturregler handelt es sich um einen klassischen PI- respektive PID-Regler, welcher in 5 additive und 5 multiplikative Rechenoperationen resultiert. Im Vergleich zum äusseren Regelkreis, dem NEUROBAT Optimal Control Algorithmus, können die Beiträge betreffend Programm-Speicher, Daten-Speicher und Rechenoperationen des inneren Regelkreises vernachlässigt werden.
- Der 'äussere', vorgeschaltete Regelkreis arbeitet mit einer Abtastzeit von 15min und bestimmt die optimale Heizleistung aufgrund eines rechenintensiven, prädiktiven und dynamischen Programmialgorithmus. Betreffend dieses Optimal Control Algorithmus wird im folgenden die Betriebsleistung der H/W Plattform abgeleitet, indem die Anzahl der Rechenoperationen (Additionen, Multiplikationen, Divisionen), der Entscheidungen (if-else statements), des Datenspeichers und des Programmspeichers bestimmt werden.

Bevor die Anforderungen an die Rechenleistung für den NEUROBAT Heizungsregler hergeleitet werden, soll im folgenden die Schnittstelle betreffend des Heizungsreglersalgorithmus bestimmt werden.

Für die Grundversion des NEUROBAT Heizungsreglers werden folgende Eingangs-Sensorsignale benötigt:

Eingangssignal	Anzahl	Analog / Digital	Maximaler Messbereich	Geforderte Auflösung
Vorlauftemperatur	1	A	0°...150°	0.25°
Rücklauftemperatur	1	A	0°...150°	0.25°
Raumtemperatur	Max. 3	A	0°...50°	0.125
Aussentemperatur	1	A	-50 ...50°	0.25°
Sonneneinstrahlung	1	A	0 ...1500 W/m ²	5 W/m ²
Präsenz	1 (opt.)	D	-	-

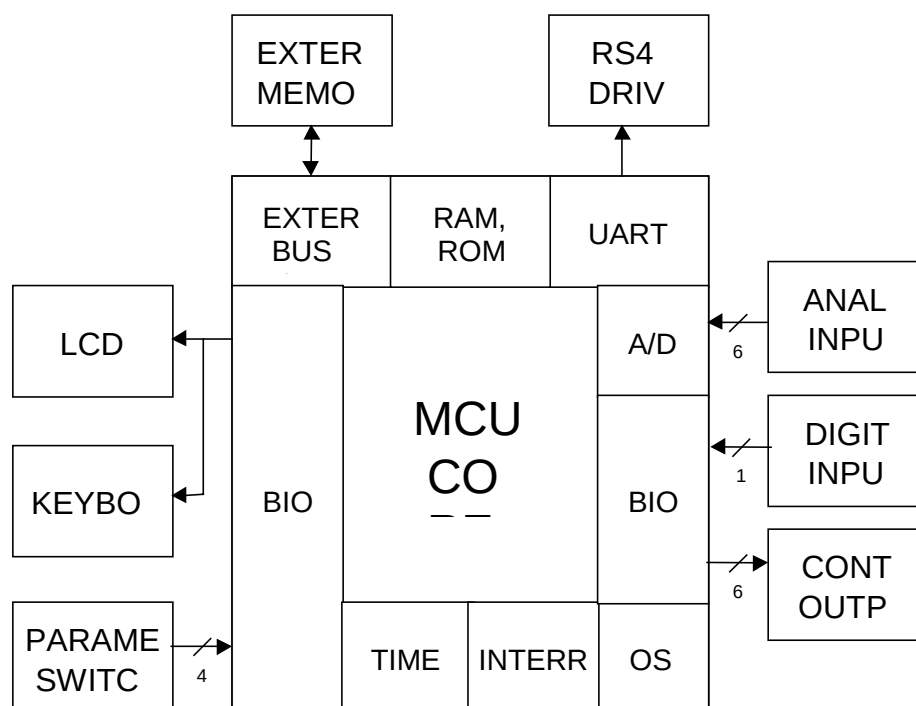
Tabelle 1: Sensor-Eingangssignale des NEUROBAT Heizungsreglers

Das Ausgangssignale des NEUROBAT-Heizungsreglers entspricht der Steuerung des Mischventils mittels eines Gleichstrommotores und erfordert 2 codierte digitale Ausgangssignale für die Steuerung des Mischventils mit Auf / Zu / Aus.

Ausgehend von der maximalen Anforderung betreffend Auflösung und Messbereich und der erforderlichen Ausgangssignale können die Anforderungen an die Schnittstelle folgendermassen zusammengefasst werden:

- mindestens **6 analoge Eingänge** mit mindestens **10bit Auflösung (Sensorsignale)**
- mindestens **1 digitales Eingangssignal (Präsenzmelder)**
- mindestens **4 digitale oder analoge Eingänge (Definition der Service Parameter)**
- mindestens **2 digitale Ausgangssignale (Steuerung des Mischventils)**

Mit Referenz zum Blockschema des NEUROBAT Heizungsreglers in Figur 6 zeigt Figur 7 das globale Architekturschema für die Schnittstellenbeschreibung des NEUROBAT Heizungsreglers (erster Draft).



Figur 7: Architekturschema des NEUROBAT Heizungsreglers

Die Evaluation einer industriellen Rechenplattform erfordert nebst der Bestimmung der Schnittstellenbeschreibung, eine Abschätzung der Anforderungen an die Leistung der

Recheneinheit. Hierzu wird der NEUROBAT Regelalgorithmus nach folgenden Kriterien analysiert:

# Operationen			# Entscheidungen
ADD	MULT	DIV	
Datenspeicher			Programmspeicher

Figur 8: Relevante Daten betreffend der Rechenbetriebsleistung

Eine Analyse des rechenintensiven dynamischen Programmialgorithmus ergibt folgendes Anforderungsprofil an die Recheneinheit des Heizungsreglers:

Rechenleistung:

Die Anforderung an die Rechenleistung des NEUROBAT Heizungsreglers umfasst die Anzahl der Operationen (Additionen, Multiplikationen und Entscheidungen) während eines Abtastintervalles des Reglealgorithmus. Folgende Schätzung kann betreffend des NEUROBAT Regelalgorithmus gemacht werden:

6 M Additionen, 5 M Multiplikationen, 5 M Entscheidungen

Mit Referenz zum Abtastintervall des NEUROBAT Heizungsregler von 15min entspricht die erforderte Rechenleistung einer Leistung von durchschnittlichen 1MIPS (**M**ega **I**nstructions **P**er **S**econd).

Datenspeicher:

Die Adaptierung der neuronalen Rechenmodule des NEUROBAT Heizungsreglers erfordert, basierend auf einer 16bit Architektur der Recheneinheit:

100 KB fixer Datenspeicher und 500 KB adressierbarer dynamischer Datenspeicher

Programmspeicher:

Für das Programm des NEUROBAT Regelalgorithmus wird ein Programmspeicher vorgesehen, gemäss:

100 KB Programmspeicher

Folgende industrielle Rechenplattformen erfüllen das beschriebene Anforderungsprofil:

Model	M16/61 Mitsubishi	M37733 Mitsubishi	H8/3033 Hitachi	C167 Siemens
A/D	10bit,10ch	10bit,8ch	10bit,8ch	10bit,16ch
cycle	100 ns	333 ns	125 ns	100 ns
ROM	128 kB (mask)	124 kB (mask)	128 kB (flash)	128 kB (flash)
RAM	4 kB	4 kB	4 kB	4 kB
Ext addr space	1 MB	16 MB	16 MB	16 MB
I/O	87	68	63	111
Price	10.10	11.10	12.--	29.86

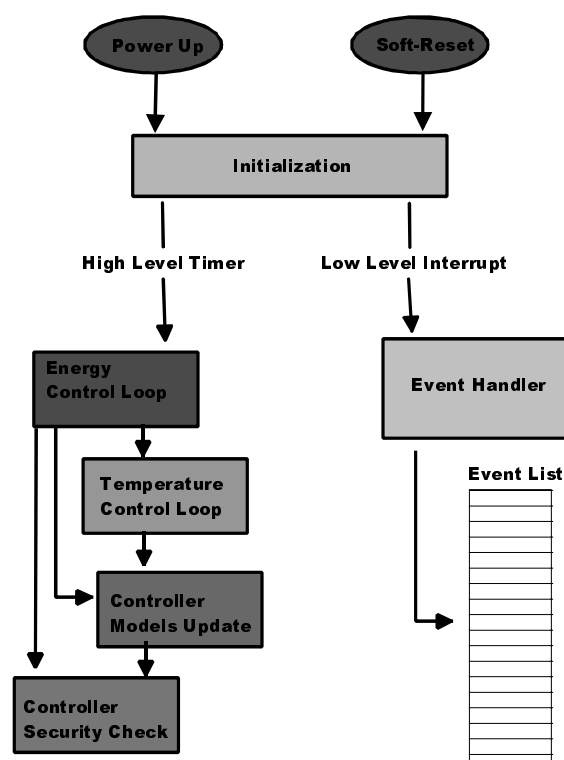
Tabelle 2: Vergleich von industriellen Rechenplattformen

2.2 Globales Design der NEUROBAT Controller Software

Der vorliegende Paragraph resümiert das globale Re-Design des NEUROBAT Regelalgorithmus im Hinblick einer Implementierung auf einer industriellen Rechenplattform.

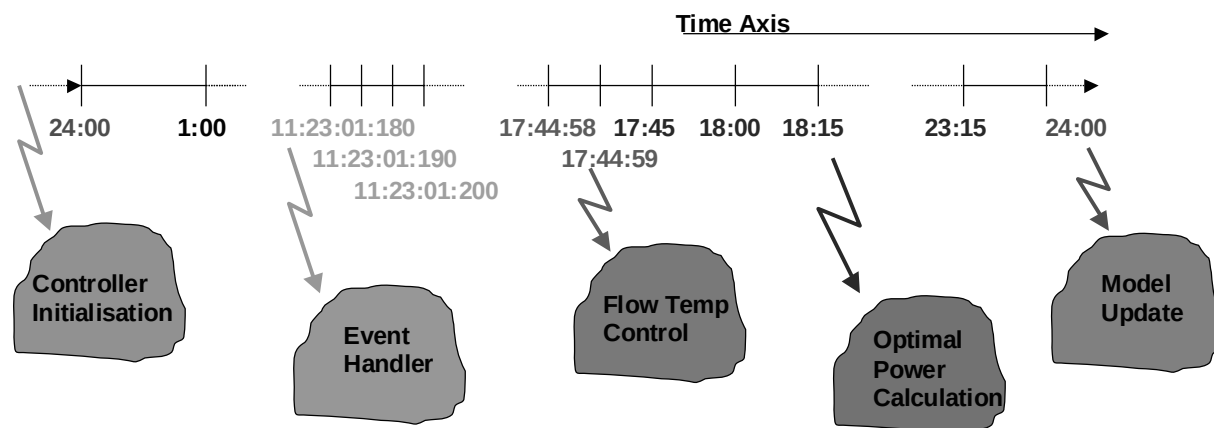
Das S/W-Design des NEUROBAT-Heizungsreglers beruht prinzipiell auf einem hybriden Konzept wie in Figur 9 und Figur 10 abgebildet.

Figur 9 zeigt das globale S/W-Design des Reglers mit dessen timer-gesteuerten Interrupts wie die Berechnung der Heizleistung, die Regelung der Vorlauftemperatur, die Adaptierung der Regelmodelle und die Ueberwachung der Regelfunktionen, sowie die event-gesteuerten Interrupts mit LCD, serieller Schnittstelle, DIO-Eingabe etc. Es sei hierbei erwähnt, dass beim hybriden Implementations-Konzept die event-gesteuerten Interrupts eine höhere Priorität besitzen als die timer-gesteuerten Interrupts.



Figur 9: Globales S/W Design des NEUROBAT Heizungsreglers

Figur 10 veranschaulicht an einem Beispiel den zeitlichen Ablauf für den NEUROBAT Heizungsregler. Der mit höchster Priorität gesteuerte Event-Handler wird alle 10 ms betreffend neu-auf tretenden Events kontrolliert und falls eine Anfrage auftritt, wird diese mit höchster Priorität abgearbeitet. Die timer-gesteuerten Interrupts erfolgen in periodischer Abfolge wie z.B. alle Sekunde eine Neuberechnung des Steuersignals für die Regelung der Vorlauftemperatur, alle 15 Minuten eine Neuberechnung der optimalen Heizleistung oder aber alle 24 Stunden ein Neuberechnung der Modellparameter.



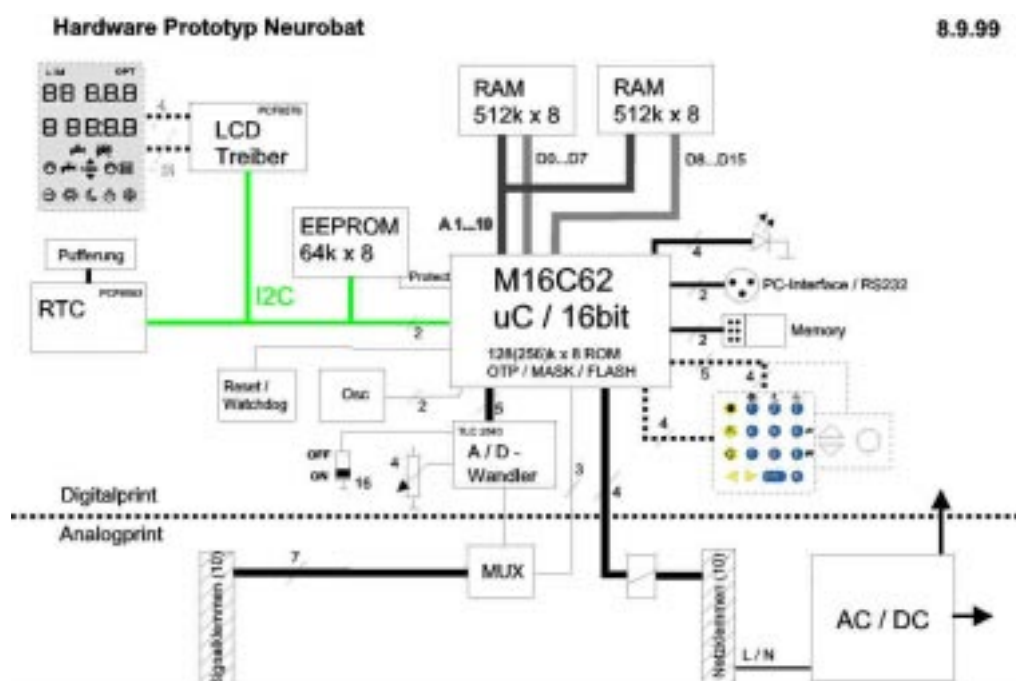
Figur 10: Hybrides Software-Konzept des NEUROBAT Heizungsreglers

2.3 H/W Realisierung

Die Hardware-Plattform des NEUROBAT-Prototypen soll auf einem konventionellen Kompakt-Heizungsregler (Equitherm QRK151) beruhen und dessen Analog/ Leistungsprint mit einem für diesen Zweck konzipierten Digital / Messprint kombiniert werden. Der Digitalprint soll mit dem aus der "Evaluation der Rechenplattform" gewählten 16-Bit Mikroprozessors bestückt (Mitsubishi M16C) werden. Die Ausführung soll steckerkompatibel in einem angepassten Seriegehäuse des oben erwähnten Kompaktreglers eingebaut werden.

Da die Kommunikation und die Visualisierung mittels eines externen PC's und der Software PC-QRK erfolgen soll, wird keine Anzeige und keine Tastatur für den Testaufbau realisiert. Einzig für die Status-Anzeige sollen vier LED eingesetzt werden.

In Figur 11 ist das Block-Schema des NEUROBAT Prototypen eingeführt:



Figur 11: Hardware-Schema des NEUROBAT Prototypen

3. Optimierung NEUROBAT Regelalgorithmus

3.1 NEUROBAT Inbetriebnahmeprozedur

Wie bereits erwähnt wurde, beruht die Innovation des NEUROBAT Regelkonzeptes nicht nur in der Reduktion des Energieverbrauches unter Anwendung von neuro-fuzzy Technologien, sondern zeichnet sich durch eine markante Vereinfachung der Inbetriebnahmeprozedur aus. Der adaptive Lerncharakter des NEUROBAT Regelkonzeptes erfordert keine weiteren Parameter-Einstelloptimierungen während oder nach Inbetriebnahme der HLK-Anlage seitens des Service-Fachmannes oder des Benutzers. Der NEUROBAT Regler adaptiert und optimiert das Gebäudemodell sowie das Meteomodul im Laufe der Betriebsdauer mittels lokal gespeicherten Daten. Im Falle einer nicht optimalen Eingabe der Service-Parameter korrigiert der NEUROBAT Regelalgorithmus im Laufe der Betriebsdauer die Parameter der Regelmodule.

Die Inbetriebnahme-Prozedure umfasst neben der Initialisierung von fünf Serviceparametern die Einstellung von zwei Benutzerparametern, den gewünschten Komfort sowie das Zeitschaltprogramm. Tabelle 3 resümiert die Service-Parameter, die zu Beginn der Inbetriebnahme-Prozedur durch den Service-Fachmann definiert werden müssen. Die Service-Parameter gewährleisten ein suboptimales Funktionieren des NEUROBAT Regelalgorithmus bei Inbetriebnahme der Heizungsanlage.

Service-Parameter	Einstell-Werte	Funktion
Isolation	schwach, mittel, stark	Initialisierung des linearen Gebäudemodelles
Gebäudeträgheit	klein, mittel, gross	Initialisierung des linearen Gebäudemodelles
Passive Sonnengewinne	schwach, mittel, stark	Initialisierung des linearen Gebäudemodelles
ζ_P maximum	100W....10kW	Konstante des optimalen Regelalgorithmus
Meteo-Stationsreferenz	Breiten-, Längengrad, Höhe, Gebäudeorientierung	Parametrisierung des Meteomoduls

Tabelle 3: NEUROBAT Service Parameter

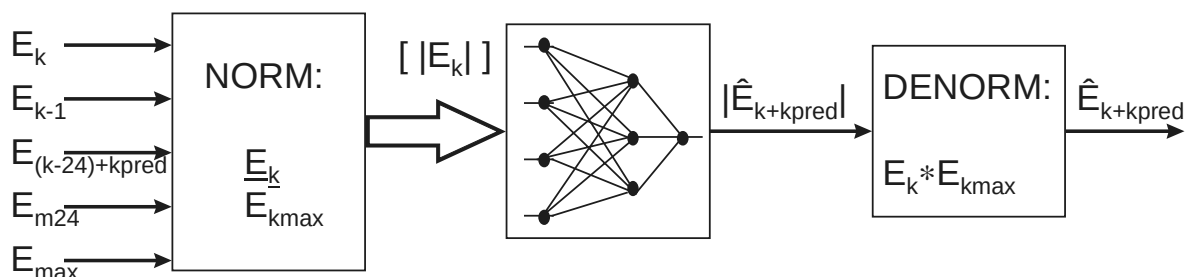
Trotz dieser markanten Reduzierung der Service Einstellparameter – moderne, kommerzielle Heizungsregelsystemen bieten bis zu 50 und mehr Service-Einstellparametern – stellt sich einerseits die Frage nach einer weiteren Reduzierung dieser Service-Einstellparameter, sowie andererseits mit welcher Präzision diese Service-Einstellparameter definiert werden müssen.

Für die Meteo Service Eingabeparameter sowie für die Gebäudecharakteristik Service-Eingabeparameter sollen im folgenden die Resultate der Sensitivitätsstudien zusammengefasst und die Leitlinien betreffend der Eingabe definiert werden.

3.1.1 Meteo Service-Eingabeparameter Sensitivitätsanalyse

Die Meteo Service Eingabeparameter (Längengrad, Breitengrad, Höhenlage und Gebäudeorientierung) werden im NEUROBAT Regelalgorithmus zur Berechnung der Vorhersage der globalen Sonneneinstrahlung verwendet. Da für die Berechnung der Vorhersage der globalen Sonneneinstrahlung die atmosphärische Transmittanz (Verhältnis

von der globalen, horizontalen Sonneneinstrahlung zur maximal möglichen globalen, horizontalen Sonneneinstrahlung) als Eingang und Ausgang des neuronalen Netzwerkes verwendet wird, beeinflussen die Meteo Service Eingabeparameter den Regelalgorithmus auf verschiedenen Rechenniveaus, wie Figur 12 zeigt. Die Sensitivitätsanalyse untersucht die Anforderungen betreffend der Genauigkeit der Eingabe der Höhe, des Längen- und des Breitengrad auf dem Funktionsniveau (Berechnung der maximal möglichen globalen Sonneneinstrahlung), dem Vorhersageniveau (Vorhersage der globalen Sonneneinstrahlung) und dem Reglerniveau (Betriebsleistung des NEUROBAT Reglers).



Figur 12: Vorhersagemodell für die globale, horizontale Sonneneinstrahlung

Mit Referenz zu den europäischen geographischen Verhältnissen (Breitengrade von 35°n-70°n, Längengrade von 10°w-40°o) und einer technisch realisierbaren analogen Eingabe der Meteo Service Eingabeparameter wird für die Sensitivitätsanalyse folgende Klassifizierung vorgeschlagen:

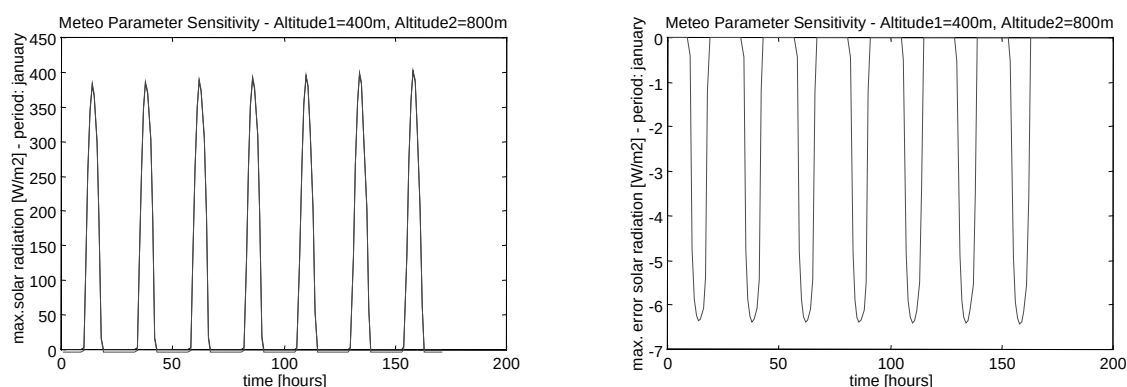
- Raster betreffend der Eingabe der Höhenlage von $\Delta H=400m$
- Raster betreffend der Eingabe der Längengrade von $\Delta LG=10^\circ$
- Raster betreffend der Eingabe der Breitengrade von $\Delta BG=5^\circ$

Mit Referenz zu dieser Klassifizierung beträgt der maximale Eingabefehler für die Meteo Service Eingabeparameter gerade dem vorgeschlagenen Raster.

3.1.1.1 Sensitivitätsanalyse auf Funktionsniveau

Die entsprechende Sensitivität auf Funktionsniveau, d.h. bei der Berechnung der maximal möglichen, globalen, horizontalen Sonneneinstrahlung, ist qualitativ in Figur 13, Figur 14 und Figur 15 wiedergegeben.

Figur 13 zeigt, dass für die Berechnung der maximal möglichen, globalen Sonneneinstrahlung bei einem gewählten Standort eine Fehlereingabe des Meteo-Höhenparameters von 400m keinen Auswirkungen hat und sich der relative Fehler um die 1%-Marke bewegt. Der Graph links in Figur 13 zeigt die maximal mögliche, globale, horizontale Sonneneinstrahlung für den Fall einer korrekten Eingabe der Meteo Service-Eingabeparameter im Vergleich zum Fall des mit einem Klassifikationsfehler behafteten Höheneingabeparameter für einen Zeitraum von einer Woche. Der Graph rechts in Figur 13 zeigt den dabei auftretenden Fehler.



Figur 13: Sensitivität des Meteo-Höhenparameters auf Funktionsniveau

Der Graph links in Figur 14 zeigt den Verlauf der maximal möglichen, globalen, horizontalen Sonneneinstrahlung für den Fall einer korrekten Eingabe der Meteo Service-Eingabeparameter im Vergleich zum Fall für einen mit einem Klassifikationsfehler behafteten Längengradfehler von $+10^\circ$. Der Graph rechts in Figur 14 mit dem absoluten Fehler der beiden Verläufe, zeigt deutlich, dass der Längengradfehler auf Funktionsniveau nicht vernachlässigt werden kann

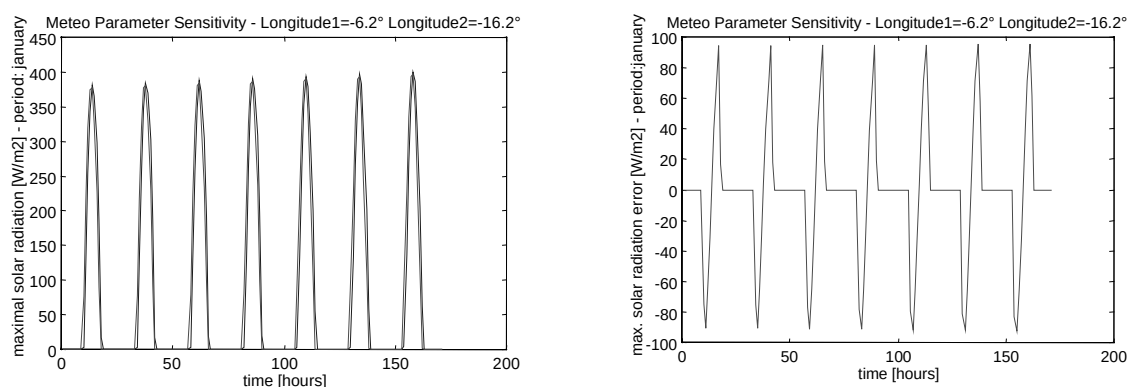
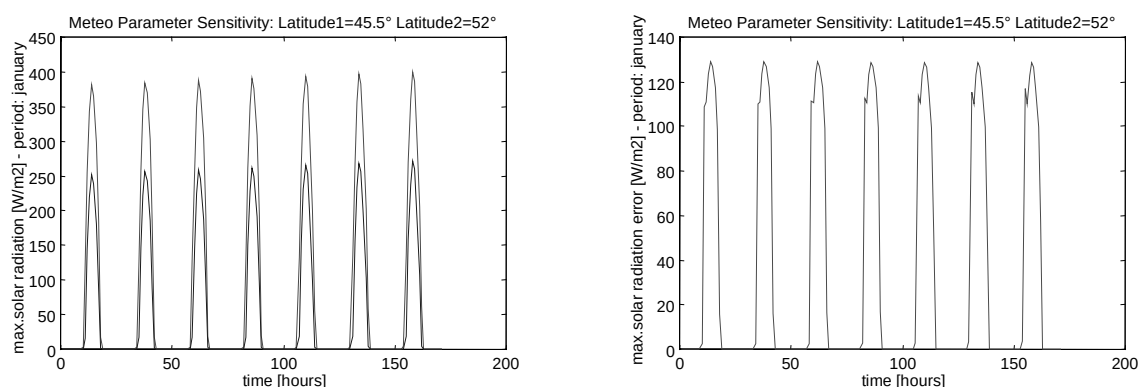


Figure 14: Sensitivität des Meteo-Längengradparameters auf Funktionsniveau

Ein Eingabefehler des Breitengrades von -5° bei einem gewählten Standort führt zu einer reduzierten maximal möglichen globalen, horizontalen Sonneneinstrahlung wie dies im Graph links in Figur 15 gezeigt ist. Entsprechend dem Längengradparameter verdeutlicht der rechte Graph in Figur 15 mit dem absoluten Fehlersignal, dass auch der Breitengradfehler auf Funktionsniveau nicht vernachlässigt werden kann.



Figur 15: Sensitivität des Meteo-Breitengradparameters auf Funktionsniveau

3.1.1.2 Sensitivitätsanalyse auf Prädiktionsniveau:

Die Resultate der Sensitivitätsanalyse auf dem Niveau des Vorhersagemodells der globalen, horizontalen Sonneneinstrahlung sind in Tabelle 4, Tabelle 5, Tabelle 6 und Tabelle 7 zusammengefasst.

Tabelle 4 resümiert die Qualität der Sonneneinstrahlungs-Prädiktion der neuronalen Modelle des NEUROBAT Reglers für die Vorhersage der Sonneneinstrahlung in einer 1 Stunde bis und mit in 6 Stunden.

	1 Std.	2 Std.	3 Std.	4 Std.	5 Std.	6 Std.
Mittelwert	1.0458	-1.1899	1.6312	0.1950	0.7208	3.3906
Standardabweichung	42.9913	65.8050	70.8095	81.7221	83.2384	80.4620

Tabelle 4: Statistik der NEUROBAT Vorhersagemodelle

Die Mittelwerte und Standardabweichungen der Vorhersagequalität der neuronalen Netzwerkmodelle in Tabelle 5, Tabelle 6 und Tabelle 7 im Falle einer falschen Eingabe des Höhenparameters (Tabelle 5), des Längengradparameters (Tabelle 6) oder des Breitengradparameters (Tabelle 7) bestätigen die Sensibilitätsanalyse auf Funktionsebene. Während der Höhenparameter eine kleine Sensibilität aufweist, zeigen die Resultate in Tabelle 6 und Tabelle 7, dass der Längengrad- und Breitengradparameter nicht zu vernachlässigen sind.

	1 Std.	2 Std.	3 Std.	4 Std.	5 Std.	6 Std.
Mittelwert	0.9614	-1.3992	1.7044	-1.0376	1.3485	3.0935
Standardabweichung	42.4764	65.8462	70.1891	82.3113	80.2294	80.2338

Tabelle 5: Sensitivität des Meteo-Höhenparameters auf Vorhersageniveau

	1 Std.	2 Std.	3 Std.	4 Std.	5 Std.	6 Std.
Mittelwert	10.8062	9.3455	10.0466	9.6349	11.1438	12.9316
Standardabweichung	53.4379	64.8613	73.2616	81.2376	82.6086	82.5527

Tabelle 6: Sensitivität des Meteo-Längengradparameters auf Vorhersageniveau

	1 Std.	2 Std.	3 Std.	4 Std.	5 Std.	6 Std.
Mittelwert	19.9759	17.8959	19.7160	7.8390	18.3919	15.8905
Standardabweichung	53.0781	68.9211	77.9440	89.9310	89.0165	85.3477

Tabelle 7: Sensitivität des Meteo-Breitengradparameters auf Vorhersageniveau

3.1.1.3 Sensitivitätsanalyse auf Reglerniveau:

Wird auf dem Niveau des NEUROBAT Regelalgorithmus die Sensitivitätsanalyse betreffend fehlerbehafteten Meteo Service-Eingabeparameter durchgeführt, so bestätigt sich das Resultat der Sensitivitätsanalyse auf Prädiktions- und Funktionsniveau. Tabelle 8 fasst die Resultate dieser Simulationsstudie zusammen (die angegebenen Temperaturen entsprechen den Temperaturmittelwerten während der Simulationsperiode).

	Neurobat Referenz Modell	Höhenlage Sensitivitäts Modell	Längengrad Sensitivitäts Modell	Breitengrad Sensitivitäts Modell
Simulationszeit [Tage]	212	212	212	212
Komfortperioden [Stunden]	1510	1510	1510	1510
Heizenergie [MJ]	1048	1045	1022	1090
Sonnenwärme [MJ]	2394	2394	2394	2394
Aussentemperatur [°C]	5.81	5.81	5.81	5.81
Künstliches Licht [MJ]	424	424	424	424
Interne Fremdwärme [MJ]	543	543	543	543
Energie-Kosten [-]	4.7	4.6	4.5	4.8
Diskomfort-Kosten [-]	228.6	230.1	223.6	235.9
Totale Kosten [-]	233.2	234.7	228.1	240.8
Raumtemperatur [°C]	19.93	19.92	19.86	20.05
Raumtemperatur während Benutzerpräsenz [°C]	20.90	20.88	20.80	21.05

Tabelle 8: Sensitivitätsanalyse auf Reglerniveau

Aufgrund der durchgeführten Analysen kann geschlossen werden, dass der Meteo Serviceeinstellparameter der Höhenlage ohne Einbussen der NEUROBAT Betriebsleistung (<0.5%) vernachlässigt werden kann.

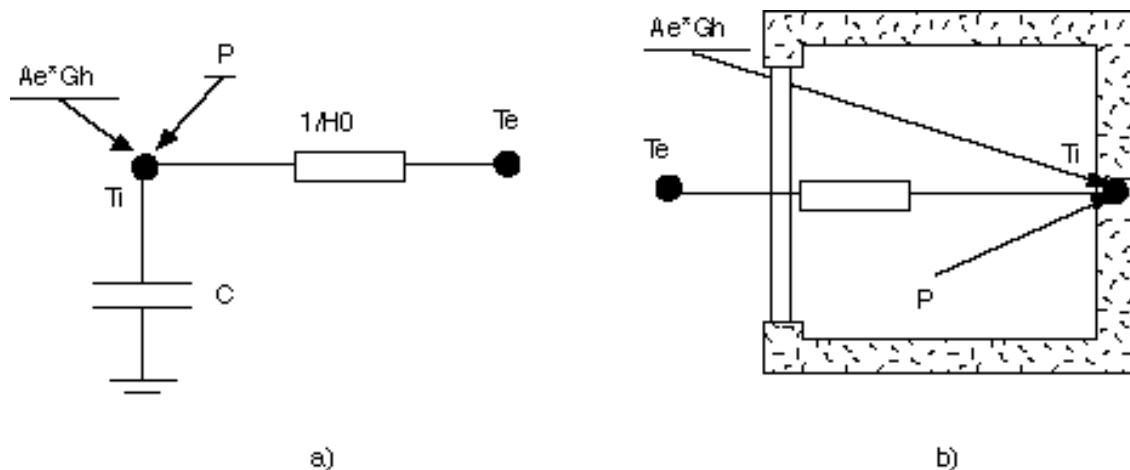
Die Sensitivität betreffend der Längen- und Breitengrade ergibt beim analysierten Raster (10 Längengrade, 5 Breitengrade) einen Betriebsleistungsverlust des NEUROBAT-Reglers (Komfort und Energieverbrauch) von durchschnittlichen 3% respektive 4%.

3.1.2 Gebäude Service-Eingabeparameter Sensitivitätsanalyse

Da bei der Inbetriebnahme des NEUROBAT Heizungsreglers die Gebäudecharakteristik nicht oder nur grob bekannt ist, muss das Gebäudemodell (siehe Figur 1) mittels eines einfachen Initialisierungsmodelles angenähert werden. Dieses Gebäudeinitialisierungsmodell muss dabei folgenden Anforderungen genügen:

- Gewährleistung eines korrekten Betriebes des NEUROBAT Heizungsreglers. Der Einfluss von Störgrößen wie die sich ändernde Sonneneinstrahlung und Aussentemperatur muss korrekt wiedergegeben werden.
- Die Definition des Gebäudeinitialisierungsmodelles soll durch wenige charakteristische Serviceparameter möglich sein.

Die dieses Gebäudeinitialisierungsmodell beschreibenden Service-Eingabeparameter sind: der thermische Transferkoeffizient H_0 [W/K], die thermische Gebäudekapazität C [J/K], sowie das Äquivalent der Fläche zur Gewinnung der passiven Sonnenfernwärme A_e [m²]. Figur 16 zeigt das Blockschema des Gebäudeinitialisierungsmodelles:


Figur 16: Ein-Knoten Gebäudeinitialisierungsmodell

Obwohl diese Service-Eingabeparameter des Gebäudeinitialisierungsmodelles einfach und verständlich sind, erfordert deren Bestimmung die Erfahrung eines Gebädefachmannes. Mit Blick auf eine Vereinfachung der Inbetriebnahme-Prozedur werden diese Gebäudeparameter in grössenunabhängige Eingabeparameter transformiert. In Tabelle 9 sind diese grössenunabhängigen Gebäudeparameter aufgelistet. Das Gebäudeinitialisierungsmodell lässt sich aber aufgrund der Parameter A_e und V nicht direkt mittels dieser grössenunabhängigen Parameter bestimmen. Die Berechnung dieser zusätzlichen Parameter kann mittels der maximal möglichen Heizleistung $P_{\max}$ (gemäss SIA Referenz; (1)) und einer vereinfachenden Annahme betreffend des Volumens (Länge=2*Breite=2*Höhe; (2), (3)) durchgeführt werden.

$$(1) \quad P_{\max} = H_0 \cdot \Delta T_{\dim}$$

$$(2) \quad V = 2 \cdot \left(\frac{A_{\text{ext}}}{8} \right)^{\frac{3}{2}}$$

$$(3) \quad V = 2 \cdot \left(\frac{A_{\text{ext}}}{2} \right)^{\frac{3}{2}} \text{ ("internal" building)}$$

Mit diesen Hypothesen folgt:

$$(4) \quad H_0 = a_1 \cdot A_{\text{ext}} = \frac{P_{\max}}{\Delta T_{\dim}}$$

$$(5) \quad A_e = a_3 \cdot A_{\text{ext}} = \frac{a_3 \cdot P_{\max}}{a_1 \cdot \Delta T_{\dim}}$$

$$(6) \quad C = a_2 \cdot V = 2 \cdot a_2 \cdot \left(\frac{P_{\max}}{8 \cdot a_1 \cdot \Delta T_{\dim}} \right)^{\frac{3}{2}}$$

Isolation a1 [W/m2K]	Stark 0.80	Mittel 1.04	Schwach 1.28
Gebäudeträgheit a2 [MJ/m3K]	Stark 0.15	Mittel 0.12	Schwach 0.10
Passive Sonnengewinne a3 [-]	Stark 0.13	Mittel 0.09	Schwach 0.07

Tabelle 9: Grössenunabhängige Gebäudetypeninitialisierungsparameter (gemäss POLYSUN)

Das Gebäudeinitialisierungsmodell ist gemäss dieser Definitionen abhängig von der linguistischen Beschreibung der Eingabe-Serviceparameter a1, a2 und a3, der maximalen Heizleistung P_{max} des Heizkreises, sowie dem Verhältnis von Gebäudevolumen zu Gebäudeoberfläche.

Die Sensitivität dieser Gebäudeparameter soll in den folgenden Paragraphen analysiert werden und eine einfache und realisierbare Eingabe definiert werden.

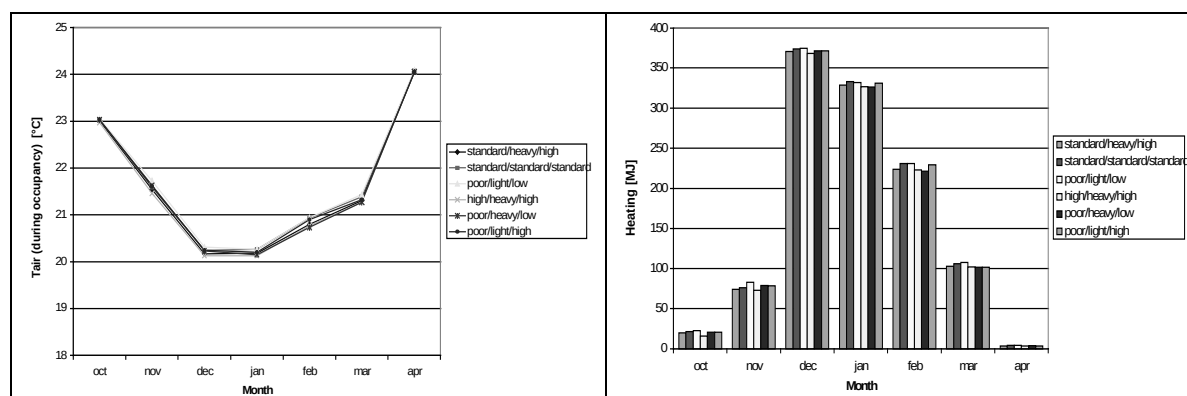
3.1.2.1 Gebäudetypensensitivität

Diese Simulationsstudie untersucht die Sensitivität der Service-Eingabeparameter der grössenunabhängigen Gebäudetypen, gemäss Tabelle 9. Sechs verschiedene Eingabe-Parametersets wurden gemäss Tabelle 10 gewählt und dabei der NEUROBAT Reglerbetrieb betreffend der Betriebsleistung und der sensitiven Betriebsdauer analysiert (Zeitperiode, für welche der Betrieb des NEUROBAT Regelsystem eine Abhängigkeit von der Wahl der Eingabeparameter zeigt).

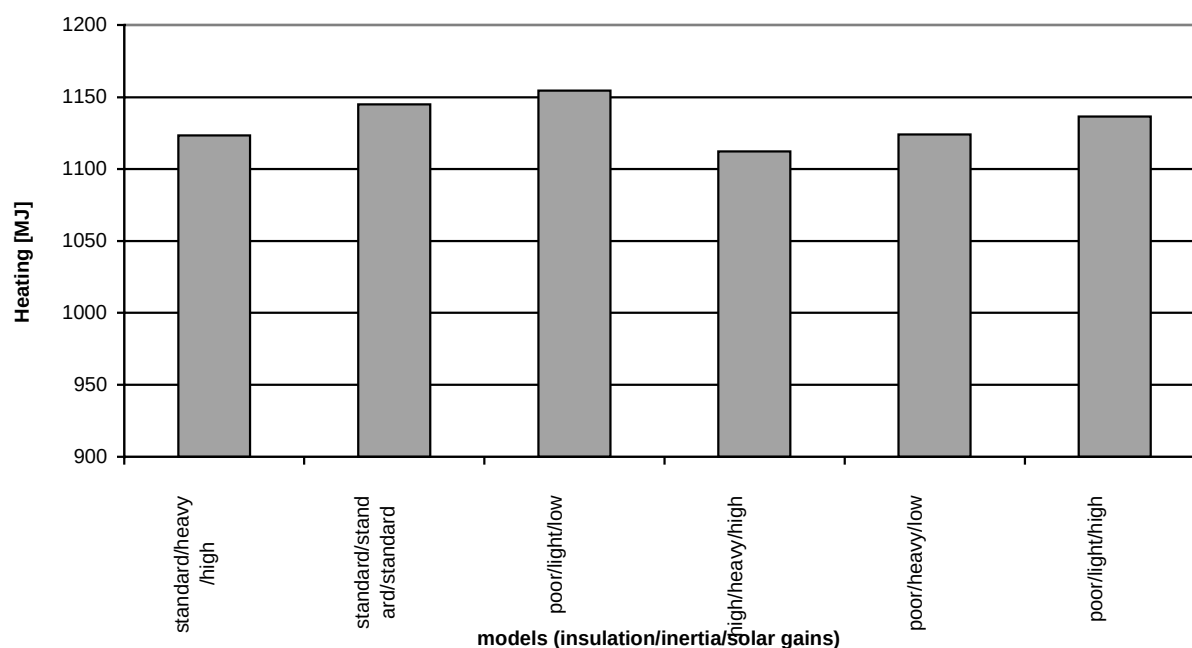
Simulationsfall	Isolation a1 [W/m2K]	Gebäudeträgheit a2 [MJ/m3K]	Passive Sonnengewinne a3 [-]
1 (Neurobat Reference)	Mittel	Stark	Stark
2	Mittel	Mittel	Mittel
3	Schwach	Schwach	Schwach
4	Stark	Stark	Stark
5	Schwach	Stark	Schwach
6	Schwach	Schwach	Stark

Tabelle 10: Gebäudeeingabe-Serviceparameter Evaluationsset

Die Resultate dieser Studie beruhen auf einer Simulation des NEUROBAT Heizungsreglers (im Vergleich zum NEUROBAT Referenzmodell gemäss No. 1 in Tabelle 10) während einer Heizsaison (Meteodaten Lausanne 1981), mit einer maximalen Heizleistung P_{max} von 800 [W] und einem bekannten Gebäudevolumen. Die Resultate sind in Figur 17 und Figur 18 zusammengefasst, wobei der zeitliche Verlauf der Graphen in Figur 17 die sensitive Betriebsdauer wiedergibt und Figur 18 die Betriebsleistung mit Referenz zum Energieverbrauch analysiert.



Figur 17: Vergleich der monatlichen Raumtemperaturen während der Benutzerpräsenz und des Energieverbrauches für verschiedene Gebäudeinitialisierungsmodelle mit Parametern a1, a2 und a3 (im Vergleich zur NEUROBAT Referenzversion)



Figur 18: Vergleich des jährlichen Energieverbrauches für unterschiedliche Gebäudeinitialisierungsmodellparameter

Figur 18 zeigt eine maximale Differenz betreffend des Energieverbrauches von 5 % für die verschiedenen Gebäudeinitialisierungsmodellparameter während des ersten NEUROBAT Betriebsjahres. Die Unterschiede im Energieverbrauch resultieren in Unterschieden betreffend des Benutzerkomforts, wie dies im Graph links von Figur 17 zu sehen ist. Der monatliche Vergleich der Raumtemperaturen während der Benutzerpräsenz zeigt eine suboptimale Konvergenz zu einem vergleichbaren thermischen Verhalten.

Gemäss den Simulationsergebnissen von Figur 17 und Figur 18 entspricht das optimale Initialisierungsmodell dem gewählten Referenzmodell. Aus den vorliegenden Resultaten der Studie lassen sich jedoch keine Regeln für die Definition der Eingabeparameter hergeleiten, da das Initialisierungsmodell das Gebäudeverhalten nur grob beschreiben kann.

3.1.2.2 Sensitivitätsstudie betreffend der Gebäudedimensionen

Die Eingabe der Gebäudedimensionen, welche durch das Verhältnis von Gebäudevolumen zu Gebäudeoberfläche beschrieben wird, kann durch den Initialisierungsparameter der maximalen Heizleistung des Heizkreises vereinfacht werden und dessen Sensitivität im folgenden Paragraphen analysiert wird.

3.1.2.3 Sensitivitätsstudie betreffend P_{MAX}

Der Parameter der maximalen Heizleistung des Heizkreises beeinflusst den NEUROBAT Regelalgorithmus auf dem Niveau:

- der Steuerung der dem Gebäude zugeführten Heizleistung
- der Initialisierung des Gebäudemodells (gemäss den Kenngleichungen des Gebäudeinitialisierungsmodells zu Beginn dieses Kapitels)
- der Berechnung der zu optimierenden Kostenfunktion

Mit Referenz zu diesen Funktionsniveaus soll der Einfluss des Parameters der maximalen Heizleistung analysiert werden. Eine Sensitivitäts-Simulationsstudie untersucht global die Betriebsleistung des NEUROBAT Regelalgorithmus unter Berücksichtigung einer vereinfachten Parametereingabe von P_{MAX} .

Steuerung der Heizleistung

Die dem Gebäude zugeführte Heizleistung entspricht dem Ausgang des NEUROBAT Regelalgorithmus (siehe Figur 1) und berechnet sich aufgrund des Durchflusses, der Vorlauf- und Rücklauftemperatur, gemäss:

$$P_{opt} = k \cdot (T_f - T_r)$$

Der Durchfluss des Heizkreises ist ein unbekannter Parameter und lässt sich unter Annahme, dass die maximale Heizleistung einem vollständig geöffneten Mischventil entspricht, experimentell bestimmen, gemäss:

$$k = \frac{P_{max}}{(T_f - T_r)_{max}}$$

Unter der Annahme einer nicht korrekten Eingabe der maximalen Heizleistung (als P_{MAX}^* gekennzeichnet), berechnet sich der Durchfluss gemäss:

$$k^* = \frac{P_{max}^*}{(T_f - T_r)_{max}}$$

Der Ausgang der Heizleistung des NEUROBAT Regelalgorithmus lässt sich als ein Teil der maximalen Heizleistung schreiben, gemäss:

$$P^* = n \cdot \frac{P_{max}^*}{4}, (0 \leq n \leq 4)$$

Die Sollwert-Vorlauftemperatur berechnet sich zu:

$$T_f = \frac{P^*}{k^*} + T_r = \frac{n}{4} \cdot (T_f - T_r)_{max} + T_r$$

Diese ist unabhängig vom Service-Eingabeparameter P_{MAX} .

Gebäudetypen Service Eingabeparameter

Wie die Kenngleichungen des Gebäudeinitialisierungsmodelles zu Beginn dieses Kapitels zeigen, ist die Beschreibung der Gebäudetypen mittels der Parameter a_1 , a_2 und a_3 nicht ausreichend, das thermische Verhalten des Gebäudes zu charakterisieren. Die Kenngleichung des Gebäudeinitialisierungsmodelles beinhalten daher ebenfalls den Parameter der maximalen Heizleistung des Heizkreises.

Kostenfunktion

Die zu optimierende Kostenfunktion des NEUROBAT Regelalgorithmus ist gemäss folgender Kenngleichung gegeben:

$$J = C_u \cdot u + C_p \cdot [\exp(PMV^2) - 1]$$

mit u als Steuersignal der dem Gebäude zugeführten Heizleistung in [W] und PMV als thermischer Komfortfaktor (Predicted Mean Vote in [-]). Der erste Summand dieser Kostenfunktion entspricht den zu optimierenden Energiekosten, der zweite Summand den zu optimierenden Komfortkosten. Die Konstanten C_u und C_p entsprechen einer Gewichtung von Komfort- und Energiekosten und bestimmen sich gemäss:

$$C_p = 1$$

$$C_u = \frac{\Delta t \cdot k_l \cdot [\exp(\Delta PMV^2) - 1]}{C_{dyn} \cdot \Delta PMV}$$

mit Δt als Zeitintervall zwischen zwei Steuersignalen, k_l als Linearisationskonstante, C_{dyn} als thermische Kapazität des Gebäudes und ΔPMV als einer konstanten Variation des Komfortfaktors.

Der Parameter C_{dyn} bestimmt sich gemäss dem Gebäudeinitialisierungsmodell mit:

$$C_{dyn} = 2 \cdot a_2 \cdot \left(\frac{P_{max}}{8 \cdot a_1 \cdot \Delta T_{dim}} \right)^{\frac{3}{2}} \sim P_{max}^{\frac{3}{2}}$$

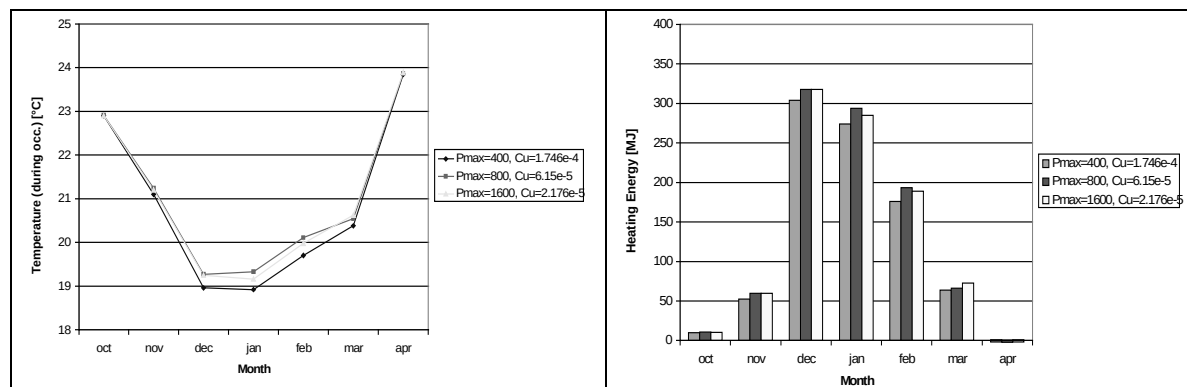
und ist abhängig von der maximalen Heizleistung P_{MAX} .

Globale Gebäude-Sensitivitätsanalyse:

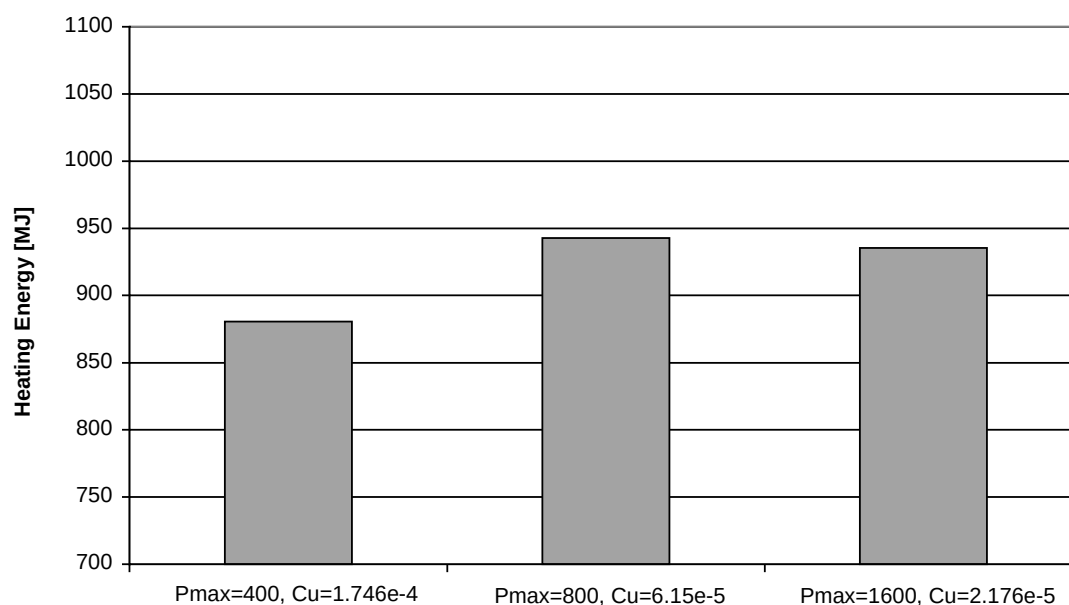
Der Gebäudeeingabeparameter der maximalen Heizleistung des Heizkreises beeinflusst den NEUROBAT Regelalgorithmus auf dem Niveau der Initialisierung des Gebäudemodelles, sowie der Optimierung der Kostenfunktion. Die nachstehenden Resultate fassen die globale Simulationsstudie betreffend der Sensitivität des Parameters der maximalen Heizleistung zusammen. Dabei wird der Einfluss des Parameters der maximalen Heizleistung auf die Betriebsleistung des NEUROBAT Regelalgorithmus analysiert. Eine „Eingabe-Auflösung“ von 100% des P_{max} Parameters wird ausgeführt ($P_{max}=400, 800$ und $1600W$). Die Simulationen wurden mit einem NEUROBAT Referenz-Gebäudetyp initialisiert und mit realen Meteodaten der Station Lausanne aus dem Jahre 1981 durchgeführt.

Figur 19 und Figur 20 fassen die Resultate dieser Simulationsstudie zusammen. Die Graphen links von Figur 19 veranschaulichen die sensitive Betriebsdauer des NEUROBAT Regelalgorithmus betreffend des P_{MAX} Eingabeparameter. Figur 20 zeigt die Betriebsleistung des NEUROBAT Regelalgorithmus mit Referenz zum Energieverbrauch. Die Simulationsdaten zeigen, dass ein Fehler von 100% betreffend des P_{MAX} Eingabeparameters in einen Betriebsverlust von 6% betreffend des Energieverbrauches und einer langsamen

Konvergenz eines vergleichbaren thermischen Verhaltens resultiert. Dieser Betriebsverlust kann jedoch durch verbesserte Lernalgorithmen reduziert werden und wird durch die Adaptierung des Komforts seitens des Benützer gedämpft.



Figur 19: Vergleich der monatlichen Raumtemperatur während der Benutzerpräsenz und des Energieverbrauches für verschiedene Parameterwerte P_{MAX}



Figur 20: Vergleich des jährlichen Energieverbrauches für verschieden Parameterwerte von P_{MAX}

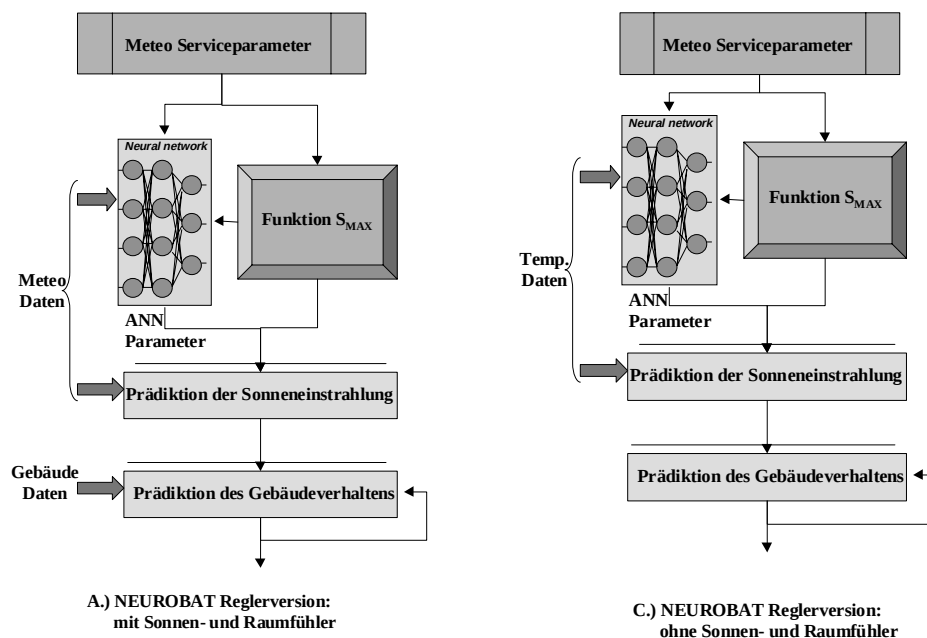
3.1.3 Schlussfolgerung Service-Parameter

Die durchgeführte Sensitivitätsanalyse der Meteo Service-Eingabeparameter resultiert in eine Reduktion der Eingabeparameter auf Breiten- und Längengrad und Gebäudeorientierung.

Die Eingabe der Gebäudeorientierung kann mittels eines 4-Positionen DIP-Switch erfolgen, der die Ausrichtung des Gebäudes nach N, O, S oder W definiert.

Die Definition der Eingabeauflösung der Meteo Serviceparameter Breiten- und Längengrad sollte sich nicht nur auf die Resultate dieser Sensitivitätsanalyse beschränken, sondern muss im Zusammenhang mit den NEUROBAT Reglerversionen betrachtet werden (siehe Kapitel 0). Die Resultate der vorliegenden Sensitivitätsanalyse zeigen, dass ein Raster von 10° für

den Längengradparameter und 5° für den Breitengradparameter und einer daraus resultierenden Einbusse der Betriebsleistung von 3 – 4% zu gross ist.



Figur 21: Meteo Serviceeingabeparameter im Zusammenhang mit unterschiedlichen NEUROBAT Reglerversionen

Mit Referenz zu den NEUROBAT Heizungsreglerversionen, deren Analyse in Kapitel 0 zusammengefasst sind, soll an dieser Stelle erwähnt werden, dass die Meteo Serviceeingabeparameter bei einer reduzierten NEUROBAT ‚Low-Cost‘-Version (ohne Sonnen- respektive Raumtemperaturfühler) die Betriebsleistung lediglich über die Berechnung der maximal möglichen, globalen, horizontalen Sonneneinstrahlung beeinflusst wird, wie Blockschema a.) und b.) in Figur 21 zeigt. Obwohl für diese Regler-Versionen eine vereinfachte und kostengünstige Inbetriebnahme erstrangig ist, sollte die Eingabe der Längen- und Breitengrade mit einem Raster erfolgen, welche im Bereich von 2 Breitengraden und 3 Längengrade liegt, womit der Verlust der NEUROBAT-Betriebsleistung bei ca. 1% liegt im Vergleich zur NEUROBAT Basisversion. Diese Auflösung bei der Eingabe der Meteo Serviceparameter kann erreicht werden, indem nicht Längengrade und Breitengrade definiert werden, sondern Städte- respektive Meteostationsreferenzen definiert werden. Für die geforderte Auflösung des Längen- und Breitengrades entspricht dies für das Gebiet der Schweiz einer Stationsreferenz (z.B.: Bern). Diese Art der Eingabe mit der vorgeschlagenen Auflösung kann ebenfalls für die NEUROBAT Basisversion (Blockschema a.)) verwendet werden.

Generell resultiert also durch eine vereinfachte Eingabe der Meteo Serviceeingabeparameter mittels der Methode der Referenzstationen ein NEUROBAT Betriebsverlust von ca. 1% (Komfort und Energieverbrauch).

Die Resultate der Sensitivitätsanalyse der Gebäudeinitialisierungs Eingabeparameter (Gebäudetypen gemäss grössenunabhängige Parameter a_1 , a_2 und a_3) zeigen einen geringen Einfluss betreffend der Betriebsleistung des NEUROBAT Heizungsreglers und eine lange sensitive Betriebsdauer (langsame Konvergenz eines gemeinsam vergleichbaren thermischen Verhaltens). Zudem können aus den Simulationsresultate keine Eingaberegeln hergeleitet werden. Aufgrund der Resultate dieser Simulationsstudie wird gefolgert, dass die Inbetriebnahme des NEUROBAT Heizungsreglers dahingehend vereinfacht wird, dass lediglich ein globales Gebäudeinitialisierungsmodell festgelegt wird. Zudem müssen die

Lernmethoden des Gebäudemodellens verbessert werden, um eine optimale Konvergenz des thermischen Verhaltens zu garantieren. (Referenz->->->)

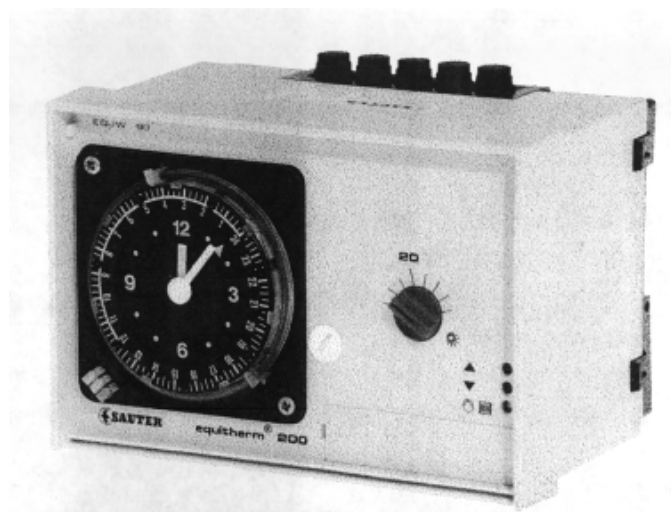
Die Sensitivitätsstudie des P_{max} Eingabeparameter zeigt, dass eine 100% Fehlereingabe des Serviceparameters betreffend den Einbussen der Betriebsleistung des NEUROBAT Reglers tolerierbar sind. Für eine Eingabe des P_{MAX} Serviceparameters in der Grössenordnung von 5 bis 100 kW wird daher eine 100% Auflösung gemäss einer Eingabe mit dem Einstellvektor [5 10 25 50 100] vorausgesetzt.

3.2 Benutzer-Eingabeparameter

Der NEUROBAT Heizungsregler zeichnet sich im Vergleich zu heute verfügbaren, kommerziellen Systemen nicht nur durch eine verbesserte Betriebsleistung und eine vereinfachte Inbetriebnahme aus, sondern sieht ebenfalls für den Benutzer eine einfache Schnittstelle vor. Während des NEUROBAT Projektes, Phase 1, wurde mittels neuronalen Netzen ein Benutzerpräsenzprädiktor entwickelt, das als Eingang die Signale der eines Präsenzsensors benutzt. Das Verwenden eines Präsenzmelders reduziert die Benutzereingabe auf den Komfortsollwert, welcher entweder mittels der Sollwertraumtemperatur oder aber mittels der Eingabe des Komfortempfindens („Zu Kalt“, „Zu Heiss“) erfolgt (siehe NEUROBAT Projekt, Phase 1).

3.2.1 Schlussfolgerung

In einem ersten Schritt wird vorgeschlagen, die üblichen Benutzereingaben der Sollwertraumtemperatur und der Zeitschaltuhr zur Definition der Komfortperioden zu verwenden, wie dies in Figur 22 als Beispiel abgebildet ist.



Figur 22: Benutzereingabe der Sollwerttemperatur und Komfortperiode

3.3 Optimierung der NEUROBAT Reglermodule

3.3.1 Gebäudemodell

Das für den NEUROBAT Heizungsregler verwendete Gebäudemodell entspricht einem neuronalen Netzwerk mit einem Eingangs- einem Zwischen- und einem Ausgangs-layer. Die Netzstruktur ist relativ einfach und nur wenige Neuronen befinden sich im Eingangs und Zwischenlayer. Die Eingangsvariablen des Gebäudemodells wurden mittels einer Qualitätsanalyse der Vorhersage der Raumtemperatur bestimmt. Im Vergleich zu adaptativen linearen Modellen (lineares ARX-Modell), ist die Vorhersagequalität des neuronalen Netzwerkes wesentlich besser, insbesondere falls reelle Messungen für den Lernprozess und die Validation verwendet werden.

Dieser Unterschied betreffend der Vorhersagequalität lässt sich erklären durch:

- Die Nichtlinearität der Fremdwärme mittels der Sonneneinstrahlung in einem bewohnten Gebäude (Betätigung der Sonnenblenden durch den Benutzer).
- Die Robustheit des neuronalen Modells, falls die Trainings-Daten gestört sind (z.B. Schwankungen der Raumtemperatur aufgrund Öffnen der Fenster).

Die Vorhersagequalität eines Gebäudemodells entspricht nur einer der Anforderungen. Falls das Gebäudemodell in einer Heizungsregelung angewendet wird, sind zusätzlich folgende Eigenschaften notwendig:

- Falls das verwendete Modell mit einem optimalen Regelalgorithmus gekoppelt ist, sind bestimmte physikalische Eigenschaften des Modells unerlässlich. So z.B. muss garantiert sein, dass, falls die gelieferte Heizleistung zunimmt, das Gebäudemodell eine Erhöhung der Raumtemperatur prognostiziert (Kriterium der Monotonie).
- Ein einwandfreies Funktionieren bei der Inbetriebnahme. Anlässlich der Inbetriebnahme muss das Gebäudemodell einen zufriedenstellenden Betrieb der Heizung garantieren.
- Die Adaptation des Gebäudemodells. Die thermophysikalischen Parameter eines Gebäudes ändern sich mit der Dauer des Betriebes und mit der Jahreszeit (z.B. nimmt der Luftwechsel im Gebäude bei Anstieg der Aussentemperaturanstieg zu). Das Modell muss einerseits diesem Faktum Rechnung tragen und sich andererseits dem Gebäudeverhalten unter bestimmten, bereits aufgetretenen klimatischen Bedingungen erinnern.
- Eine beschränkte Komplexität. Die Anzahl der Fühler die dem Modell Informationen liefern, muss auf ein Minimum reduziert werden (dies aus Kostengründen und aufgrund der Zuverlässigkeit).
- Der korrekte Betrieb in der Praxis. Ein zu komplexes oder zu sensibles Gebäudemodell, welches lediglich mittels Simulationen getestet wurde, funktioniert nicht oder nur schlecht, da nun reelle Daten für die Lernphase verwendet werden.

Das für den NEUROBAT-Heizungsregler verwendete Gebäudemodell genügt diesen Kriterien und liefert zudem eine innovative Lösung für das gestellte Problem. Z.B. wird für die Initialisierung des Datenspeichers ein einfaches, lineares Knotenmodell verwendet. Dieses lineare Knotenmodell kann bei Inbetriebnahme des Heizungsreglers mittels 3 linguistischen Service-Parameter (Trägheit, Isolation, Sonnenfremdwärme) und einem Dimensionsfaktor (maximale Heizleistung) definiert werden. Im Bericht der Definitionsphase (Referenz [6]) wurde die Sensitivität der Reglerleistung gegenüber dem Initialisierungsmodell aufgezeigt. Ziel der vorliegenden Studie ist, die Lernzeit des Gebäudemodells zu beschleunigen um nach einer bestimmten Betriebsdauer des Heizungsreglers die Sensitivität des Regelalgorithmus betreffend des Initialisierungsmodells zu beseitigen. Die

Initialisierungsparameter des Gebäudemodelles werden daher fixiert, unabhängig vom Typ des Gebäudes und lediglich der Dimensionsfakto (P_{max}) muss initialisiert werden.

Um die Lernphase zu beschleunigen wurden folgende drei Methoden analysiert:

1. Das Initialisierungsbeispiele des globalen Datenspeichers werden schrittweise mittels einer Vergesslichkeitsfunktion basierend auf einer Zeitkonstante überschrieben.
2. Das neuronale Netzwerkmodell wird nicht mittels des linearen Knotenmodelles initialisiert. Die Wahl des entsprechenden und zu verwenden Gebäudemodelles wird während der Berechnung der optimalen Heizleistung durchgeführt. Diese Wahl wird in Funktion der An- oder Abwesenheit eines reellen Datenpunktes im globalen Datenspeicher ausgeführt.
3. Das Initialisierungsmodell berechnet lediglich mit 32 Datenpunkte (anstatt der ursprünglich 1024) des globalen Datenspeichers. Es besteht keine Vergesslichkeitsfunktion, sondern eine normale Aktualisierung der Daten.

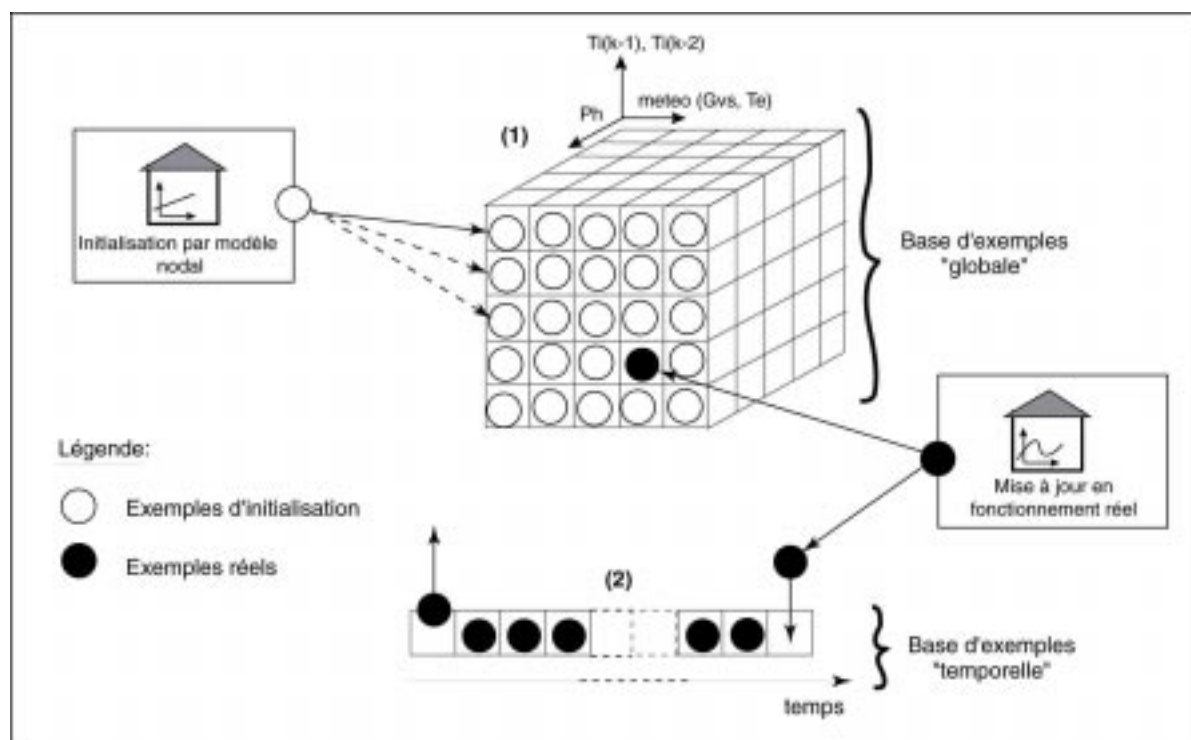
Das folgende Kapitel erklärt im Detail wie der globale Datenspeicher in der Praxis aktualisiert wird. Anschliessend werden die drei Methoden zur Beschleunigung des Lernprozesses beschrieben und deren Resultate diskutiert.

3.3.1.1 Aktualisierung des Gebäude-Datenspeichers

Datenspeicherung gemäss NEUROBAT, Phase 1

Die für die Lernphase des neuronalen Netzwerkes erforderlichen Daten sind in zwei unterschiedlichen Datenbanken gespeichert (siehe Figur 23):

1. Der permanente Datenspeicher beinhaltet eine feste Anzahl Daten, welche gleichmässig auf den Eingangsraum abgebildet werden. Diese Daten werden mittels eines Initialisierungsmodells berechnet und während des Betriebes aktualisiert. Diese permanente Datenbank erlaubt es, die unterschiedlichsten und in der Realität vielleicht nie auftretenden Beispiele zu speichern. Somit werden diese Daten, welche während des Betriebes nicht durch reelle Daten überschrieben werden, permanent gespeichert (z.B. entspricht eine Raumtemperatur von 25° C mit einer maximalen Heizleistung nicht einem realen Datenpunkt).
2. Der temporäre Datenspeicher entspricht einer Datenreihe der letzten drei Wochen des Heizbetriebes (ebenfalls 1024 Datenpunkte). Dieser speichert die zuletzt eingetragenen Daten, welche sich sehr ähnlich sein können und damit diesen Betriebszustand gewichten. Diese Datenbank wird nicht durch das Initialisierungsmodell generiert und ist deshalb unabhängig vom Initialisierungsmodell.



Figur 23: Datenspeicher des Gebäudemodells bestehend aus permanenten und temporären Daten.

Statistik der Aktualisierung des Datenspeichers

Der globale Datenspeicher wurde mittels des linearen Knotenmodelles initialisiert und anschliessend mit realen Beispielen aktualisiert. Die folgende Tabelle zeigt die Anzahl der nach einer Heizsaison aktualisierten Datenpunkte (NEUROBAT-Simulation).

	Gesamtzahl	Anzahl ueberschriebene Daten	Anzahl nicht ueberschriebene Werte
Anzahl Beispiele [-]	1024	180 ± 5	844 ± 5

Tabelle 11: Statistik der überschriebenen Daten der globalen Datenbank. Die Fluktuationen resultieren aus der Wahl des Initialisierungsmodelles.

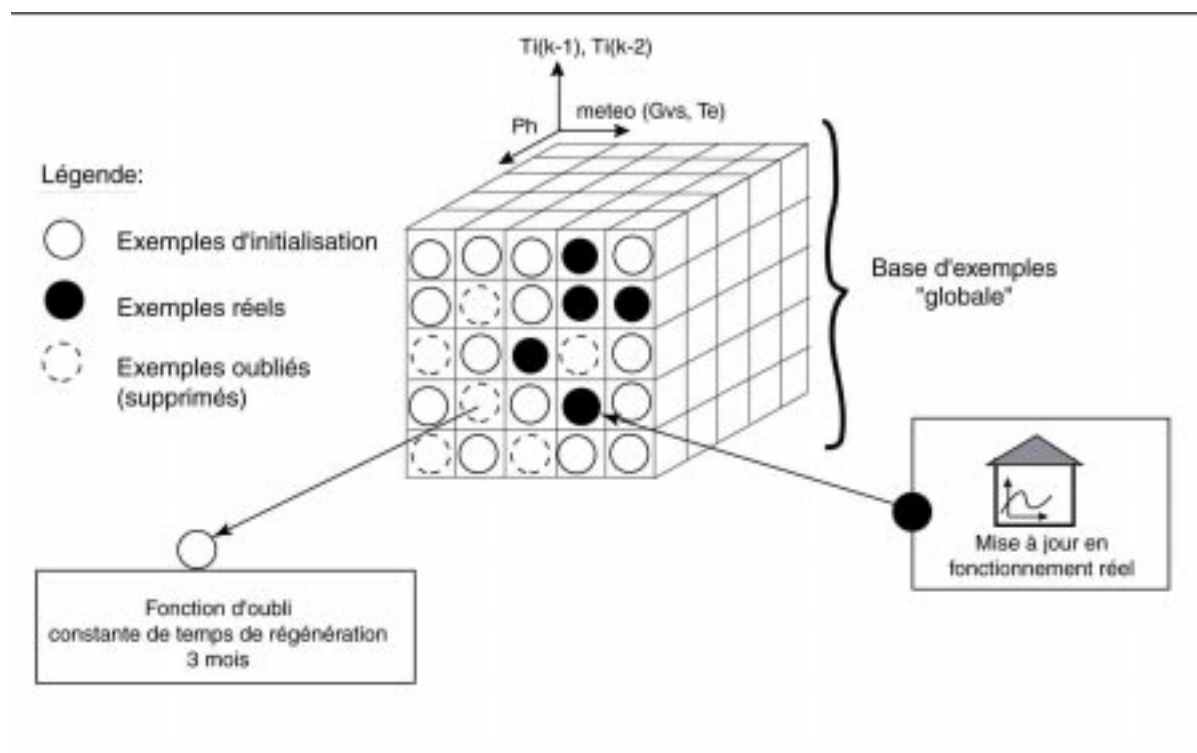
Es kann festgestellt werden, dass 82% der initialisierten Daten nach einer Heizsaison nicht durch reelle Daten aktualisiert wurden. Vorwiegend werden dieselben Zonen des Datenspeichers aktualisiert. Während einer Heizsaison finden ungefähr 15000 Aktualisierungen der Daten statt. Von den 1024 Datenpunkten wurden 82% nie aktualisiert, 8% zwischen 1 und 50 Mal aktualisiert, 8% zwischen 51 und 500 Mal aktualisiert und 2% mehr als 500 Mal aktualisiert worden..

Diese Daten-Speichermethode erlaubt es, die seltenen Datenpunkte zu speichern und vergleichbare Daten, welche keine zusätzlichen Information liefern, zu überschreiben. Da viele Datenpunkte in der Realität nicht auftreten, sind die Initialisierungsdaten nach einer Heizsaison immer noch zahlreich. Aufgrund dieses Faktum das gewählte Initialisierungsmodell auch nach mehreren Monaten einen Einfluss auf die Betriebsleistung des neuronalen Netzwerkes.

Da aber nach einer bestimmten Betriebsdauer das Initialisierungsmodell keinen Einfluss mehr auf die Vorhersageresultate des neuronalen Netzwerkes haben sollte, soll im folgenden verschiedene Methoden untersucht werden, um diesen Einfluss zu reduzieren. Die im nächsten Unterkapitel beschriebene erste Methode, besteht darin, die Initialisierungsdaten während des Betriebes zu vergessen.

Methode des beschleunigten Lernens: Ueberschreiben der Initialwerte

Die erste Methode zur Beschleunigung der Lernphase des neuronalen Netzwerkes entspricht einem schrittweisen forcierten Ueberschreiben der Initialisierungsbeispiele. Da die standardisierte Aktualisierung der Daten nicht erlaubt, den ganzen Eingangsraum des globalen Datenspeichers zu erneuern, wird mittels einer Vergessensfunktion zufallsmässig die Datenpunkte des globalen Datenspeichers mit einer Frequenz von 1024 Beispielen in drei Monaten (siehe Figur 24) ersetzt. Die Zeitkonstante von drei Monaten bedeutet nicht, dass alle initialisierten Datenpunkte während dieses Zeitraumes überschrieben werden, da bestimmte Datenpunkte bereits überschrieben wurden. Wurde z.B. der initialisierte Datenpunkt bereits durch einen realen Datenpunkt überschrieben, so wird dieser durch die Vergessensfunktion nicht ersetzt.



Figur 24: Datenspeicher des Gebäudemodells, dessen Daten mit dem Fortschreiten der Zeit überschrieben werden

Resultate

Tabelle 12 zeigt die nach einer simulierten Heizsaison aktualisierten Datenpunkte für sechs verschiedenen Initialisierungsmodelle.

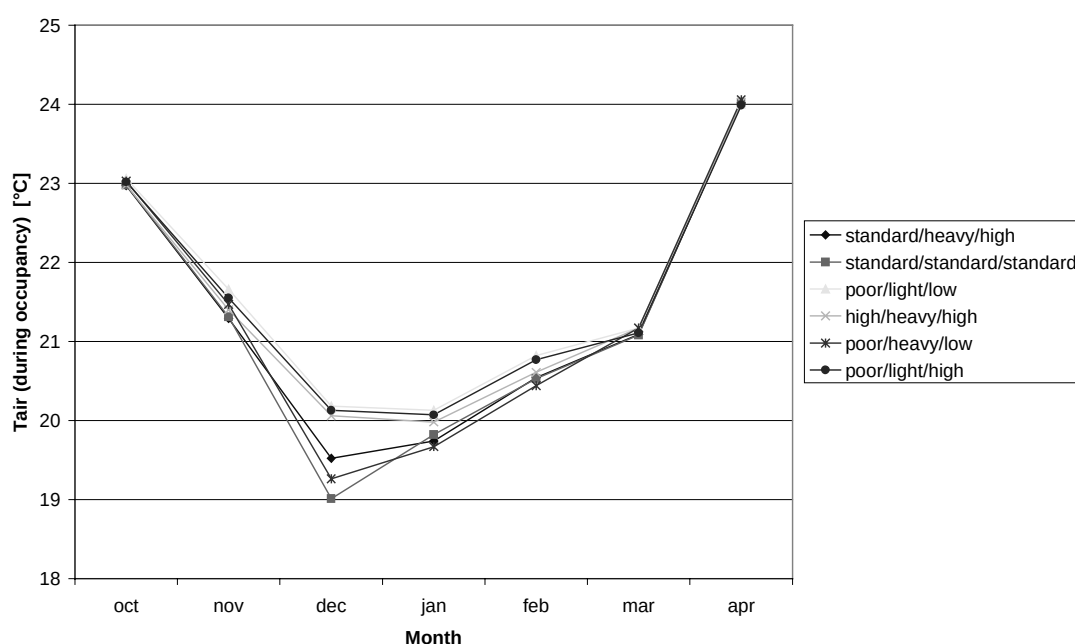
<i>Initialisierungsmodell</i>	<i>Anzahl Datenpunkte</i>	<i>Anzahl ueberschriebene Datenpunkte</i>	<i>Anzahl reelle Datenpunkte</i>	<i>Anzahl initialisierter Datenpunkte</i>
Med/High/High	1024	774	176	74
Med/Med/Med	1024	775	175	74
Low/Low/Low	1024	756	191	77
High/High/High	1024	763	184	77
Low/High/Low	1024	778	172	74
Low/Low/High	1024	762	187	75

Tabelle 12: Aktualisierung des globalen Datenspeichers mittels der Methode 1 (nach einer vollständigen Heizsaison mit sechs verschiedene Initialisierungsmodelle).

Nach einer simulierten Heizsaison kann festgestellt werden, dass der globale Datenspeicher (1024 möglichen Datenpunkte) 181 ± 10 reelle Beispiele enthält (Aktualisierung des globalen Datenspeichers) und 75 ± 2 Initialisierungsdatenpunkte. Die erhaltenen Schwankungen zwischen den verschiedenen Modellen resultieren aus der zufälligen Ueberschreibung des Datenspeichers mittels der Vergessensfunktion und einem Absuchen des Eingangsraumes, welcher abhängig vom Initialisierungsmodelles variiert. Das Anwenden einer Vergessensfunktion kann als effizient bezeichnet werden, da nach einer Heizsaison 71% der Datenpunkte des globalen Datenspeichers reellen Datenpunkten und 29% Initialisierungsdatenpunkte entspricht.

Leistungsvergleich (Energieverbrauch und Komfort)

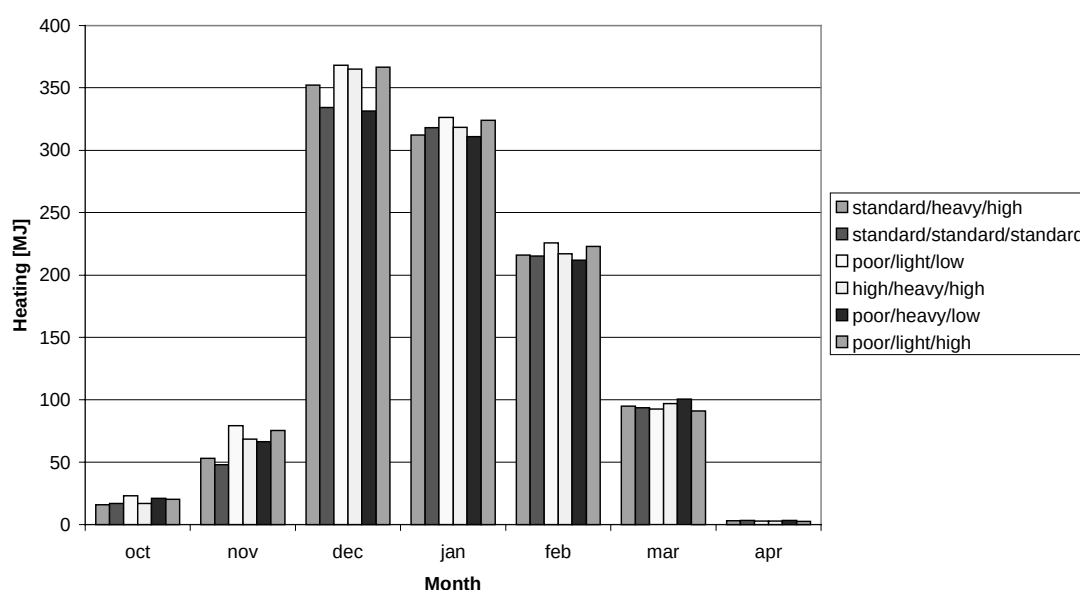
Figur 25 und Figur 26 zeigen die mittleren Monatstemperaturen während der Komfortperiode und die durchschnittlich gelieferte Heizleistung für einer Heizsaison. Auf den Graphiken kann die zeitliche Evolution der erhaltenen Unterschiede je nach Wahl des Initialisierungsmodelles verglichen werden.



Figur 25: Durchschnittliche monatliche Raumtemperatur während der Komfortperiode. Simulation mit Methode 1 während einer Heizsaison für verschiedene Initialisierungsmodelle.

Folgende Schlussfolgerungen können betreffend der Figur 25 und Figur 26 gemacht werden:

- Die resultierenden Schwankungen des Energieverbrauchs und der durchschnittlichen Raumtemperatur sind während der ersten Monate bedeutend (mit Ausnahme des Monats Oktober, da beinahe nicht geheizt wurde), insbesondere für den Monat Dezember. Die Unterschiede sind für die folgenden Monate (Februar, März, April) vernachlässigbar.
- Je nach gewähltem Initialisierungsmodell wird eine maximale Leistungsdifferenz von ungefähr 8% festgestellt. Die Definition des Sollwertes der Raumtemperatur durch den Benutzer würde diesen Unterschied kompensieren.



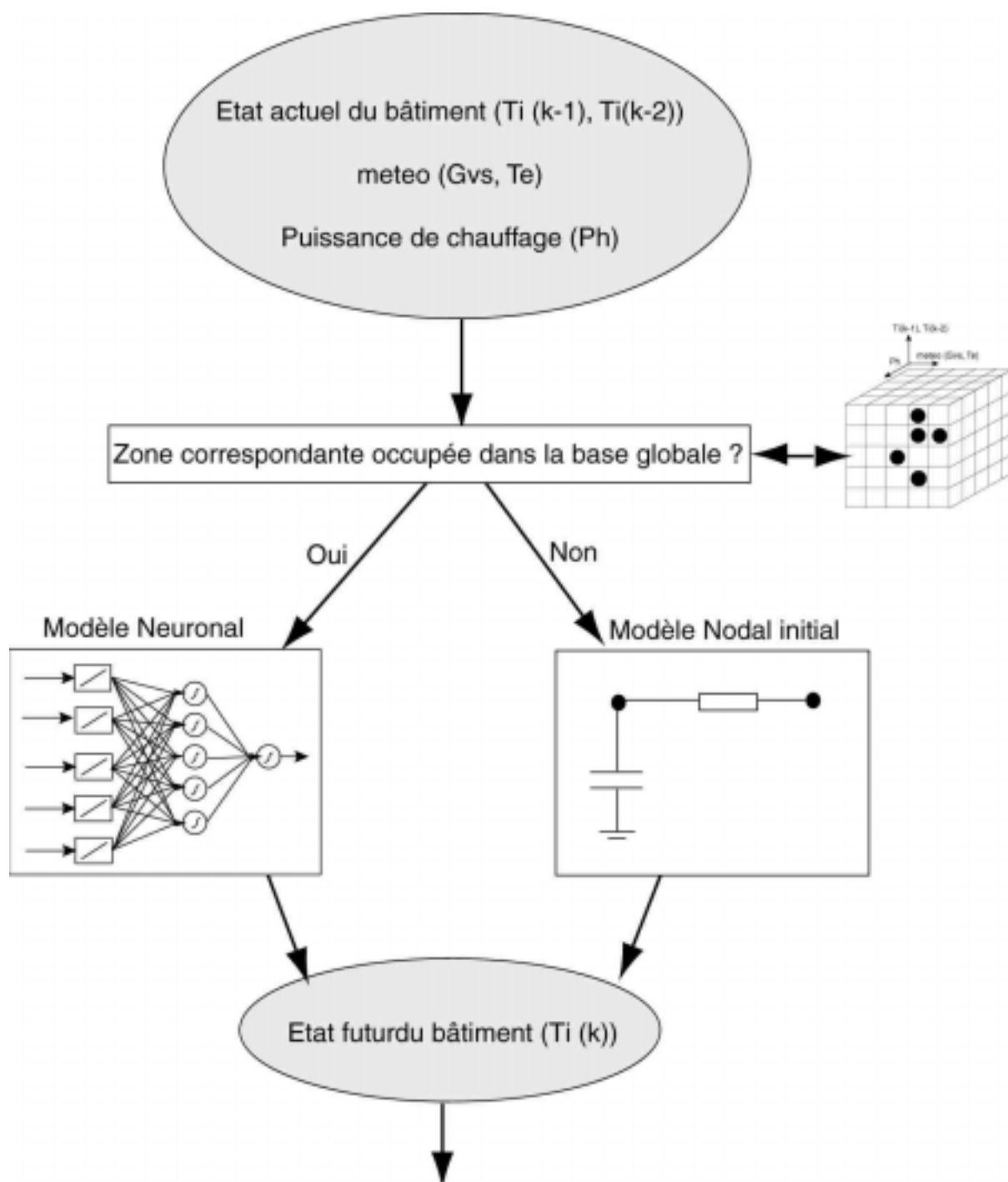
Figur 26: Durchschnittlicher monatlicher Energieverbrauch. Simulation mit Methode 1 während einer Heizsaison für verschiedene Initialisierungsmodelle.

Schlussfolgerung

Methode 1 zeigt nach wie vor, dass die Wahl des Initialisierungsmodelles ausschlaggebend ist. Die erhaltenen Schwankungen durch Anwendung verschiedener Initialisierungsmodelle sind im Vergleich zur nicht beschleunigten Lernphase grösser. Der durchschnittliche Energieverbrauch konnte optimiert werden (durchschnittlicher Energie-Jahresverbrauch von 1070 MJ mit Methode 1 gegenüber 1130 MJ ohne Beschleunigung der Lernphase). Dieses Faktum wird in der globalen Schlussfolgerung dieses Kapitels weiter. Global gesehen müssen die Resultate dieser Methode als nicht befriedigend bezeichnet werden.

Methode des beschleunigten Lernens: Zwei-Gebäudemodell

Bei dieser Methode wird das neuronale Netzwerkmodell nicht initialisiert, sondern lediglich mit realen Datenpunkten trainiert. Um bei der Inbetriebnahme einen korrekten Betrieb zu garantieren, wird das Initialisierungsmodell anstelle des neuronalen Modelles verwendet, falls der gemessene Datenpunkt sich nicht im globalen Datenspeicher befindet. Zur Berechnung der optimalen Heizleistung tastet der dynamische Programmieralgorithmus den gesamten Eingangsraum ab, wobei das gewählte Gebäudemodell angewendet wird (siehe Figur 27).

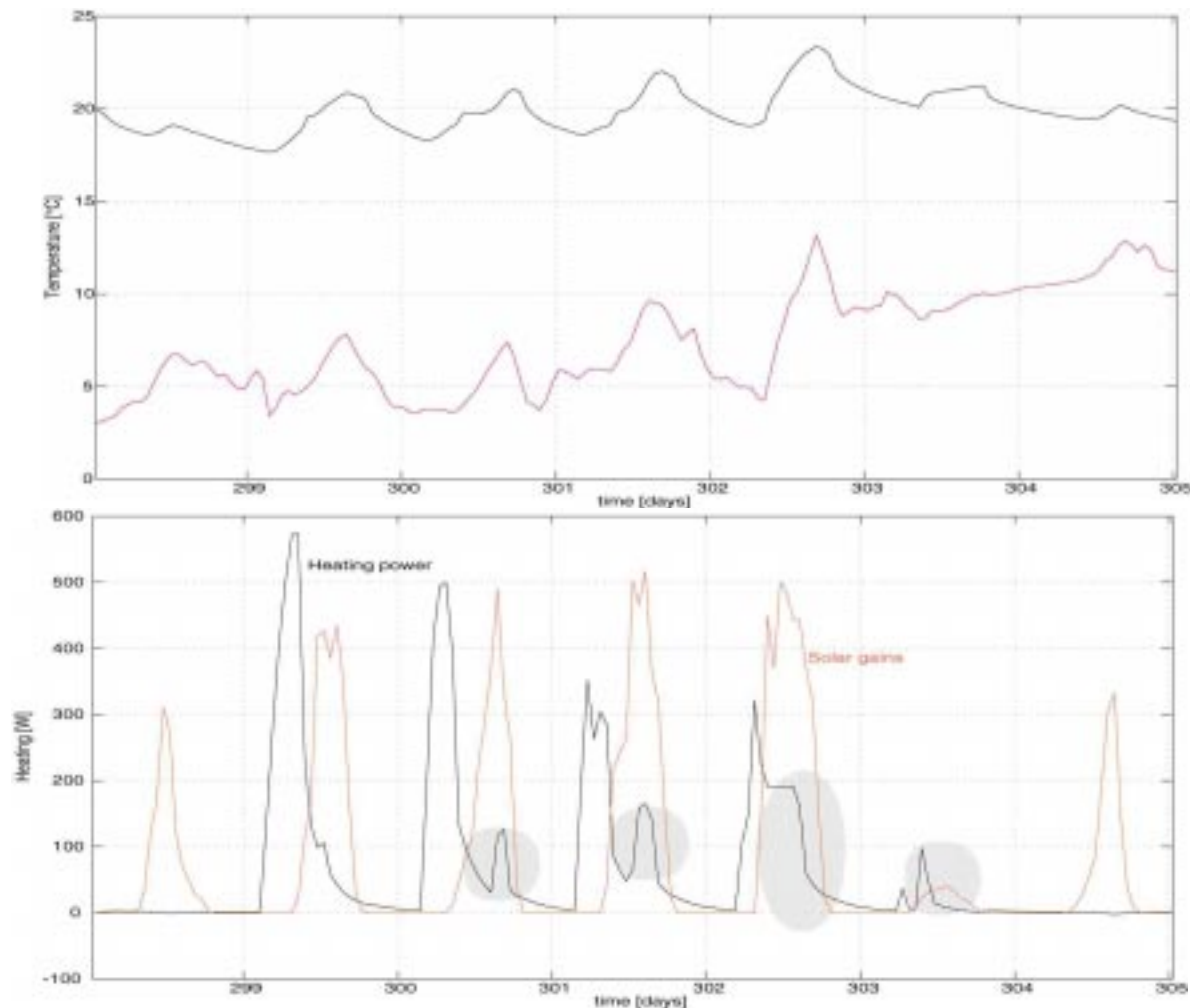


Figur 27: Applikation des Gebäudemodelles in Abhängigkeit des Zustandes des Datenspeichers des Gebäudemodelles

Resultate

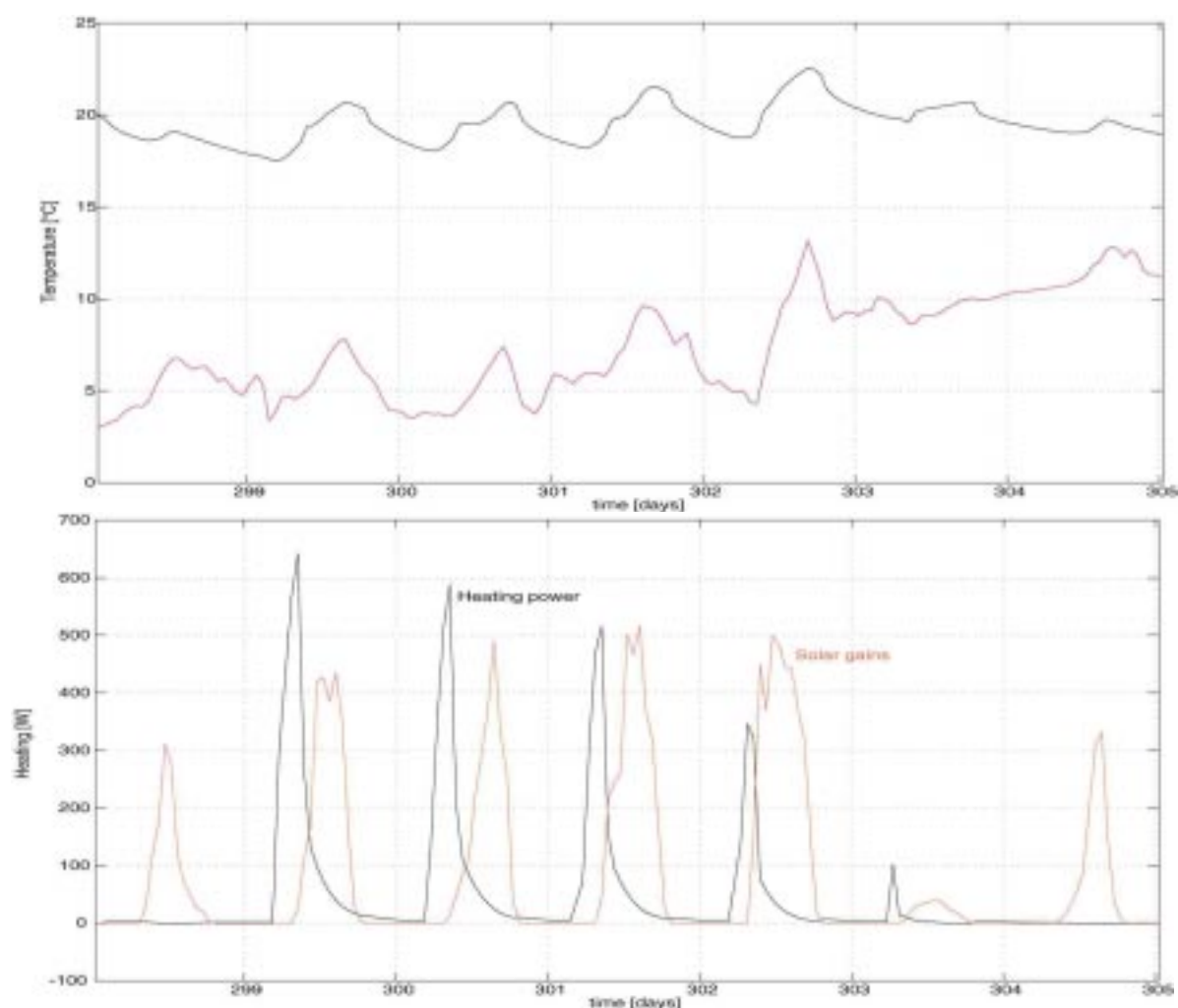
Der Betrieb dieses Zwei-Gebäudemodelles wurde mittels einer Simulation während einer Woche getestet, deren Resultate in Figur 28 gezeigt sind (Raumtemperatur und Aussentemperatur im oberen Graph, Sonneneinstrahlung und abgelieferte Heizleistung im unteren Graph)

Figur 28 zeigt deutlich, dass mit dieser Methode ein nicht-korrektter Betrieb auftreten kann (gekennzeichnet durch die graue Schraffierung der Heizleistung): im Falle einer Raumtemperatur von 22°C (Sollwerttemperatur: 20°C) und einer bedeutenden Sonneneinstrahlung, berechnet der Heizungsregler ein Leistungsstellsignal. Im Vergleich zu diesem nicht-korrekten Betrieb ist in Figur 29 dieselbe Simulation mit dem korrekten Betrieb dargestellt, wobei dabei das ursprüngliche neuronale Gebäudemodell verwendet wurde.



Figur 28: Simulation des NEUROBAT Reglers mittels Applikation eines Gebäudemodelles in Abhängigkeit des Zustandes des Datenspeichers. Graph oben zeigt die Raumtemperatur und die Aussentemperatur (in [°C]), Graph unten zeigt die Sonneneinstrahlung und die gelieferte Heizleistung. Die grau markierten Bereiche kennzeichnen die Perioden eines nicht-optimalen Betriebes

Das bei der Zwei-Gebäudemodell-Methode auftretende Problem besteht darin, dass mit einer Variation der Heizleistung keine Variation der berechneten Prädiktion der Raumtemperatur garantiert ist (Monotonie-Prinzip). Figur 30 veranschaulicht dieses Problem an einem konkreten Beispiel.

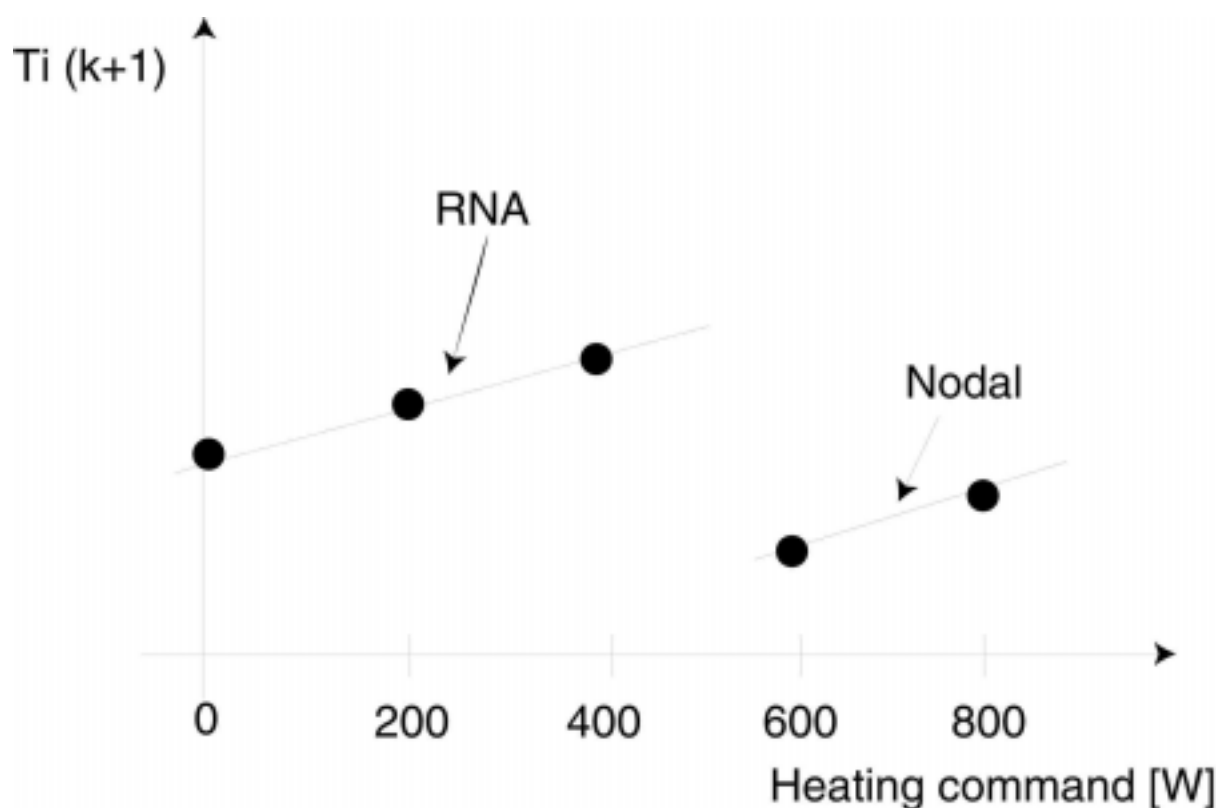


Figur 29: Simulation des NEUROBAT Reglers mittels Applikation des neuronalen Gebäudemodelles. Graph oben zeigt die Raumtemperatur und die Aussentemperatur (in [°C]), Graph unten zeigt die Sonneneinstrahlung und die gelieferte Heizleistung. Es treten keine nicht-optimalen Perioden auf.

Figur 30 zeigt die berechnete Prädiktion als Ausgang des Zwei-Gebäudemodelles für fünf mögliche Heizleistungs-Steuersignale des optimalen Regelalgorithmus. Je nach Heizleistungs-Steuersignal, kann eine Diskontinuität aufgrund der Anwendung von verschiedenen Gebäudemodellen auftreten. In einer entsprechenden Situation und falls die Raumtemperatur des Gebäudes zu hoch ist, wird der optimale Regelalgorithmus eine Heizleistung von 600 [W] berechnen, um die Gebäudetemperatur zu senken!

Schlussfolgerung

Dieses Zwei-Gebäudemodell sollte verfeinert werden, damit dieses dem Kriterium der Monotonie genügt, z.B. mittels einem Abgleichen beim Übergang von einem Modell zum anderen Modell. Diese Komplexität ist jedoch aufgrund der limitierten Rechenleistung unerwünscht (das verwendete Gebäudemodell wird während der Berechnung der optimalen Heizleistung appliziert, was zu einer Explosion der Rechenzeit führen könnte). Es ist einfacher, die Informationen des neuronalen Netzwerkmodelles dem globalen Datenspeicher zuzuführen, wobei diese Lösung genau der bis dahin verwendeten Methode entspricht.



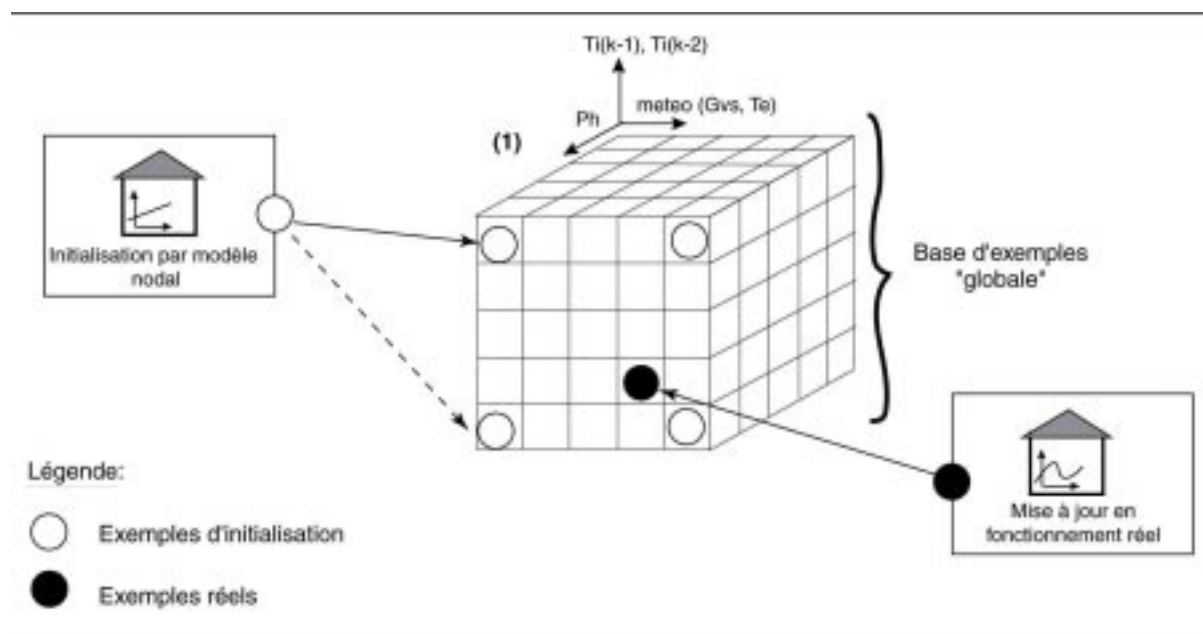
Figur 30: Optimale Heizleistung als Ausgang des dynamischen Programmieralgorithmus für das neuronale und nodale Gebäudemodell für die fünf möglichen Heizzustände (illustratives Beispiel). Eine nicht-monotone Steigung der des Ausgangs (Raumtemperatur) kann festgestellt werden.

Methode des beschleunigten Lernens: Partielle Initialisierung des Datenspeichers

Die erste Methode des beschleunigten Lehrnprozesses hat interessante Resultate aufgezeigt (insbesondere die Optimierung der Reglerleistungen), jedoch konnte der Einfluss des Initialisierungsmodelles nicht zufriedenstellend reduziert werden. Die hier vorgeschlagene dritte Methode soll während der Initialisierungsphase lediglich die am Rande des globalen Datenspeichers befindenden Datenpunkte generieren (32 Datenpunkte), wie in Figur 31 zu sehen ist.

Bei lediglich 32 Datenpunkte sollte sich der Einfluss des Initialisierungsmodelles in Anbetracht einer Beschreibung des globalen Datenspeichers mittels reellen Daten rasch verringern, wobei auf die Vergessensfunktion aus Methode 1 verzichtet werden kann. Die 32 sich am Rande des globalen Datenspeichers befindenden Datenpunkte wurden aus folgenden Gründen gewählt:

- Eine Initialisierung des linearen Knotenmodells mit lediglich 32 Beispielen ist möglich.
- Bei jeder der vorgeschlagenen Methoden wird die Information am Rande des globalen Datenspeichers nicht gelöscht. Dies erlaubt dem neuronalen Netzwerk eine Extrapolation ausserhalb des Bereiches der Lernbeispiele (Kontrollfunktion).



Figur 31: Initialisierung des Datenspeichers des Gebäudemodelles. Lediglich die Extremwerte des Datenspeicher werden abgespeichert (24 anstatt 1024 Daten)

Resultate

Tabelle 13 zeigt die Anzahl der Datenpunkt-Aktualisierungen für sechs verschiedenen Initialisierungsmodellen nach einer simulierten Heizsaison.

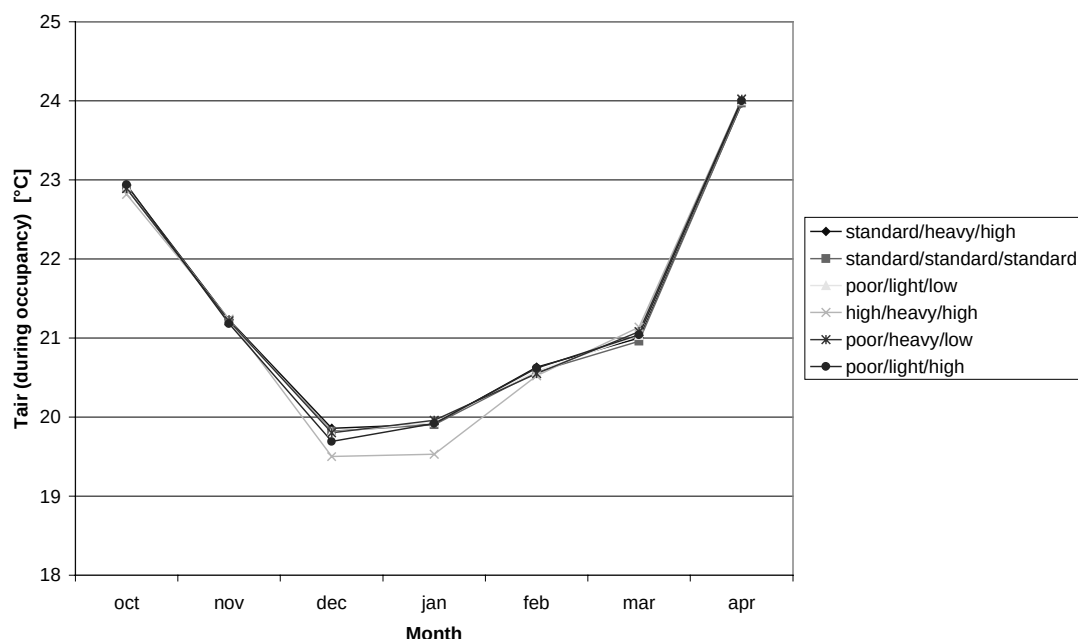
<i>Initialisierungsmodell</i>	<i>Anzahl Datenpunkte</i>	<i>Anzahl ueber-schriebene Datenpunkte</i>	<i>Anzahl relle Datenpunkte</i>	<i>Anzahl init-ialisierter Daten-punkte</i>
Med/High/High	0	812	183	29
Med/Med/Med	0	815	180	29
Low/Low/Low	0	822	173	29
High/High/High	0	814	181	29
Low/High/Low	0	818	177	29
Low/Low/High	0	821	174	29

Tabelle 13: Aktualisierung des globalen Datenspeichers mittels der Methode 3 (nach einer vollständigen Heizsaison). Sechs verschiedene Initialisierungsmodelle wurden simuliert.

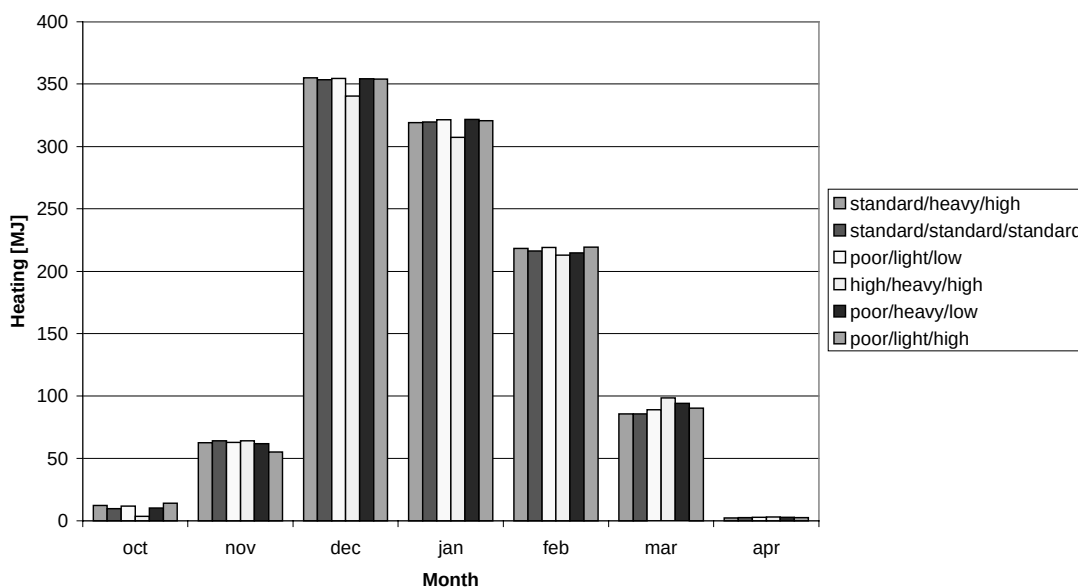
Es kann festgestellt werden, dass nach einer simulierten Heizsaison 29 Initialisierungsbeispiele im globalen Datenspeicher verbleiben (zu Beginn 32 Datenpunkte), welches einem Verhältnis von 15 % entspricht. Die geringe Aktualisierungsrate der Initialisierungsdatenpunkte erklärt sich durch die geringe Wahrscheinlichkeit des Auftretens eines Datenpunktes am Rande des globalen Datenspeichers. Ein Betrieb während der Sommerjahreszeit würde diese Aktualisierungsrate weiter steigern.

Leistungsvergleich (Energieverbrauch und Komfort)

Figur 32 und Figur 33 zeigen die mittleren Monatstemperaturen während der Komforperiode und die durchschnittlich gelieferte Heizleistung für einer Heizsaison. Auf den Graphiken kann die zeitliche Evolution der erhaltenen Unterschiede je nach Wahl des Initialisierungsmodelles verglichen werden.



Figur 32: Durchschnittliche monatliche Raumtemperatur während der Komfortperiode. Simulation mit Methode 3 während einer Heizsaison für verschiedene Initialisierungsmodelle.



Figur 33: Durchschnittlicher monatlicher Energieverbrauch. Simulation mit Methode 1 während einer Heizsaison für verschiedene Initialisierungsmodelle

Folgende Schlussfolgerungen können gemäss Figur 32 und Figur 33 gemacht werden:

- Die resultierenden Energiesschwankungen und die Variation der durchschnittlichen Raumtemperaturen konnten im Verhältnis zur Methode 1 stark reduziert. Der Einfluss der Initialisierungsmodelle wurde reduziert.
- Zwischen den Anwendung der verschiedenen Initialisierungsmodellen besteht ein kleiner Unterschied. Insbesondere durch die Verwendung des Initialisierungsmodelles

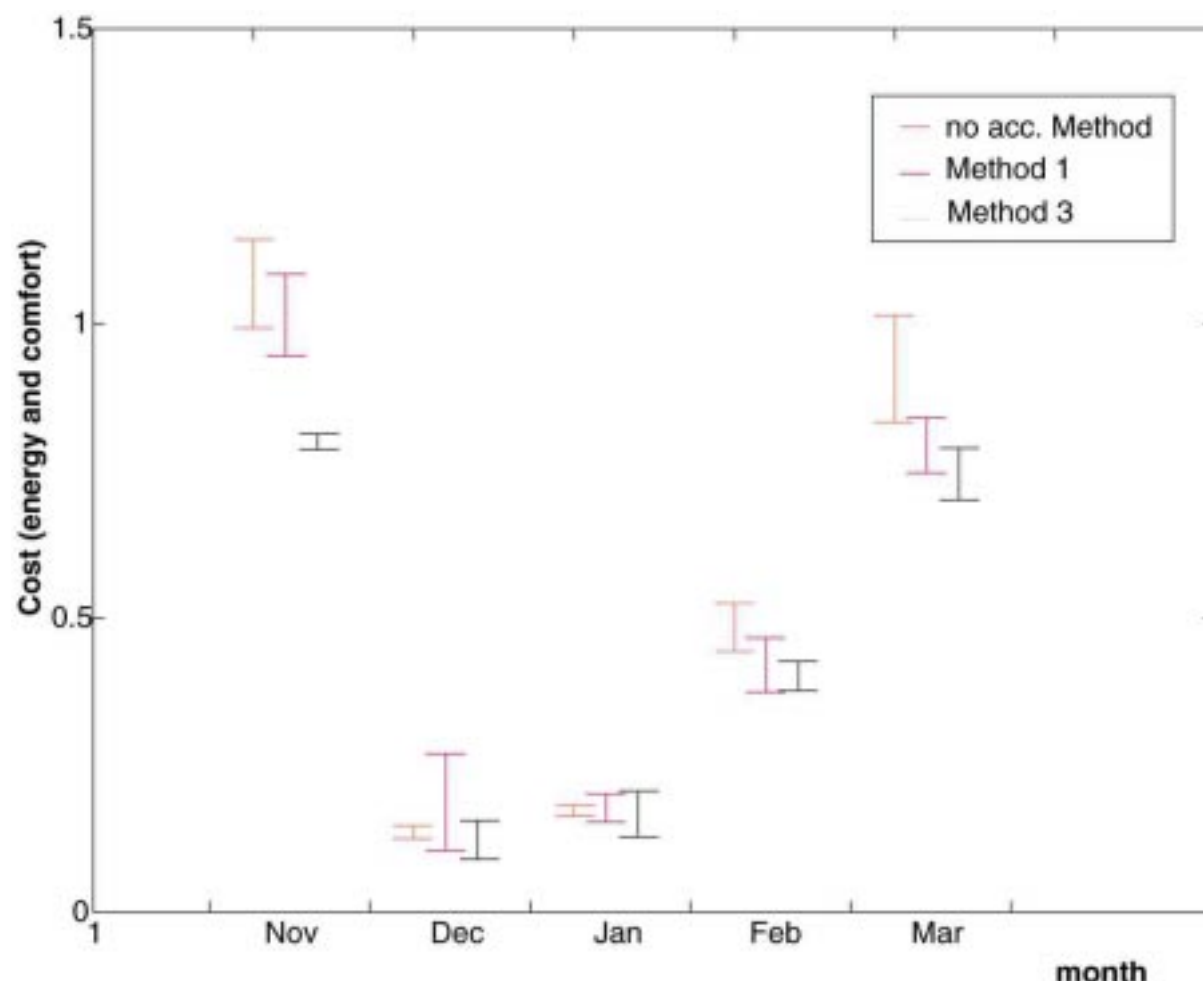
(high/high/high) resultiert ein kleinerer Energieverbrauch, liefert jedoch eine geringere durchschnittliche Raumtemperatur während der Komfortperiode im Monat Dezember und Januar.

Schlussfolgerung

Mittels Anwendung der Methode 3 für die Beschleunigung des Lernprozesses konnte der Einfluss der Initialisierungsmodelle reduziert werden. Mit Blick auf die Resultate sei jedoch angefügt, dass die Vergleiche des Energieverbrauchs und der Raumtemperatur lediglich Teilinformationen liefern und nicht erlauben, die Leistung des Heizungsreglers global zu beurteilen. Wie bekannt ist, stützt sich der NEUROBAT-Regelalgorithmus auf die Kosten von Energie und Komfort und geringere Funktionskosten weisen auf eine bessere Leistung des Heizungsreglers hin.

3.3.1.2 Schlussfolgerung der beschleunigten Lernphase

Figur 34 zeigt die monatlichen Kosten (Energie und Komfort) betreffend der Anwendung der Methoden NEUROBAT (nicht beschleunigte Lernphase), Methode 1 (Vergessensfunktion) und Methode 3 (partielle Initialisierung).



Figur 34: Täglicher Kostenwert (durchschnittliche Energiekosten und Komfortkosten) für den normalen (nicht-beschleunigten) Lernalgorithmus und die Lernmethoden 1 und 3. Die Fehlerstreuung kennzeichnen die durchschnittlichen Fluktuationen, welche durch die Applikation der sechs verschiedenen Initialisierungsmodelle entsteht.

3.3.2 Klimamodell

3.3.2.1 Modelloptimierung

Konzept

Das entwickelte Konzept einer Modelloptimierung der Klimamodelle umfasst eine Kombination von zwei (oder mehreren) separat trainierten Modellen. Dabei wird eines der Modelle mit den kumulativen Daten der Jahresaison (Winter, Frühling, Sommer, Herbst) abgestimmt, das andere Modelle basiert auf den temporären Klimadaten der letzten Woche. Generell verhält sich ein Saison-Klimamodell robuster als ein Modell, das lediglich auf temporären Daten von wenigen Wochen basiert, jedoch reagiert das Saison-Klimamodell wenig präzise auf kurzfristige Änderungen des Klimas. Daher gründet die Idee, ein Saison-Klimamodell mit einem Modell, das auf temporären Klimadaten beruht, zu kombinieren.

Die beiden Klimamodelle sind mittels den Parameter-Sets zweier neuronale Netzwerken A1 und A2 definiert. Das resultierende Klimamodell entspricht einer Interpolation der Modelle A1 und A2 mit:

$$A = \mu \cdot A1 + (1 - \mu) \cdot A2$$

wobei μ einer Gewichtung der verschiedenen Klimamodelle entspricht. Die Bestimmung des Gewichtungsparmeters μ entspricht ebenfalls einer Funktion, die mittels eines neuronalen Netzwerkes ausgedrückt wird.

Resultate

Eine Analyse betreffend des optimierten Klimamodelles wurde mit Klimadaten in Lausanne der Jahreszeit Frühling aus dem Jahr 1982 durchgeführt. Dabei wurde nach jedem Tag die Parameter der beiden Klimamodelle neu berechnet, wobei Modell A1 mit den kumulativen Daten der Jahreszeit trainiert wurde und Modell A2 mit den Daten aus der vorgängigen Woche. Die Modelle werden verwendet, um die globale horizontale Sonneneinstrahlung für einen Zeitraum von 6 Wochen auf einem Zeithorizont von 6 Stunden vorherzusagen. Die Vorhersagedaten des kombinierten Modelles (gemäss der Beschreibung im Kapitel „Konzept“) wurden mit einem Gewichtungsparmeter μ berechnet, welcher mittels des LMS Algorithmus für den bestimmt wurde (Minimierung des Vorhersagefehlers aufgrund der Daten des vorherigen Tages). Der Vergleich der Vorhersageresultate ist in Tabelle 14 wiedergegeben, wobei die Mittelwerte des Vorhersagefehlers in der oberen Tabelle zusammengefasst werden und die Standardabweichung des Vorhersagefehlers in der unteren Tabelle zu sehen sind.

	1 Std	2 Std	3 Std	4 Std	5 Std	6 Std
Saison-Modell	15.6444	10.1445	11.1092	9.6870	14.1880	12.6836
Kurzzeit-Modell	13.3257	13.5552	13.0642	11.4708	-4.7158	12.3827
Kombi-Modell	14.5384	11.7935	11.9576	11.2607	4.3849	13.9995

	1 Std	2 Std	3 Std	4 Std	5 Std	6 Std
Saison-Modell	189.7835	169.0517	163.9829	157.5694	143.2956	152.9657
Kurzzeit-Modell	187.5473	187.5768	188.6891	171.4814	175.4251	177.8126
Kombi-Modell	186.8936	175.5851	162.6583	158.3323	161.0983	158.3192

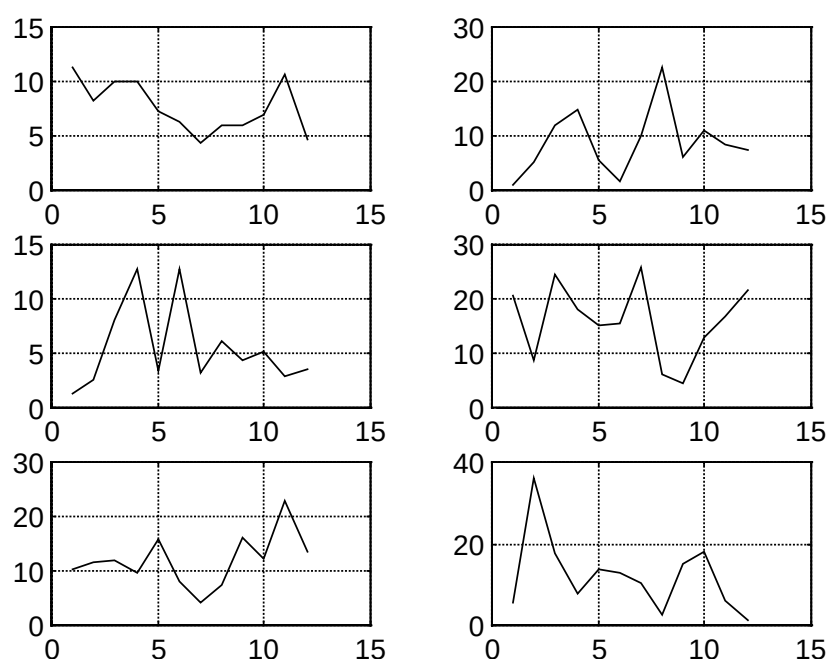
Tabelle 14: Vergleich der Resultate der verschiedenen Klimamodelle

Die Resultate bestätigen das eingeführte Konzept, wobei der Mittelwert des Vorhersagefehlers des Kurzzeit-Modell kleiner ist, jedoch eine grössere Streuung resultiert, oder mit anderen Worten, eine präzisere Schätzung resultiert, die jedoch weniger verlässlich ist. Im Vergleich zum Kurzzeit-Modell, resultiert für das Jahreszeiten-Modell ein grösserer Mittelwert des Vorhersagefehlers, jedoch eine kleinere Streuung. Das kombinierte Modell versucht nun die Vorteile dieser beiden Vorhersagemodelle zu kombinieren, wobei dies betreffend des Offsets des Vorhersagefehlers gelingt, jedoch weniger gut für die Streuung.

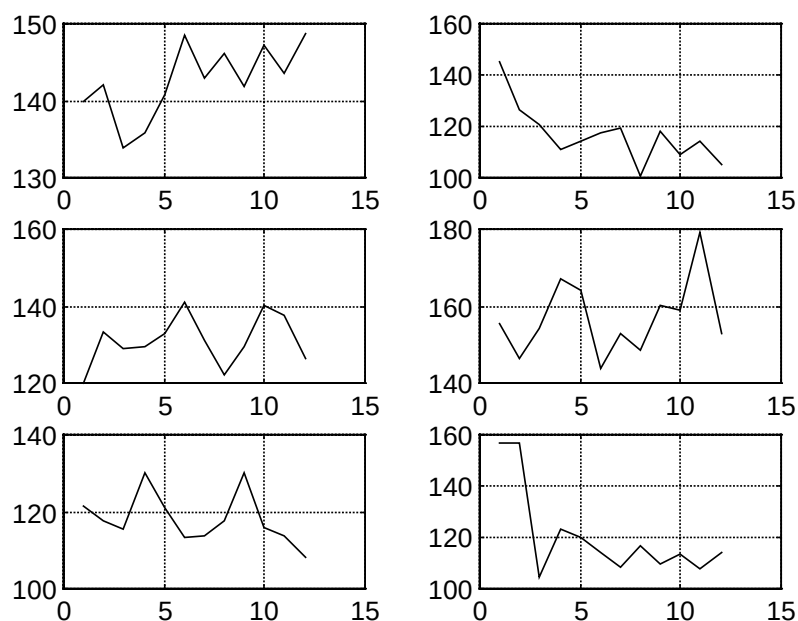
Es kann gefolgert werden, dass die Kombination der beiden Modelle keine wesentlichen Vorteile betreffend der Qualität der Vorhersage resultiert und dass die Anwendung eines kumulativen Saison-Modells die besten Resultate liefert.

3.3.2.2 Datenspeicheroptimierung

Eine nicht-untersuchte Frage betreffend der Klimamodelle ist jene der optimalen Grösse des Datenspeichers und in welchem Zeitraum die Parameter der Modelle neu berechnet werden sollen. Die Klimamodelle des NEUROBAT Reglers aus Phase I wurden am Ende einer Woche neu berechnet, wobei dies mittels eines 6-wöchigen Datenspeichers vollzogen wurde. Im folgenden soll wiederum jede Woche eine Neu-Berechnung der Modellparameter durchgeführt werden und die optimale Datenspeicherlänge bestimmt werden.



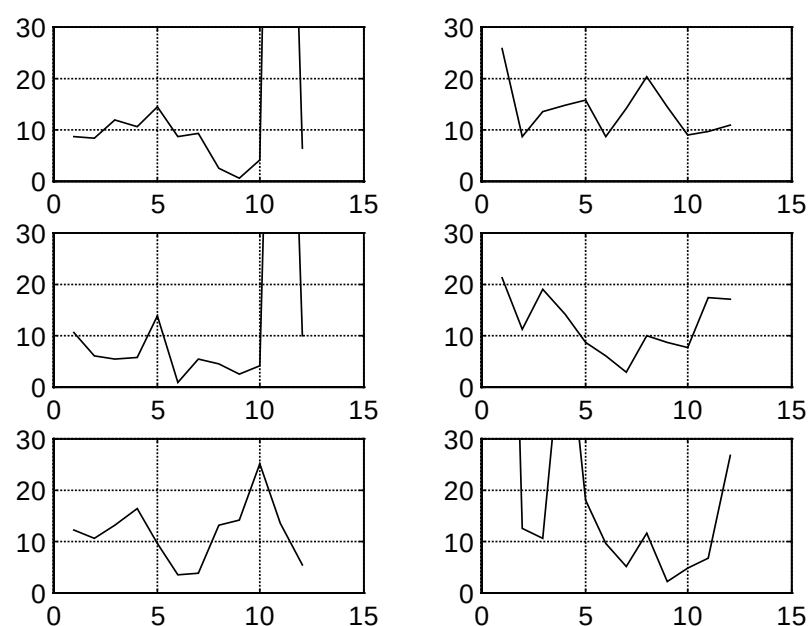
Figur 35: Vorhersagefehler für Vorhersageschritt 1,2 und 3 Stunden linkerseits und 4, 5 und 6 Stunden rechterseits.



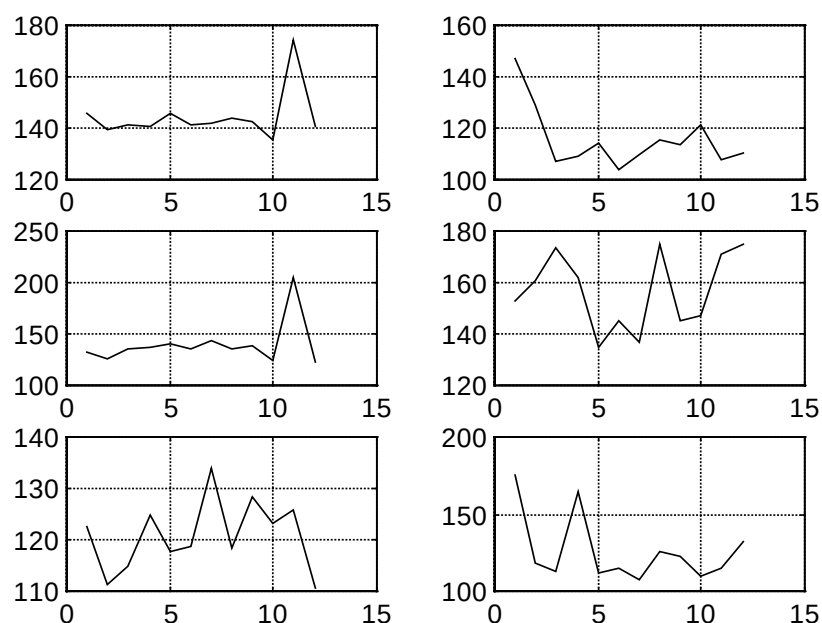
Figur 36: Standardabweichung für Vorhersageschritt 1,2 und 3 Stunden linkerseits und 4, 5 und 6 Stunden rechterseits

Figur 35 und Figur 36 zeigen den durchschnittlichen Vorhersagefehler, sowie die Standardabweichung des Vorhersagefehlers für verschieden Datenspeicherlängen (x-Achse).

Es kann gefolgert werden, dass der durchschnittliche Vorhersagefehler mit steigender Datenspeicherlänge lediglich für die 6-Stunden-Vorhersage kleiner wird (von einer Speicherlänge von 4 Wochen an). Die Streuung des Vorhersagefehlers verhält sich analog.

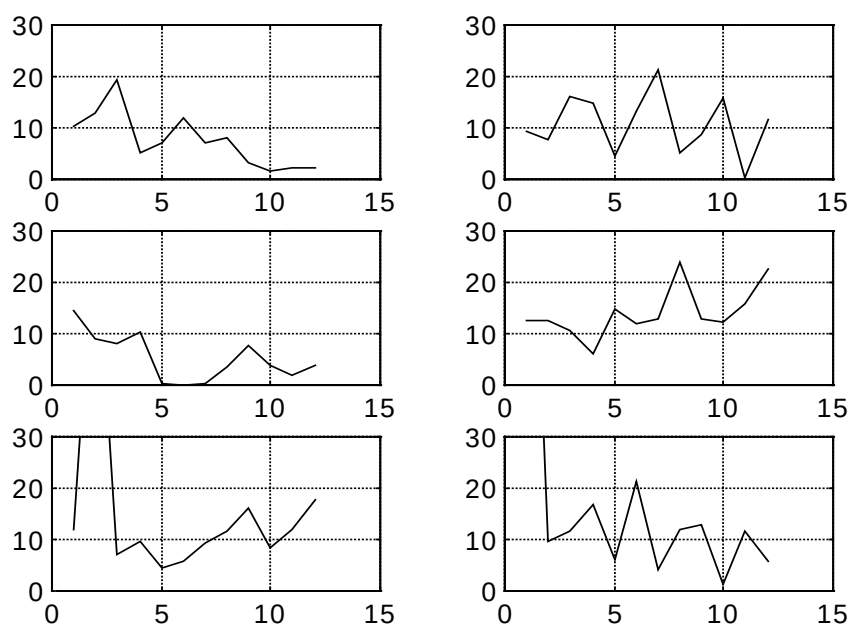


Figur 37: Vorhersagefehler für Vorhersageschritt 1,2 und 3 Stunden linkerseits und 4, 5 und 6 Stunden rechterseits

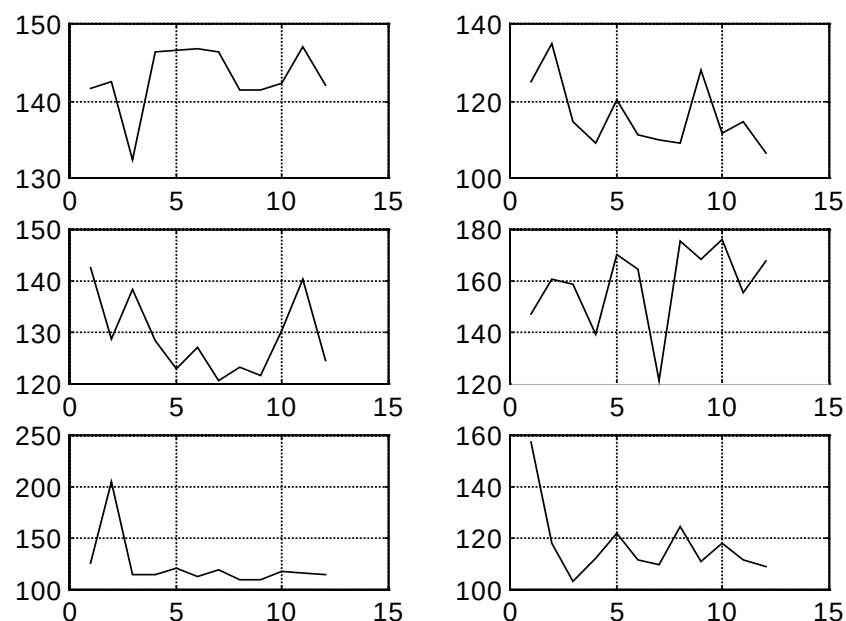


Figur 38: Standardabweichung für Vorhersageschritt 1,2 und 3 Stunden linkerseits und 4, 5 und 6 Stunden rechterseits

Um die Resultate aus Figur 35 und Figur 36 zu bestätigen, wurde eine zweite Analyse durchgeführt, wobei die Initialisierungswerte der Simulationsmodelle verändert wurden. Figur 37 und Figur 38 bestätigen die vorgängigen Resultate, wobei für alle Vorhersagemodelle (1 bis 6 Stunden) der durchschnittliche Vorhersagefehler mit längerem Datenspeicher sinkt, jedoch lediglich bis zu einer Länge von 6 Wochen.



Figur 39: Vorhersagefehler für Vorhersageschritt 1,2 und 3 Stunden linkerseits und 4, 5 und 6 Stunden rechterseits



Figur 40: Standardabweichung für Vorhersageschritt 1,2 und 3 Stunden linkerseits und 4, 5 und 6 Stunden rechterseits

Figur 39 und Figur 40 zeigen die Resultate des durchschnittlichen Vorhersagefehlers und der Streuung des Vorhersagefehlers, falls täglich eine Neu-Berechnung der Modellparameter durchgeführt wird, wiederum in Abhängigkeit der Datenspeicherlänge.

3.3.3 Schlussfolgerung

Eine Optimierung der Klimamodelle (Vorhersage der Sonneneinstrahlung) wurde mittels einer Kombination eines Saison-Modelles mit einem Kurzzeit-Modell (basierend auf Klimadaten von einigen wenigen Wochen) erreicht. Die Resultate der Vorhersagefehler und deren Streuung zeigen eine Verbesserung, doch im Hinblick auf eine Implementation auf eine industrielle Plattform erscheint der zusätzliche Aufwand als nicht gerechtfertigt. Für die Endversion des NEUROBAT Reglers wird deshalb ein kumulatives Saison-Modell angewendet, welches nebst den Jahreszeit-Daten ebenfalls die kurzzeitigen Schwankungen berücksichtigt.

Die Analyse der optimalen Länge des Datenspeichers ergab einen Wert von 4 bis 6 Wochen, wobei im Unterschied zum ursprünglichen Konzept (wöchentliche Neu-Bestimmung der Modellparameter) eine tägliche Berechnung der Modell-Parameter ausgeführt wird.

3.4 Heizungsreglerversion

3.4.1 Einführung

Wie die Resultate in Kapitel 1 zeigen, ermöglicht der NEUROBAT Heizungsregler eine Optimierung des Benutzerkomfortes mit Energieeinsparungen von 10% und mehr. Der Markterfolg eines Heizungsreglers basiert jedoch nicht nur auf einer optimalen Betriebsleistung, sondern erfordert zusätzlich eine einfache und kostengünstige Inbetriebnahme des Heizungsreglers. Die Resultate in Kapitel 3.1 bestätigen den Faktor einer vereinfachten Inbetriebnahme, welche auf lernfähigen Regelmodulen (mittes neuronalen Netzwerken) des NEUROBAT Regelkonzeptes beruht.

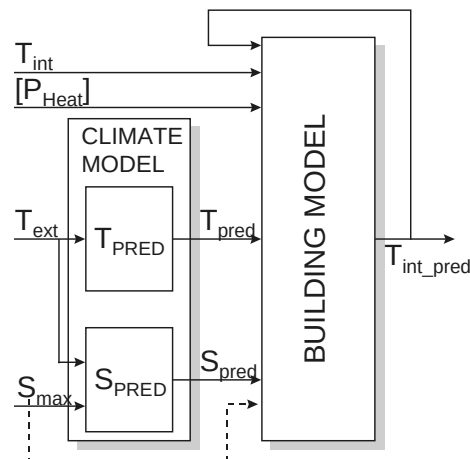
Um jedoch nicht nur eine einfache, sondern ebenfalls kostengünstige Installation und Inbetriebnahme des NEUROBAT Heizungsreglers zu gewährleisten, werden im folgenden weniger leistungsfähige ‚plug-and-play‘ Heizungsreglerversionen untersucht. Mit Referenz zu der Anforderung von kostengünstigen, aber weniger leistungsfähigen Heizungsreglerversionen, werden folgende NEUROBAT Reglerversionen definiert:

- Die NEUROBAT Referenzreglerversion (Reglerversion I) verfügt über die während des NEUROBAT Projektes, Phase I, definierten Sensorsignale der Sonneneinstrahlung, Vorlauf-, Rücklauf-, Aussen- und Raumtemperatur. Die Resultate der Betriebsleistung dieser Reglerversion sind im einführenden Kapitel 1 beschrieben.
- Die NEUROBAT Reglerversion II erfasst Vorlauf-, Rücklauf-, Aussen- und Raumtemperatur. Die Analyse der Betriebsleistung dieser Reglerversion ist in Paragraph 3.4.2 detailliert.
- Da die Referenzgrösse der Raumtemperatur in einem Gebäude nicht oder nur annähernd mittels eines Raumtemperatursensoren bestimmt werden kann, verzichtet die NEUROBAT Reglerversion III auf diese Messgrösse. Im Vergleich zur Referenzversion des NEUROBAT Reglers verfügt die NEUROBAT Reglerversion III über die Sonneneinstrahlung, Vorlauf-, Rücklauf- und Aussentemperatur.
- Die ‚Low-Cost‘-Version des NEUROBAT Reglers entspricht der Reglerversion IV und verfügt lediglich über die Vorlauf-, Rücklauf- und Aussentemperatur. Die Resultate der Betriebsleistung dieser Reglerversion ist in Paragraph 3.4.3 beschrieben.

3.4.2 Reglerversion ohne Sonnenfühler

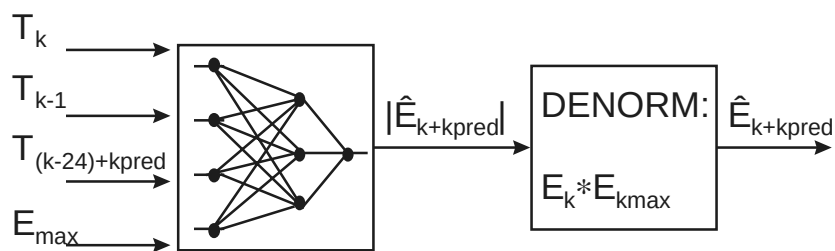
Das prädiktive Reglerkonzept der NEUROBAT Referenzversion (siehe Figur 1) verfügt über ein neuronales Klimavorhersagemodul und gestattet ein verbessertes Management der Fremdwärme (Sonneneinstrahlung, Abwärme von Mensch und Maschine etc.). Die Vorhersagewerte der Aussentemperatur und der Sonneneinstrahlung des neuronalen Klimavorhersagemoduls sind als Eingänge des Gebäudemoduls geschaltet und ermöglichen damit das zukünftige Verhalten des Gebäudes zu simulieren.

Die Vorhersage der Sonneneinstrahlung entspricht einem neuronalen Netzwerkmodell mit den Eingängen der aktuellen und vergangenen Werten der Sonneneinstrahlung, welche für die NEUROBAT Reglerversion II nicht zur Verfügung stehen. Für die Substitution dieser Sensorsignale wird einerseits die Änderungsrate der Aussentemperatur herangezogen (Reglerversion II/1), andererseits soll die Vorhersage der Sonneneinstrahlung durch den Funktionswert der maximal möglichen Sonneneinstrahlung ersetzt werden (Reglerversion II/2). Figur 41 zeigt schematisch das Konzept der Reglerversionen II/1 und II/2 betreffend der Substitution der Sensorsignale der globalen, horizontalen Sonneneinstrahlung.



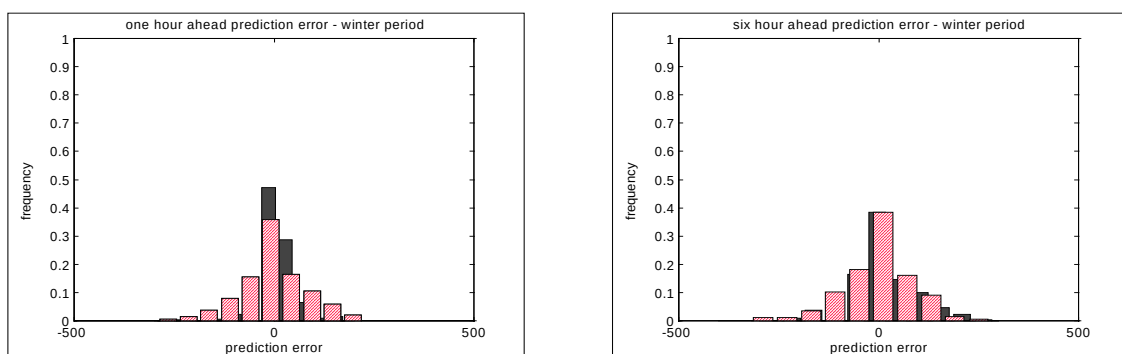
Figur 41: Optionen der Vorhersage der Sonneneinstrahlung ohne Sonnenfühler

Bevor die Betriebsleistung der NEUROBAT Reglerversionen II/1 und II/2 analysiert wird, soll die Vorhersage der globalen, horizontalen Sonneneinstrahlung mittels den Messwerten der Aussentemperatur auf ihre Machbarkeit hin untersucht werden (Reglerversion II/1). Figur 42 zeigt das Prädiktionsmodell der Sonneneinstrahlung mit den gewählten Eingängen des neuronalen Modelles: den aktuellen und vergangenen Aussentemperaturwerten, sowie der maximal, möglichen Sonneneinstrahlung zum Zeitpunkt der Vorhersage.



Figur 42: Sonneeinstrahlungsberechnung mittels neuronalem Netzwerk (Option II/2)

Die Untersuchung der Vorhersagequalität der Sonneneinstrahlung der Reglerversion II/1, welche in Figur 43 durch die Histogramme der Vorhersagefehler (im Vergleich zum Vorhersagefehler der Sonneneinstrahlung der NEUROBAT Referenzversion mit Sonnenfühler in fettgedruckten Balken) für den Vorhersageschritt von 1 und 6 Stunden wiedergegeben ist, zeigt insbesondere für grosse Prädiktionsschritte keinen Qualitätsverlust. Für eine Simulationsstudie während den Wintermonaten beträgt die Standardabweichung des Vorhersagefehlers für das ‚reduzierte‘ Vorhersagemodell der Reglerversion II/1 für alle Prädiktionsschritte 82 W/m^2 , während dieser Wert für das ursprüngliche Vorhersagemodell der Referenzreglerversion für dieselbe Simulationsperiode von 45 W/m^2 gegen 82 W/m^2 ansteigt.



Figur 43: Vorhersagequalität der Sonneneinstrahlung im Vergleich

Die Resultate betreffend der Vorhersagequalität des reduzierten Klimamodells der Reglerversion II/1 zeigen, dass aufgrund einer generell reduzierten Vorhersagequalität der Sonneneinstrahlung und mittels des neuronalen Referenzmodells die Messwerte der Sonneneinstrahlung durch die Signalwerte der Aussentemperatur ersetzt werden können.

3.4.2.1 Heizungsregler-Betriebsleistung ohne Sonnenfühler

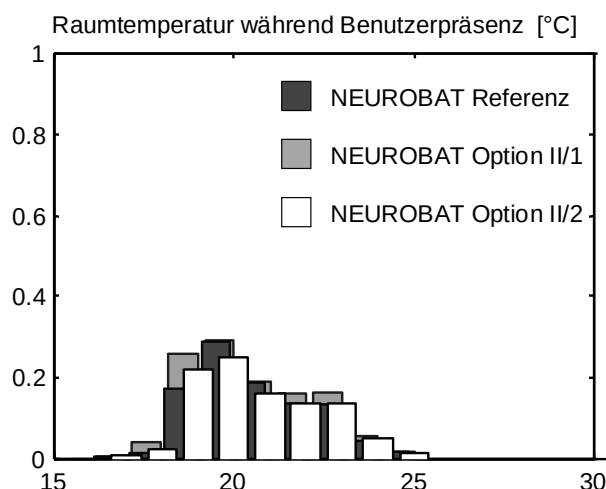
Zur Analyse der Betriebsleistung der NEUROBAT Reglerversion II (II/1 und II/2) wurde die folgende Simulationsstudie durchgeführt: während einer Heizsaison wurden die Betriebsdaten der Heizungsreglerversionen II/1 und II/2 mit der NEUROBAT Referenzversion verglichen, welche in Tabelle 15 zusammengefasst sind. Da für die Reglerversionen II/1 keine Messwerte der Sonneneinstrahlung zur Verfügung stehen, wird das ‚reduzierten‘ Klimamodell dieser Reglerversion nicht adaptiert.

	NEUROBAT Referenz Version	NEUROBAT Reglerversion II / 1	NEUROBAT Reglerversion II / 2
Simulationszeit [Tage]	212	212	212
Komfortperioden [Stunden]	1510	1510	1510
Heizenergie [MJ]	1048	1078	1016
Sonnenwärme [MJ]	2394	2394	2394
Aussentemperatur [°C]	5.81	5.81	5.81
Künstliches Licht [MJ]	424	424	424
Interne Fremdwärme [MJ]	543	543	543
Energie-Kosten [-]	4.7	4.8	4.5
Diskomfort-Kosten [-]	228.6	238.7	230.3
Totale Kosten [-]	233.2	243.5	234.8
Raumtemperatur [°C]	19.93	20.02	19.84
Raumtemperatur während Benutzerpräsenz [°C]	20.90	21.02	20.79

Tabelle 15: Betriebsleistungsvergleich der NEUROBAT Reglerversionen II

Die Simulationsergebnisse ergeben, dass im Vergleich zur NEUROBAT Reglerreferenzversion die NEUROBAT Reglerversion II/1 ein Betriebsverlust von 5% betreffend des Komforts und 3% betreffend des Energieverbrauches festzustellen ist, während bei der NEUROBAT Reglerversion II/2 ein Betriebsverlust von 5% betreffend des Komforts und 1% betreffend des Energieverbrauches zu notieren ist.

Figur 44 zeigt nochmals graphisch die Betriebsleistung der Reglerversionen (NEUROBAT Referenzversion, NEUROBAT Reglerversion II/1 und NEUROBAT Reglerversion II/2) betreffend des Komforts. Dabei sind die Histogramme der Raumtemperaturen während der Benutzerpräsenz verglichen, wobei deutlich zu sehen ist, dass die NEUROBAT Referenzversion die Ueberheizwerte zu reduzieren vermag.



Figur 44: Komfortvergleich der NEUROBAT Reglerversion II

3.4.2.2 Schlussfolgerung

Die Wahl einer reduzierten NEUROBAT Reglerversion ohne Sonnenfühler resultiert in einen Betriebsverlust von 1% bis 3% betreffend des Energieverbrauches und durchschnittlichen 5% betreffend des Komforts.

Obwohl sich die NEUROBAT Reglerversion II/2 durch einen reduzierten Energieverbrauch im Vergleich zur Reglerversion II/1 auszeichnet, hängt die Wahl der Substitutionsalgorithmen für die Vorhersage der Sonneneinstrahlung von den weiteren zur Verfügung stehenden Sensorsignalen ab. Sollten die Messwerte der Raumtemperatur zur Verfügung stehen, so ist der Lösungsvorschlag der Reglerversion II/2 zu verwenden, da diese Version eine Adaptierung des Gebäudemodelles ermöglicht. Im Falle einer NEUROBAT ‚Low-Cost‘ Reglerversion ohne Sonnenfühler und Raumtemperaturfühler (siehe Kapitel 3.4.3) ist der Lösungsvorschlag der Reglerversion II/1 zu verwenden, da das Gebäudemodell nicht adaptiert werden kann und deshalb das Signal der maximal möglichen Sonneneinstrahlung der Reglerversion II/2 durch ein lernfähiges neuronales Netzwerk nicht auf die resultierende Raumtemperatur angepasst werden kann.

3.4.3 ‚Low-Cost‘-Regelversion ohne Raum- und Sonnefühler

3.4.3.1 Einführung

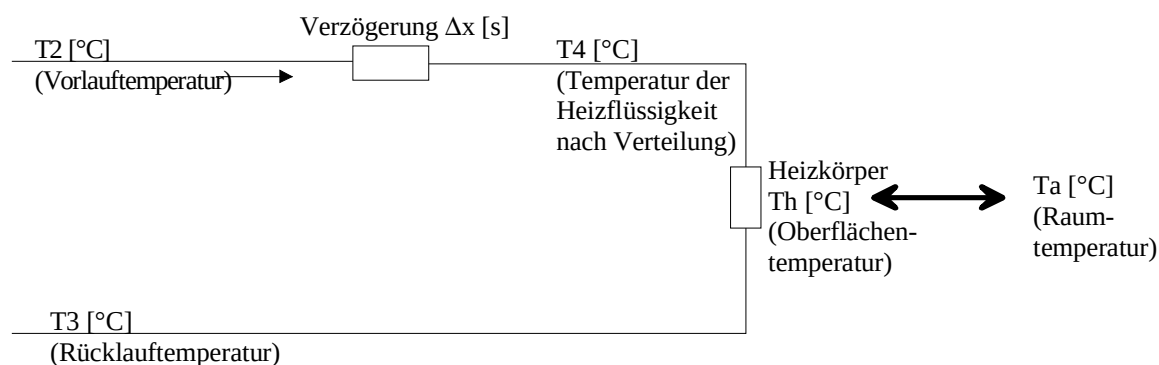
Die ‚Low-Cost‘-Reglerversion des NEUROBAT Konzeptes orientiert sich an den kommerziellen ‚Low-cost‘-Heizungsreglern, welche lediglich über einen Aussentemperaturfühler verfügen und aufgrund dieser Grösse mittels vordefinierten Heizkurven die Vorlauftemperatur regeln.

Um den NEUROBAT Heizungsregelalgorithmus in dieser Art und Weise anzuwenden, muss zunächst ein Schätzalgorithmus für die Raumtemperatur entwickelt werden, da die zu optimierende Kostenfunktion des dynamischen Programmieralgorithmus die Raumtemperatur als Signalgrösse benötigt.

Im folgenden werden zunächst verschiedene Methoden zur Schätzung der Raumtemperatur mittels der zur Verfügung stehenden Signale (Aussentemperatur, Vorlauftemperatur, Rücklauftemperatur) präsentiert. Anschliessend soll die optimale Methode der

Raumtemperaturschätzung in einer Simulationsstudie angewendet werden, um die Betriebsleistung der ‚Low-Cost‘-Reglerversion zu bestimmen.

Folgendes Modell wurde für den Heizkreis benutzt :



Figur 45: Modell des Heizkreises

Um eine möglichst einfache Beschreibung des Heizkreismodells zu bestimmen, wurden folgende Hypothesen aufgestellt. :

1. Hypothese : Der Radiator befindet sich auf einer konstanten Temperatur (Wasser und Metallteile auf gleicher Temperatur). Das mit der Temperatur T_4 in den Radiator fließende Warmwasser vermischt sich und liefert dadurch eine bestimmte Heizenergie.

2. Hypothese : Der Radiator kann durch eine einfache Beziehung beschrieben werden, welche die Leistung in Abhängigkeit des Temperaturunterschiedes zur Raumtemperatur mit der Konstanten h setzt (uebliche Werte für h : 1.2...1.4 ; in unserer Analyse wird ein Wert von 1.3 angewendet).

$$(1) \quad T_4(t) = T_2(t - \Delta t)$$

$$(2) \quad T_h(t) = T_3(t)$$

$$(3) \quad P_h = k \cdot |T_h - T_a|^h \cdot \text{signe}(T_h - T_a)$$

$$(4) \quad C_h \cdot \frac{dT_h}{dt} + P_h = \dot{m} \cdot c_p (T_4 - T_3)$$

mit folgenden Parametern:

Δt = Verzögerung der Energieverteilung

k = Gleichwertige Uebertragung des Radiators für $T_h - T_a = 1 \text{ °C}$ [W/K^h]

h = Wärmeleistungskonstante des Radiators ($h = 1.3$)

C_h = Thermische Kapazität des Radiators (Wasser und Metall) [J/K]

$\dot{m}$ = Massendurchfluss des Heizkreises [kg/s]

c_p = Spezifische Wärmekonstante des Wassers = 4190 [J/kgK]

Die Gleichung (1) entspricht einer Verzögerung von Δt . Die Gleichung (2) entspricht der Hypothese 1. Die Gleichung (3) entspricht der Uebertragung der Wärme zwischen Radiator und Raum. Die Gleichung (4) stellt eine thermische Bilanz des globalen Systems dar. Wird P_h , T_h und T_4 von der obgenannten Gleichung eliminiert, kann der Ausdruck von T_a in Funktion von T_2 , T_3 und den Systemparametern hergeleitet werden.

$$(5) \quad T_a(t) = T_3(t) - \left| \underbrace{\frac{\dot{m} c_p}{k} \cdot (T_2(t - \Delta t) - T_3(t)) - \frac{C_h}{k} \cdot \frac{dT_3(t)}{dt}}_y \right|^{\frac{1}{h}} \cdot \text{signe}(y)$$

Sind die Charakteristiken der Installation perfekt, erlaubt die Messung von T_2 und T_3 die Schätzung der Temperatur T_a . Sind die Charakteristiken der Installation jedoch unbekannt, müssen während einer bestimmten Zeitperiode unter Annahme eines konstanten Durchflusses die Temperaturen T_2 , T_3 und T_a gemessen werden. Mittels diesen Messwerten ist es möglich, die Werte der unbekannten Parametern zu bestimmen :

$$(x_1; x_2; x_3) = \left(\dot{m} \cdot c_p / k ; C_h / k ; \Delta t \right)$$

Das beschriebene Modell entspricht einem Radiatorelement. Unter bestimmten Voraussetzungen gelten die beschreibenden Modellgleichungen für ein Heizkreis mit mehreren Radiatoren. Die grundlegende Hypothese betrifft eine identische Dimensionierung der Radiatoren: Unter Annahme einer identischen Raumtemperatur aller Räume befindet sich die Radiatortemperatur auf demselben Temperaturwert. Im allgemeinen Fall entspricht die Raumtemperatur T_a dem Durchschnitt aller Raumtemperaturen des Gebäudes, gewichtet durch den entsprechenden Radiatordurchfluss.

Modell-Sensitivitätsstudie

Mittels einer Sensitivitätsanalyse kann die Präzision eines solchen Systems bestimmt werden. Die Parameter $(x_1; x_2; x_3)$ können lediglich mit einer gewissen Auflösung bestimmt werden aufgrund von Kalibrierungsfehler der Messwerte $T_2(t)$, $T_3(t)$ und $T_3'(t)$. Folgende Annahmen können aufgestellt werden:

- y ist positiv
- Die Temperaturen der Gleichung (5) werden zur Zeit (t) gemessen.

Der maximale Fehler der Raumtemperatur beträgt damit:

$$\Delta T_a = \left| \frac{\partial T_a}{\partial T_3} \right| \cdot \Delta T_3 + \left| \frac{\partial T_a}{\partial T_3'} \right| \cdot \Delta T_3' + \left| \frac{\partial T_a}{\partial T_2} \right| \cdot \Delta T_2 + \left| \frac{\partial T_a}{\partial x_1} \right| \cdot \Delta x_1 + \left| \frac{\partial T_a}{\partial x_2} \right| \cdot \Delta x_2$$

$$\Delta T_a = |1 + x_1 \cdot z| \cdot \Delta T_3 + |x_2 \cdot z| \cdot \Delta T_3' + |-x_1 \cdot z| \cdot \Delta T_2 + |-(T_2 - T_3) \cdot z| \cdot \Delta x_1 + |T_3' \cdot z| \cdot \Delta x_2$$

mit

$$z = \frac{1}{h} y^{\frac{1}{h}-1}$$

Δt [s]	1100
k [W/K ^h]	24
h [-]	1.3
C_h [J/K]	81000
$\dot{m} \cdot c_p$ [W/K]	400
$\Delta T_2, \Delta T_3$ [°C]	0.5
$\Delta T_3' / T_3$	10%
$\Delta x_1 / x_1$	10%
$\Delta x_2 / x_2$	10%

Tabelle 16: Parameterbeispiel des Sensitivitätsmodelles

Als Beispiel wurden für das Testgebäude in Basel die Werte in Tabelle 16 angenommen.

Analyse	Modellfehler (T_2 , T_3)	Modellfehler (T'_3)	Modellfehler (x_1 , x_2)	Modellfehler Global
Mischventil geschlossen: ($P \sim 0$ W; $T_2 = 20.5$ °C; $T_3 = 20$ °C) $T'_3 = 0.0033$ [K/s] (1 K pour 5min)	8.6 [°C]	0.5 [°C]	0.9 [°C]	10.1 [°C]
Mischventil geöffnet: ($P \sim 6000$ W; $T_2 = 72$ °C; $T_3 = 58$ °C) $T'_3 = 0.0033$ [K/s] (1 K pour 5min)	4.1 [°C]	0.2 [°C]	5.3 [°C]	9.7 [°C]
Oeffnen des Mischventils: ($P \sim 9000$ W; $T_2 = 41$ °C; $T_3 = 19$ °C) $T'_3 = 0.066$ [K/s] (20 K pour 5min)	3.8 [°C]	4.5 [°C]	11.8 [°C]	20.1 [°C]

Tabelle 17: Modell-Sensitivität unter Berücksichtigung eines geschlossenen Mischventils, eines offenen Mischventils und einer Aenderung der Heizleistung, d.h. bei Oeffnen des Mischventils

Das Modell ist von der Präzision der Variablen T_2 , T_3 , T'_3 und der Parameter x_1 und x_2 abhängig. Unter Verwendung dieses Modelles beträgt der maximale Fehler je nach Fall, 10 bis 20° C. Folgende Effekte beeinflussen die Präzision des Modelles :

- Der Fehler bedingt durch T_2 und T_3 nimmt zu falls der Wert ($T_2 - T_3$) gegen Null strebt (geschlossenes Ventil)
- Der durch x_1 und x_2 bedingte Fehler nimmt zu, falls der Wert ($T_2 - T_3$) ansteigt (offenes Ventil).
- Die Uebergangseffekte (Leistungssprünge) bewirken grosse Ungenauigkeiten betreffend T'_3 , x_1 und x_2 .

Schlussfolgerung

Die Identifikation der Parameter x_1 , x_2 und x_3 ist notwendig um den Schätzfehler der Raumtemperatur zu minimisieren. Ein Bestimmungsfehler dieser Parameter von 10% bewirkt ein Fehler der Raumtemperatur von 5° C. Dies erfordert eine Messung der Raumtemperatur während einer Zeitperiode von einigen Tagen, (z.B. bei Inbetriebnahme des Heizungsreglers). Jegliche Veränderung des Heizkreises (Modifikation der Temperatursensoren, Aenderungen des Durchflusses etc.) bedingt eine Wiederholung der Identifikationsprozedur.

Während Uebergangsperioden (z.B. grosse Variationen der Heizleistung) ermöglicht das Modell keine Schätzung der Raumtemperatur.

3.4.3.2 Schätzalgorithmus mittels der Identifikation der Modellparameter

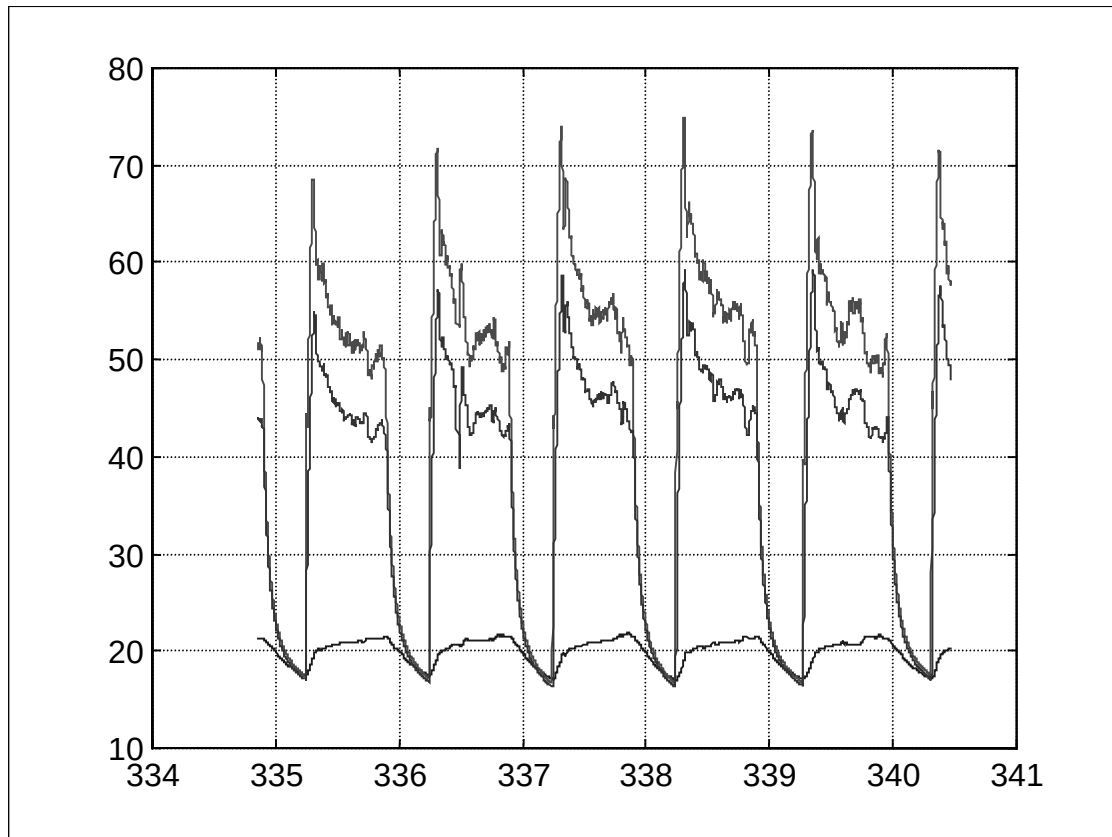
Anlässlich der Messungen am LESO-EPFL wurde eine Parameteridentifikation durchgeführt; es wurde ein Schätzungsfehler von weniger als 2°C erhalten (siehe Figur 48 und Figur 49). Das Experiment wurde im Rahmen der verfügbaren Messungen während einer bestimmten Periode auf dem Testgebäude in Basel mit vermindertem Erfolg wiederholt (siehe Figur 46 und Figur 47). Die untenstehenden Figuren zeigen einerseits die gemessenen Daten (T_2 , T_3 , T_a in °C) in Funktion der Zeit (in Tagen ausgedrückt) und andererseits die Resultate dieser Parameteridentifikation (auf der Graphik der Figur 47 und Figur 49 stellt die geglättete Kurve die gemessene Temperatur T_a dar, während die stark varierende Kurve die rekonstruierte Temperatur T_a ausgehend von der Identifikationsgleichung darstellt). Die verwendete Zeitperiode in Figur 46 und Figur 47 entspricht der Datei DAT6_7.RPT (vom 30. November 1998 um 20.33 h. auf den 6. Dezember 1998 um 11.18 h).

Folgende Werte wurden für diese Parameter gefunden:

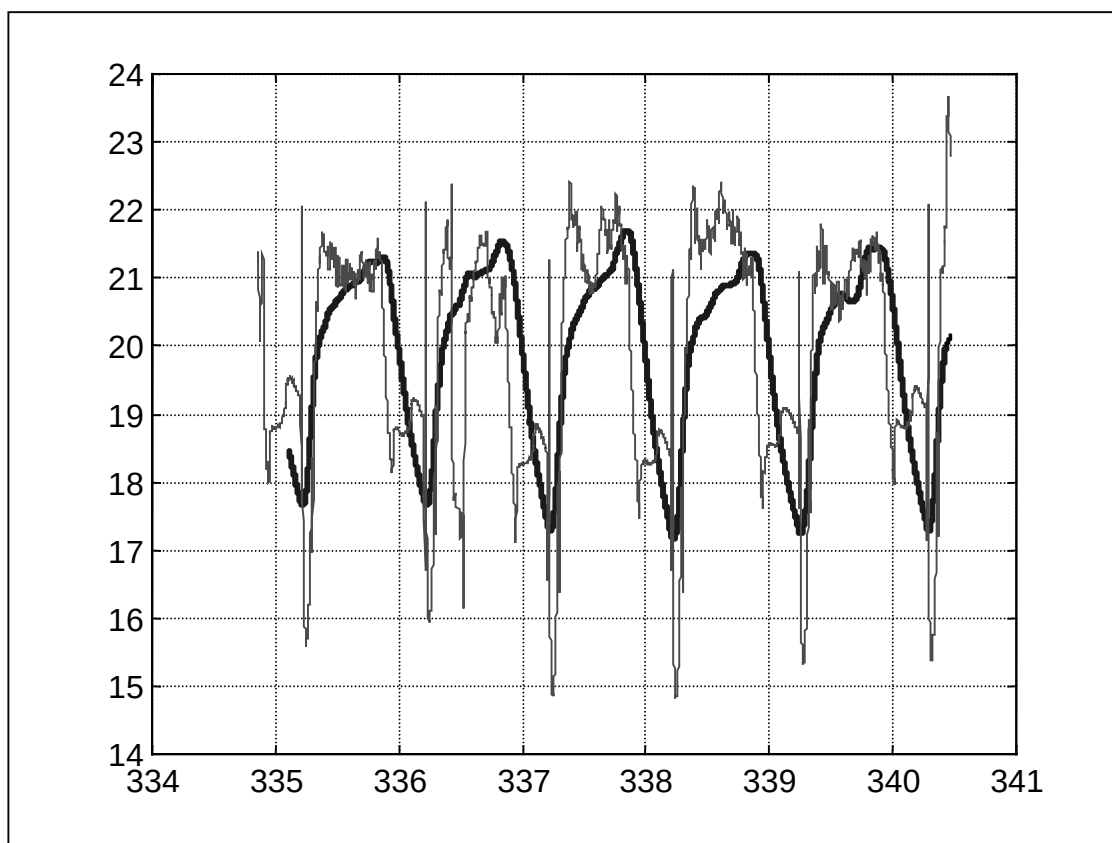
$$k = 24 \text{ [W/K}^{1.3}\text{]}$$

$$C_h = 81 \text{ [kJ/K]}$$

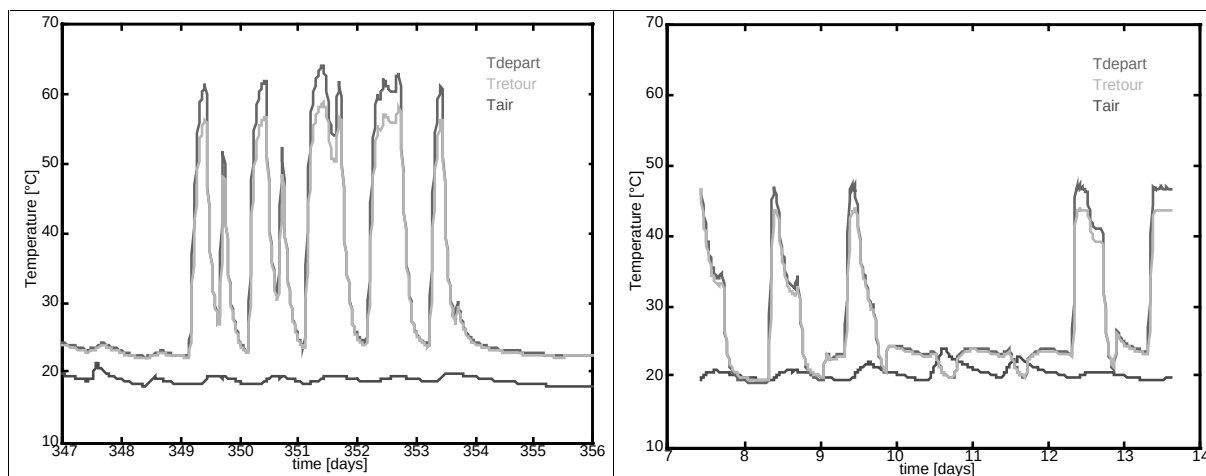
$$\Delta t = 1100 \text{ [s]}$$



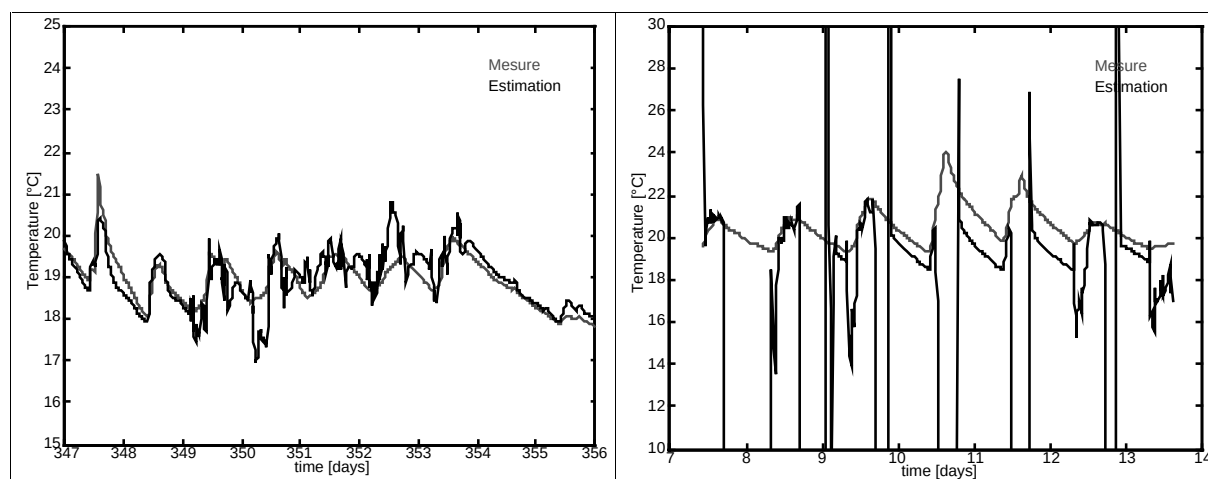
Figur 46: Testgebäude in Basel während der Zeitdauer von einer Woche (Anfang Dezember 1998) mit Vorlauf-, Rücklauf- und Raumtemperaturmessung



Figur 47: Testgebäude in Basel während der Zeitdauer von einer Woche (Anfang Dezember 1998) mit gemessener und geschätzter Raumtemperatur



Figur 48: Testlokal LESO/EPFL mit Vorlauf-, Rücklauf- und Raumtemperatur. Der Graph links beschreibt eine Testperiode mit kontinuierlichem Durchfluss (d.h. Zirkulationspumpe eingeschaltet), der Graph rechts eine Testperiode mit intermittierendem Betrieb (Unterbrechungen der Zirkulationspumpe)



Figur 49: Testlokal LESO/EPFL mit gemessener und geschätzter Raumtemperatur. Der Graph links beschreibt eine Testperiode mit kontinuierlichem Durchfluss (d.h. Zirkulationspumpe immer eingeschaltet), der Graph rechts eine Testperiode mit intermittierendem Betrieb (Unterbrechungen der Zirkulationspumpe).

Betreffend der Variation des Identifikationsmodelles wurden mehrere Tests durchgeführt und folgende Resultate können aus dieser Studie geschlossen werden :

- Im Falle eines erheblichen Fehlers bei der Kalibration verbessert das Hinzufügen eines Parameters die Raumtemperaturschätzung wesentlich. Jedoch resultiert der zusätzlich zu identifizierende Parameter in ein nicht-physikalisches Modell.
- Durch die Beseitigung der Verzögerung der Vorlauftemperatur kann die Raumtemperatur mittels des Modelles nicht identifiziert werden (Fehler bis bis zu 15°C)
- Das Hinzufügen einer Verzögerung zwischen Radiator und Rücklauftemperatur zeigt keine wesentliche Verbesserung der Raumtemperaturschätzung

Die Identifikation und Validation auf verschiedenen Zeitperioden liefert identische Resultate falls keine Veränderung des Heizkreises zwischen den Zeitperioden erfolgt.

3.4.3.3 Rekonstruktion der Raumtemperatur mittels Schätzung

Die Schätzung von T_a ausgehend von den Temperaturen des Heizkreises bedingt eine Parameteridentifikation für welche eine Messung von T_a erforderlich ist. Im Falle einer komplexen Energieverteilung mit mehreren Radiatoren, ist es problematisch eine Referenztemperatur T_a zu messen. Zudem ist nicht sicher, ob die Parameter den normalen Veränderungen wie z.B. Alterung der Installation oder den Jahreszeiten unterworfen sind. Eine Parameteridentifikation wäre deshalb in regelmässigen Abständen zu wiederholen, z.B. monatlich. Diese Methode des Schätzalgorithmus der Raumtemperatur T_a ist unter diesen Bedingungen nicht anwendbar.

Vorgeschlagen und getestet wurde eine Methode, die eine grobe Schätzung der Raumtemperatur T_a ohne Fühler anlässlich der Inbetriebnahme erlaubt. Mehrere Methoden wurden untersucht und die Resultate der optimalen Lösung im folgenden aufgeführt werden.

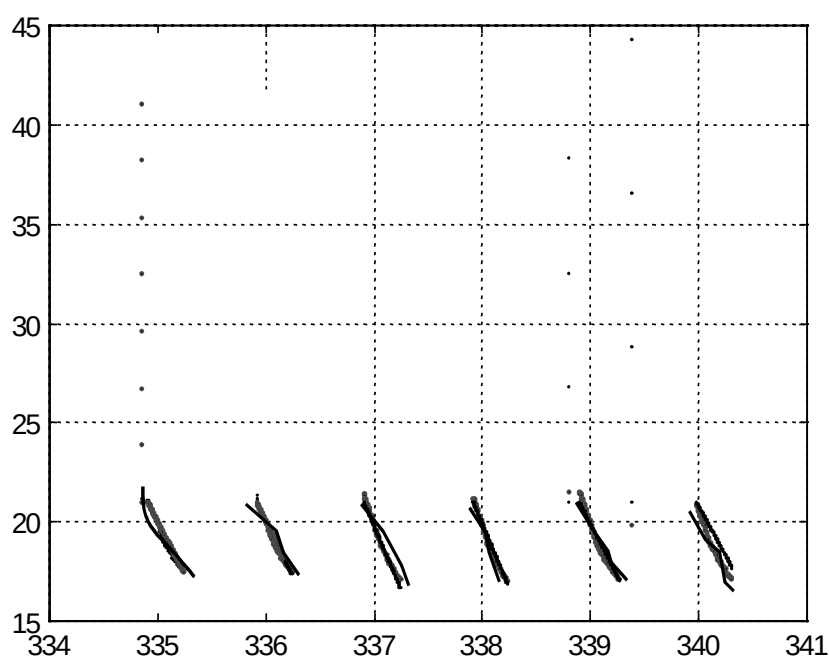
Prinzip:

Um die vorgeschlagene Methode anzuwenden, ist es unerlässlich, dass die Heizung während der Nacht ausser Betrieb ist und die Zirkulationspumpe eingeschaltet bleibt.

Während des reduzierten Nachtbetriebes (d.h. bis die Heizung wieder eingeschaltet wird), sinkt die Temperatur des Heizkreises exponentiell gegen die Referenzraumtemperatur. Die beschreibenden Gleichungen sind gültig, jedoch mit $T_2 = T_3$.

Um eine Identifikation der Parameter während der Nacht auszuführen ist es notwendig, folgende Hypothese betreffend der Gebäudecharakteristik festzustellen: es wird angenommen, dass die Raumtemperatur sich zwischen T_{aOFF} (Temperatur zum Zeitpunkt des Abschaltens der Heizung) und T_{aON} (Temperatur zum Zeitpunkt des Einschaltens der Heizung am Morgen) linear verhält. T_{aON} entspricht der gemessenen Temperatur von T_3 zum Zeitpunkt des Einschaltens der Heizung und T_{aOFF} entspricht der Sollwerttemperatur (z.B. 20°C).

Die untenstehende Figur zeigt, dass die gemachte Hypothese während der Periode der Nachtabenkung richtig ist (mit $T_{aOFF} = 21^\circ\text{C}$). Die fettgedruckte Kurve zeigt die gemessene Temperatur T_a im Vergleich zur interpolierten Temperatur T_a während der Nacht.

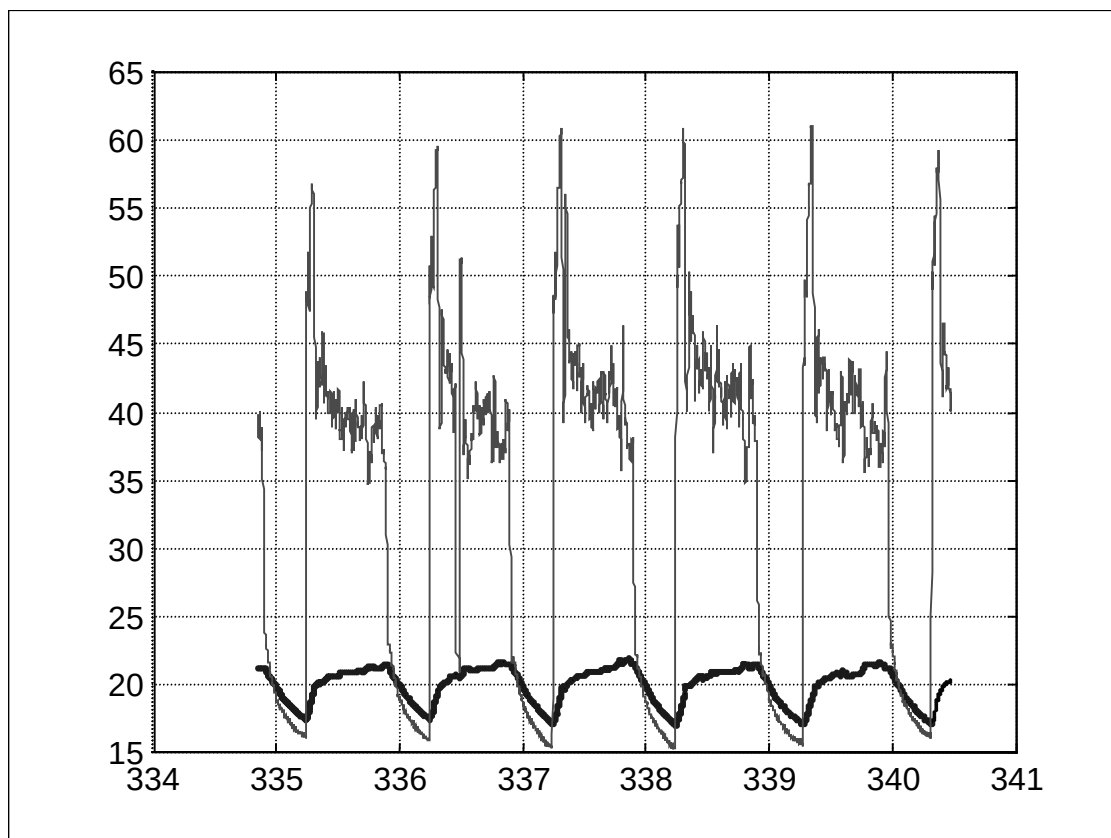


Figur 50: Geschätzte und gemessene Raumtemperatur während der Nachtabenkung

Im nächsten Schritt werden die Parameter des Modelles unter Benutzung der interpolierten Temperatur T_a während der Nacht identifiziert. Hiermit ist es möglich, die Temperaturwerte T_a unter Verwendung der durch die Identifikation erhaltenen Parameter und der gemessenen Temperaturen T_2 und T_3 zu ermitteln.

Figur 51 zeigt das Resultat dieser Methode der Temperaturschätzung. Die fettgedruckte Kurve der Graphik zeigt die gemessene Temperatur T_a im Vergleich zur mittels der identifizierten Parametern rekonstruierten Raumtemperatur.

Wie die Figur 51 zeigt, ist das Resultat dieser Schätzung nicht verwendbar. Die Identifikation der Parameter des Heizkreises während der Nachtperiode ist nicht möglich. Die durch diese Methode erhaltenen nicht physikalischen Werte bestätigen diese Behauptung. Die vorgeschlagene Methode kann nicht angewendet werden, da mangels Informationen die Raumtemperatur nicht abgeschätzt werden kann.

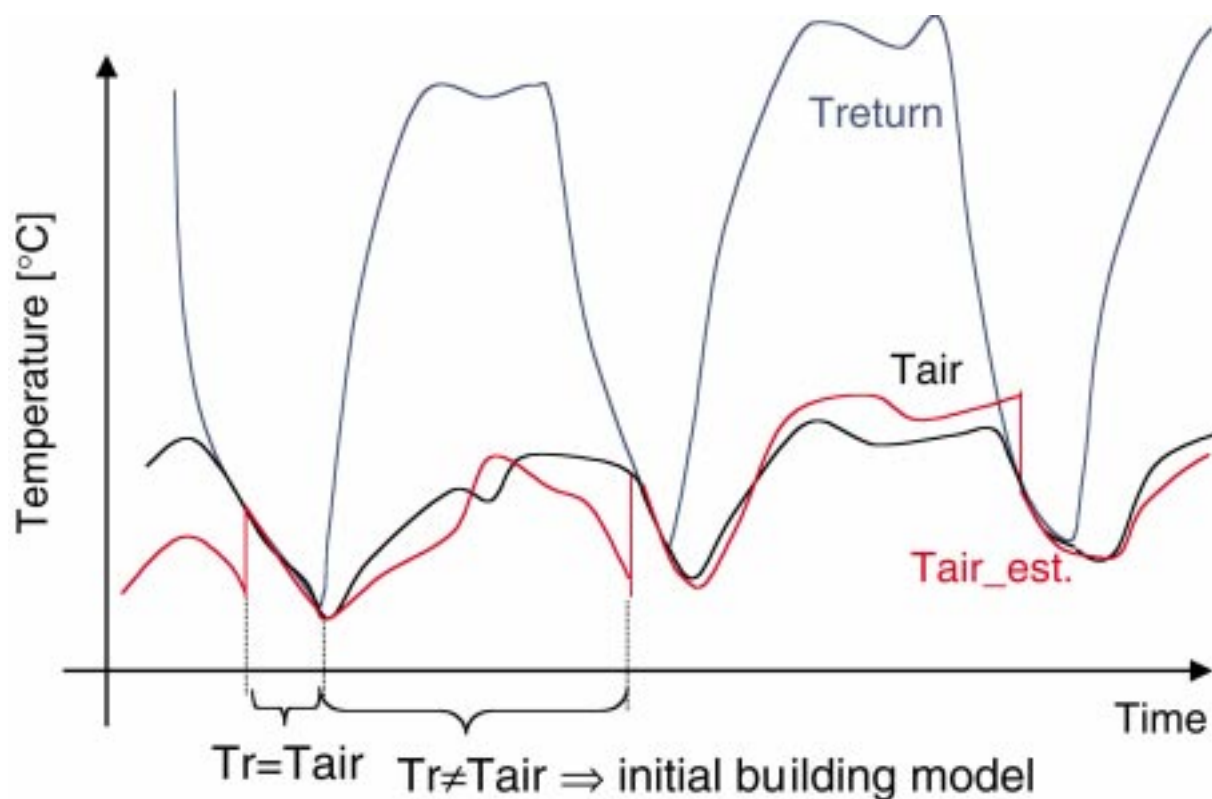


Figur 51: Geschätzte und gemessene Raumtemperatur während des ganzen Betriebsintervalles.

3.4.3.4 Empirische Rekonstruktion der Raumtemperatur

Die Methode des empirischen Schätzmodelles basiert auf einer einfachen Hypothese für Gebäude mit nächtlicher Temperaturabsenkung. Im Falle einer eingeschalteten Zirkulationspumpe während der Periode der Nachtabenkung entspricht die Rücklauftemperatur einer guten Schätzung der durchschnittlichen Raumtemperatur des Gebäudes. Die Temperaturgraphen des Testgebäudes in Basel bestätigen diese Hypothese. Ausserhalb der Nachtabenkperiode erlaubt die Rücklauftemperatur keine Rekonstruktion der Raumtemperatur und die Schätzungen des dynamischen Programmialgorithmus werden für die Schätzung der Raumtemperatur angewendet (Initialisierungsmodell).

Figur 52 zeigt auf anschauliche Weise die Methode der empirischen Raumtemperaturschätzung. Diese Methode ermöglicht die Bestimmung einer repräsentativen Raumtemperatur des Gebäudes und bedingt weder Raumfühler noch eine vorgängige Identifikation. Die Simulationsstudien der Definitionsphase (vergleiche 'Technischer Zwischenbericht der Definitionsphase') zeigen im Vergleich zum NEUROBAT Regler einen Leistungsverlust von 11% betreffend des Energieverbrauches. Die erhaltenen Resultate sind betreffend Energieverbrauch und Komfort mit den Betriebsdaten eines modernen kommerziellen Heizungsreglers mit Raumtemperaturaufschaltung zu vergleichen.

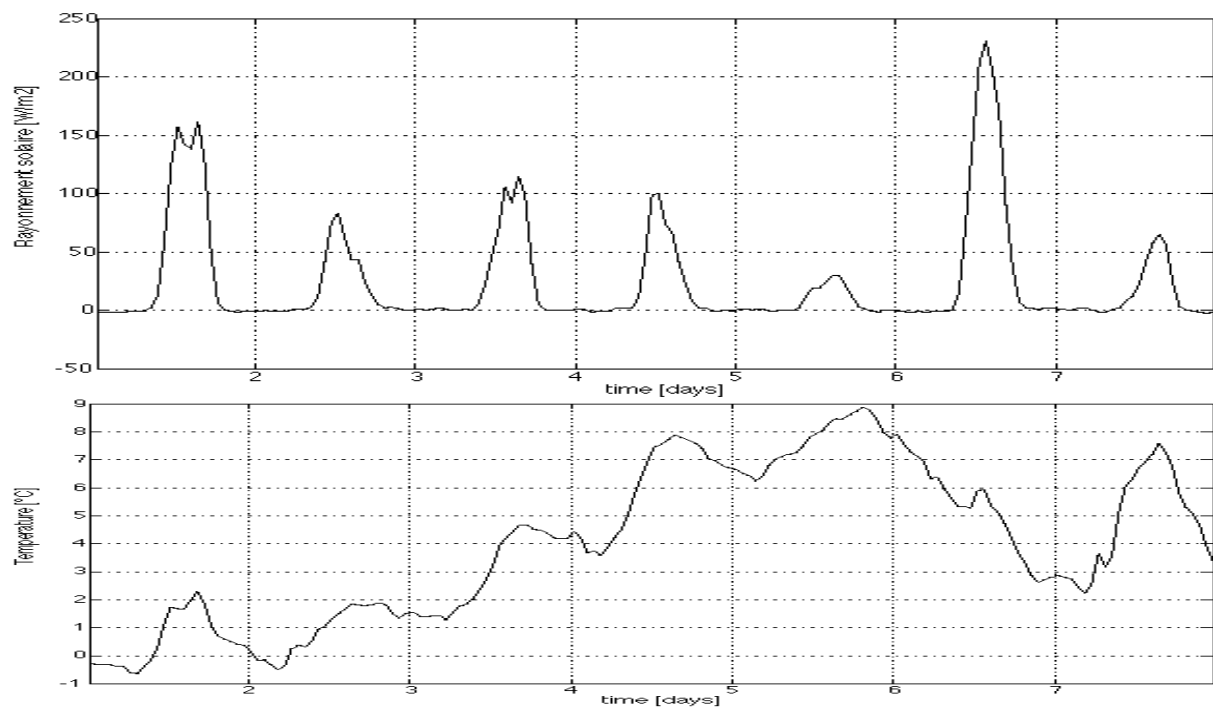


Figur 52: Methode der empirischen Raumtemperaturschätzung

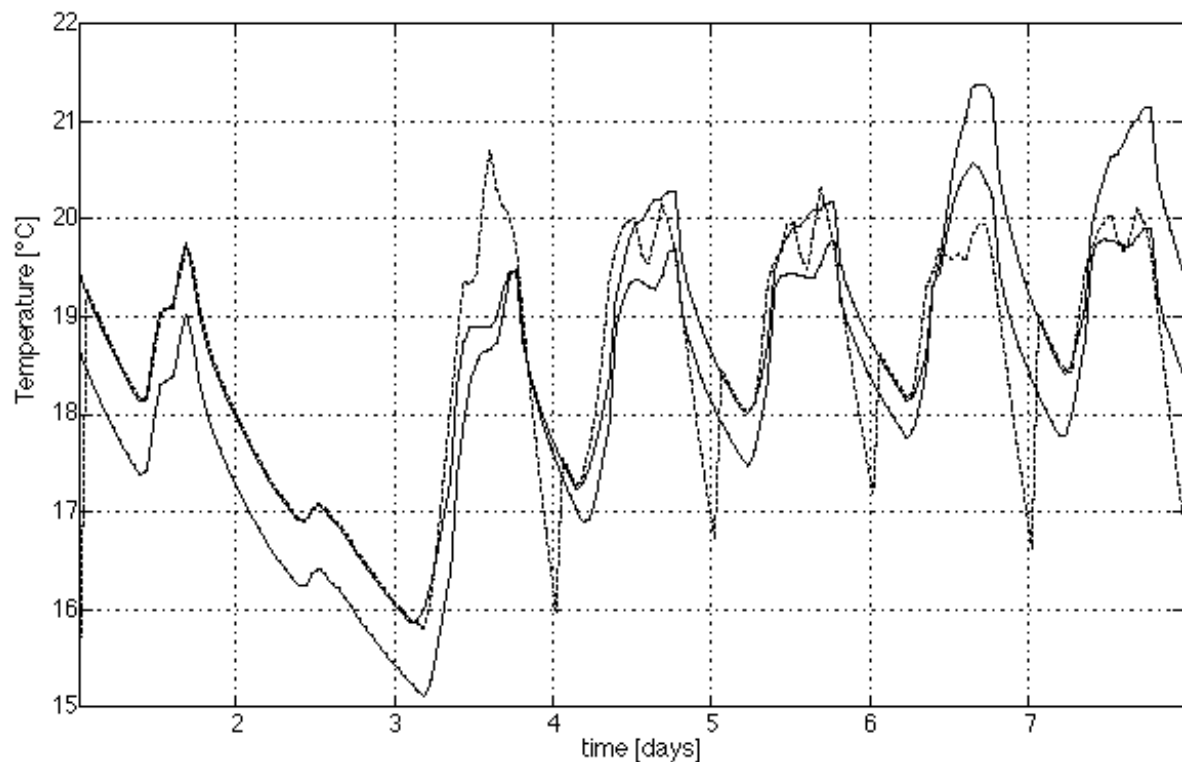
Heizungsregler-Betriebsleistung ohne Raumtemperatursensor

Im Vergleich zu anderen Methoden, deren Betriebsleistungen durch Simulationen nicht genau abgeschätzt werden können (aufgrund der Empfindlichkeit betreffend Störungen und anderer schwer modellierbaren Messungen), kann diese Methode im Detail analysiert werden. Zur Durchführung der Simulationen wurde während der Nachtabenkung die Messwerte der Raumtemperatur bis zum Einschalten der Heizung angewendet. Während des Betriebes der Heizung berechnet das Gebäude-Initialisierungsmodell die Raumtemperatur.

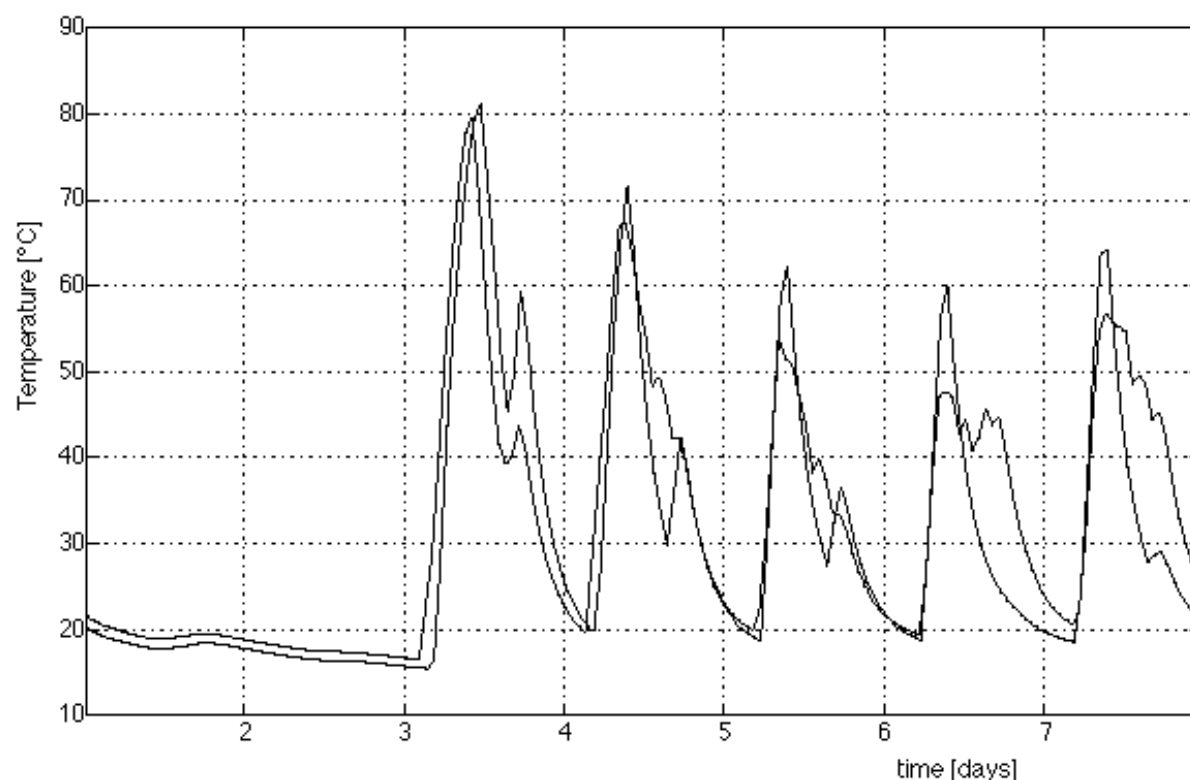
Die folgenden Figuren zeigen die Betriebsleistungen der „Low-Cost“-Anlage im Vergleich zum Neurobat Referenzregler. Der Komfort des „Low-Cost“ Heizungsreglers ist aufgrund längerer Ueberheizperioden sub-optimal. Die Ueberheizperioden „Low-Cost“-Anlage resultieren aus einer Unterschätzung der Raumtemperatur des Gebäude Initialisierungsmodelles während des Betriebes der Heizung. Aufgrund der Vorhersage der Fernwärme wird der Anstieg des Energieverbrauches limitiert (+11 %). Im Vergleich zu den getesteten, konventionellen Reglern mit Raumsonde, Sonnenfühler, automatischer Anpassung der Heizkurve und Start/Stop-Antizipation sind die Betriebsleistungen des „Low-Cost“-Reglers gleichwertig (betr. Energieverbrauch wie auch thermischen Komfort). Verglichen mit einem Standard-Regelsystem ohne Raumsonde und mit Aussentemperaturfühlern beträgt die Energieeinsparung 28%. Im Vergleich zu einem Regelsystem das die Zufuhr in Funktion der Innentemperatur korrigiert (gleichwertig einem thermostatischen Ventil); beträgt die Energieeinsparung 10%.



Figur 53: Klimatische Bedingungen während der ersten Januarwoche 1999



Figur 54: Simulierte und geschätzte Raumtemperatur des ‚Low-Cost‘-NEUROBAT Heizungsreglers. Im Vergleich die Raumtemperatur des Referenzreglers



Figur 55: Vorlauftemperaturen des NEUROBAT Referenzreglers und des ‚Low-Cost‘-NEUROBAT Reglers im Vergleich

	<i>Kommerzieller Regler (Low-cost)</i>	<i>Kommerzieller Regler (fortgeschritten)</i>	<i>Kommerzieller Regler (leistungsfähig)</i>
Simulationszeit [Tage]	212	212	212
Komfortperioden [Stunden]	1510	1510	1510
Heizenergie [MJ]	1626	1295	1177
Sonnenwärme [MJ]	2394	2394	2394
Aussentemperatur [°C]	5.81	5.81	5.81
Künstliches Licht [MJ]	424	424	424
Interne Fremdwärme [MJ]	543	543	543
Energie-Kosten [-]	7.2	5.8	5.2
Diskomfort-Kosten [-]	779.2	376.1	310.7
Totale Kosten [-]	786.4	381.9	315.9

Tabelle 18: Vergleichstabelle der Betriebsleistungen von kommerziellen Heizungsregelsystemen: Low-Cost Version mit Aussentemperaturfühler; fortgeschrittene Version mit Aussentemperaturfühler und Korrektion gemäss den Messwerten des Raumfühlers; leistungsfähige Version mit automatischer Adaptation der Heizkurven, optimal Start/Stop-Algorithmus, Aussentemperaturfühler und Innentemperatur-aufschaltung

	NEUROBAT (Referenzversion)	NEUROBAT (Low-Cost)
Simulationszeit [Tage]	212	212
Komfortperioden [Stunden]	1510	1510
Heizenergie [MJ]	1048	1167
Sonnenwärme [MJ]	2394	2394
Aussentemperatur [°C]	5.81	5.81
Künstliches Licht [MJ]	424	424
Interne Fremdwärme [MJ]	543	543
Energie-Kosten [-]	4.7	5.2
Diskomfort-Kosten [-]	230.5	309.7
Totale Kosten [-]	235.2	314.9

Tabelle 19: Betriebsleistungen des NEUROBAT Heizungsregler für die Referenzversion und die Low-Cost Version im Vergleich.

3.4.3.5 Schlussfolgerung

Eine indirekte Methode zur Schätzung der Raumtemperatur eines Gebäudes wurde analysiert. Diese Methode basiert auf einem einfachen dynamischen Modell des Heizkreises. Die Temperaturmessungen der Volauf- und der Rücklauf-temperatur genügen um die Raumtemperatur zu schätzen. Die Evaluation des Modelles unter realen Bedingungen (Testgebäude in Basel) zeigt:

- Die Präzision der geschätzten Raumtemperatur beträgt 2-3°C
- Das Modell ist empfindlich betreffend Veränderungen des Heizkreises (z.B. Variation des Durchflusses, Aenderung der Temperatursensoren).

Die Methode ist jedoch beschränkt in die Praxis umsetzbar:

- Die Raumtemperatur muss während der Inbetriebsetzung gemessen werden (Parameteridentifikation des Modelles)
- Der Durchfluss des Heizkreises muss konstant sein
- Die Zirkulationspumpe muss kontinuierlich eingeschaltet sein (die Raumtemperatur muss seitens des Heizungsreglers jederzeit verfügbar sein).
- Bei Aenderung des Heizkreises (Aenderung der Sensoren, Modifikation der Geschwindigkeit der Zirkulationspumpe, etc.) muss die Identifikation wiederholt werden

Um eine Raumtemperaturmessung anlässlich der Inbetriebnahme zu vermeiden, wurde eine Methode einer nächtlichen Parameteridentifikation angewendet. Die erhaltenen Resultate zeigen, dass es nicht möglich ist, die Parameter des Heizkreises ausschliesslich in der Nachtperiode anzupassen.

Um die Einschränkungen der untersuchten Methoden zu umgehen, wurde eine empirische Methode getestet. Diese besteht darin, die Raumtemperatur entsprechend der Rücklauf-temperatur zu bestimmen, falls der Betrieb der Heizung während einer längeren Periode (nächtliche Absenkung) reduziert wurde. Mit Einschalten der Heizung zu Beginn der Komfortperiode wird die Raumtemperatur mittels des Gebäude Initialisierungsmodelles berechnet. Diese Methode erlaubt die Unterdrückung der Messung der Raumtemperatur während der Inbetriebnahme. Im Vergleich zu Betriebsleistung von modernen, kommerziellen Heizungsreglerversionen, welche in Phase I des NEUROBAT Projektes

getestet wurden, zeigt dieser NEUROBAT „Low-Cost“ Regler vergleichbare Resultate (betreffend Energieverbrauch und thermischen Komfort)

3.4.4 Datenevaluation der „Low-Cost“ Reglerversion

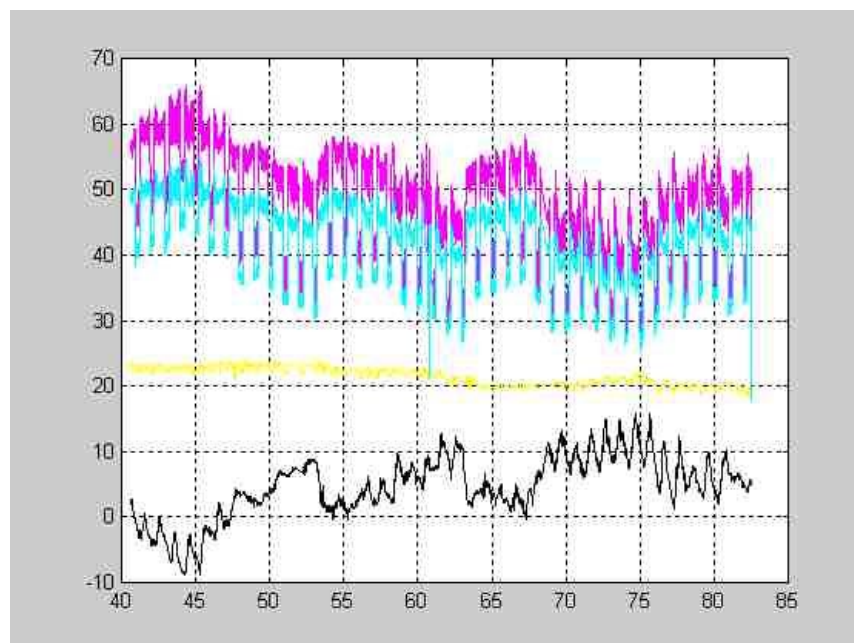
Im folgenden sollen die Evaluationsresultate des Schätzalgorithmus der Raumtemperatur aufgezeichnet werden. Dabei wird der in der Definitionsphase des Projektes entwickelte Schätzalgorithmus auf Messungen an zwei verschiedenen und sehr unterschiedlichen Wohnobjekten angewendet, was einen Hinweis auf die Güte des Algorithmus liefern wird.

3.4.4.1 Evaluationbasis I: Chemin des Libellules

Figur 56, und Figur 57 zeigen die Evolution der gemessenen Variablen (Aussentemperatur, Raumtemperatur, Vorlauftemperatur und Rücklauftemperatur) auf dem Objekt in Lausanne während der Zeitspanne vom 9. Februar 1999 bis zum 23. März (Messspanne von 40 Tagen). Die x-Achse ist in Tagen skaliert, wobei die Zahl 1 dem 1. Januar um Mitternacht entspricht, die Zahl 60 dem 1. März um Mitternacht usw.

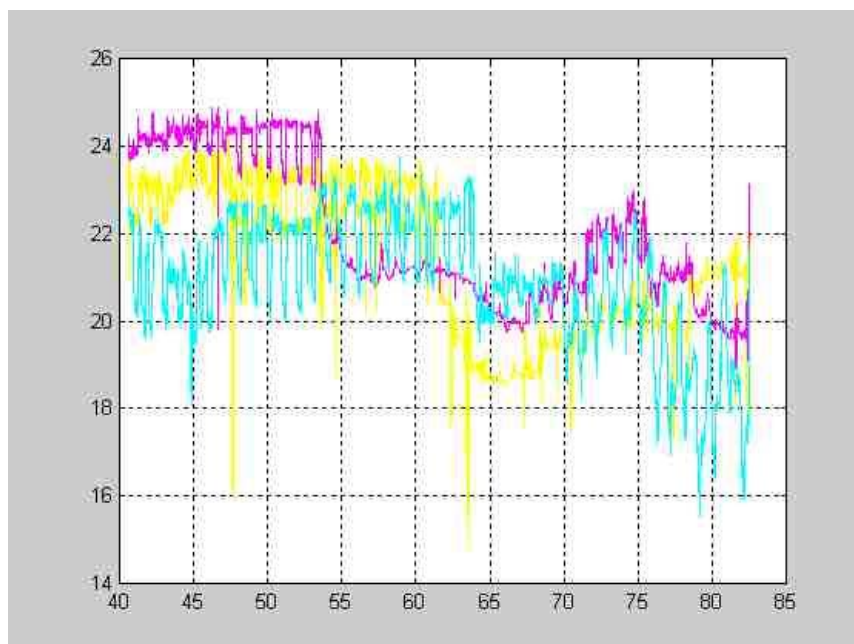
Die Raumtemperatur in Figur 56 entspricht dem Mittelwert der drei gemessenen Raumtemperaturen (in verschiedenen Etagen und Räumen, siehe Figur 57).

In Figur 56 kann zudem festgestellt werden, dass die Heizleistung während der Nacht lediglich reduziert wird und nicht, wie zu Beginn der Messungen am Objekt in Lausanne bestätigt wurde (und was einer der Bedingungen für die Messungen war), ein intermittierender Betrieb gefahren wird. Figur 56 zeigt, dass die Rücklauftemperaturen T_r nicht auf das Niveau der Raumtemperatur T_{int} sinkt, was für die Auswertung des Raumtemperatur-Algorithmus hinderlich ist.



Figur 56: Aussentemperatur T_{ext} ($^{\circ}\text{C}$, schwarz), Raumtemperatur T_{int} ($^{\circ}\text{C}$, gelb), Vorlauftemperatur T_v ($^{\circ}\text{C}$, violett) und Rücklauftemperatur T_r ($^{\circ}\text{C}$, blau).

Die drei gemessenen Raumtemperaturen T_{int1} (Wohnung 11, 1. Stockwerk), T_{int2} (Wohnung 52, 5. Stockwerk) und T_{int3} (Wohnung 75, 7. Stockwerk; siehe Referenz: Zwischenbericht der Definitionsphase [6]) sind in Figur 57 wiedergegeben und zeigen ein stark unterschiedliches Verhalten, welches auf das Benutzerverhalten und die Lage der Wohnungen zurückzuführen ist.



Figur 57: Raumtemperaturen Tint1 [°C], gelb), Tint2 [°C], violett) und Tint3 [°C], blau).

Identifikations-Schätzalgorithmus

Das im Zwischenbericht der Definitionsphase beschriebene Heizkreismodell wurde während einer Zeitspanne von zwei Wochen (Tag 45 bis 60) kontinuierlich angepasst.

Die Auswertung wurde ebenfalls für eine Zeitspanne von zwei Wochen durchgeführt (tag 60 bis 75), d.h. während 15 Tage wurde das Modell des Heizkreises aufgrund einer Identifikation angepasst und während den folgenden 15 Tagen überprüft.

Die Analyseresultate sind in Figur 58 und Figur 59 dargestellt. Figur 58 zeigt die zur Identifikation erforderlichen Eingangsdaten (Vorlauf-, Rücklauf- und Raumtemperatur) und Figur 59 zeigt im Vergleich zum Mittelwert der Raumtemperatur die berechnete (respektive die geschätzte) Raumtemperatur. Die berechneten Parameter basieren auf einer Identifikationsphase von Tag 45 bis Tag 60, die Resultate beziehen sich auf eine Evaluationsphase von Tag 60 bis Tag 75. Es sei hier angefügt, dass die Daten in Figur 59 leicht von den Daten in Figur 58 abweichen, da vorgängig ein Tiefpassfilter angewendet wurde.

Während der Identifikationsphase kann eine maximale Abweichung der geschätzten Raumtemperatur von mehr als 2°C festgestellt werden. Die Mittelwerte der gemessenen und geschätzten Temperaturen entsprechen sich, wobei die geschätzte Raumtemperatur durch eine Störung von bis zu 5°C überlagert ist. Zudem kann während der Evaluationsphase eine Mittelwertabweichung der gemessenen und geschätzten Raumtemperatur von ca. 3°C festgestellt werden.

Folgende Parameter wurden identifiziert:

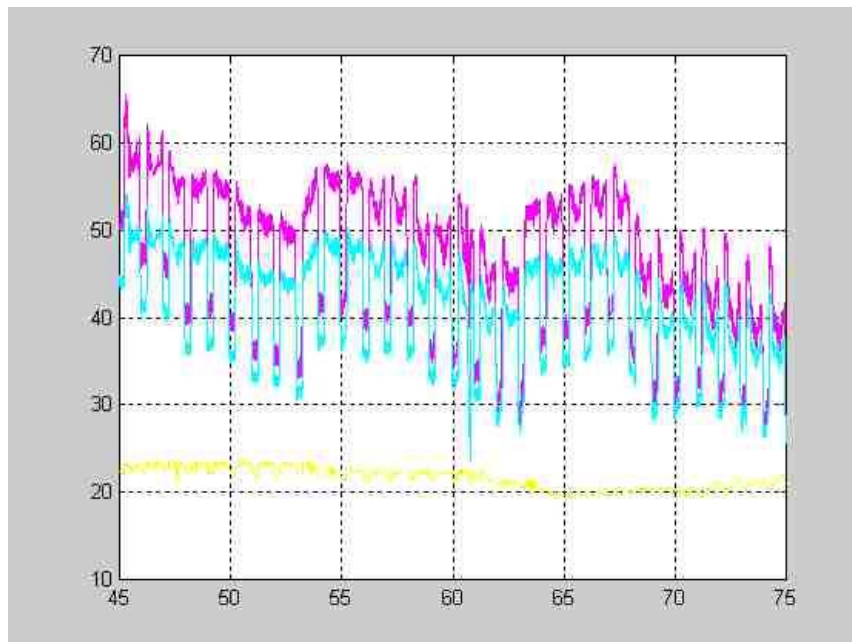
$x = (8.52, 824.6, 756.2)$. Pour rappel:

$x_1 = dm/dt \text{ Cp} / k$

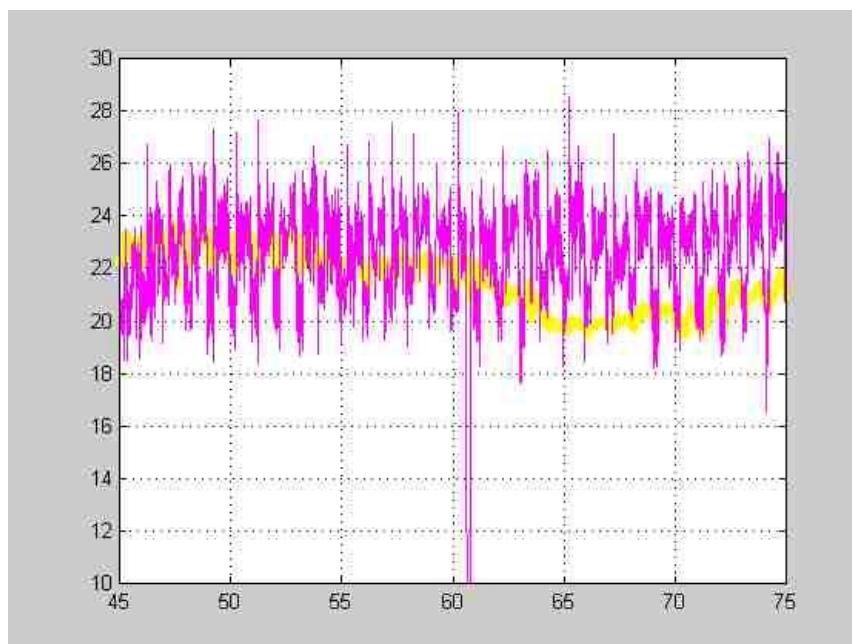
$x_2 = Ch / k$

$x_3 = \Delta x$

mit: $\frac{dm}{dt}$ = Massendurchfluss des Heizkreises [kg/s]
 C_p = Spezifische Wärmekapazität von Wasser (4190 J/kgK)
 Ch = Thermische Kapazität der Radiatoren [J/K]
 k = Heizkonstante der Radiatoren [W/K^h]
 h = Exponent des Leistungsgesetzes des Radiatoren: $P = k (T_h - T_a)^h$ mit ($k = 1.3$)
 T_h = Temperatur des Radiatoren [°C]
 T_a = Raumtemperatur [°C]
 P = Gelieferte Radiatoren-Heizleistung [W]



Figur 58: Raumtemperatur T_{int} [°C], gelb), Vorlauftemperatur T_v [°C], violett) und Rück-lauftemperatur T_r [°C], blau).



Figur 59: Gemessene Raumtemperatur T_{int_m} [°C], gelb) und berechnete Raumtemperatur T_{int_c} [°C], violett).

Empirischer Schätzalgorithmus

Wie im Zwischenbericht der Definitionsphase detailliert, reorientiert sich das empirische Modell nach einer längeren Absenkephase an der Rücklauftemperatur des Heizkreises. Dabei entspricht die Rücklauftemperatur annähernd dem Mittelwert der Raumtemperatur des Gebäudes.

Wie bereits eingangs erwähnt, wurden diese Bedingung (Intermittierender Betrieb, kontinuierlicher Betrieb der Zirkulationspumpe) für das Messobjekt in Lausanne nicht erfüllt, was eine Anwendung dieses Schätzalgorithmus verunmöglicht. Unter diesen Bedingung ist das entwickelte empirische Modell nicht verwendbar.

3.4.4.2 Evaluationsbasis II: Münchenstein (Testgebäude Im Weissgrien)

Messdaten

Wie in Tabelle 20 dargestellt, stehen folgende Messperioden zur Verfügung:

Messperiode	Beginn	Ende
25dec98	25.12.98 (16h00)	31.12.98 (23h00)
1jan99	1.1.99 (0h00)	31.1.99 (21h00)
1fev99	31.1.99 (22h00)	22.2.99 (10h00)
23fev99	23.2.99 (11h00)	18.4.99 (18h00)
24avr99	24.4.99 (0h00)	20.6.99 (18h00)

Tabelle 20: Messperioden der Evaluationsbasis II

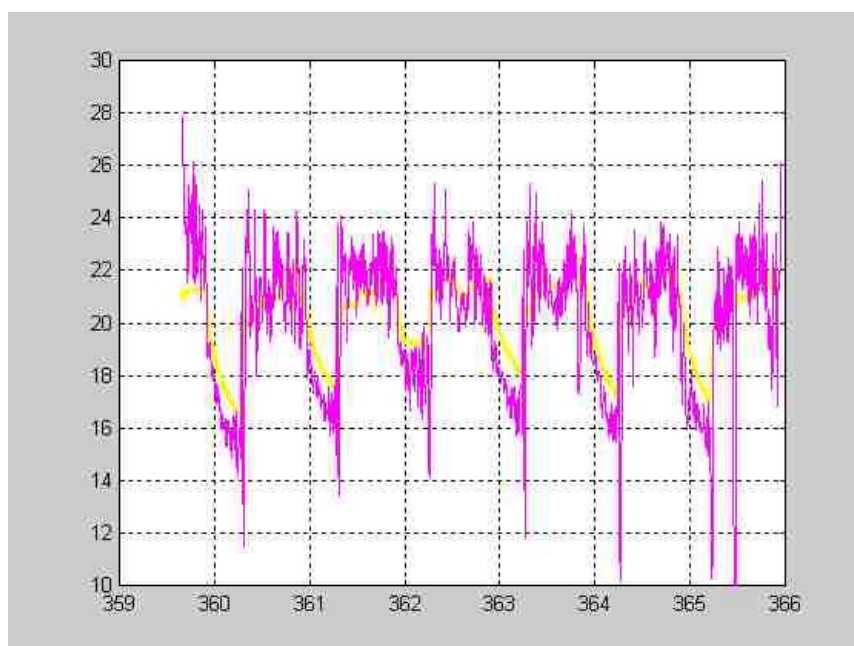
Betreffend den Testdaten soll einerseits auf den Zwischenbericht der Definitionsphase und auf das Kapitel der Testphase IIa in diesem Bericht verwiesen werden.

Identifikations-Schätzalgorithmus

Für die verschiedenen Messperioden wurde der entwickelte Identifikations-Schätzalgorithmus aus der Definitionsphase (siehe [6]) angewendet, wobei für die einzelnen Zeitabschnitte die gemessenen Raumtemperatur mit der geschätzten Raumtemperatur verglichen wird.

Messperiode vom 25. Dezember 1998

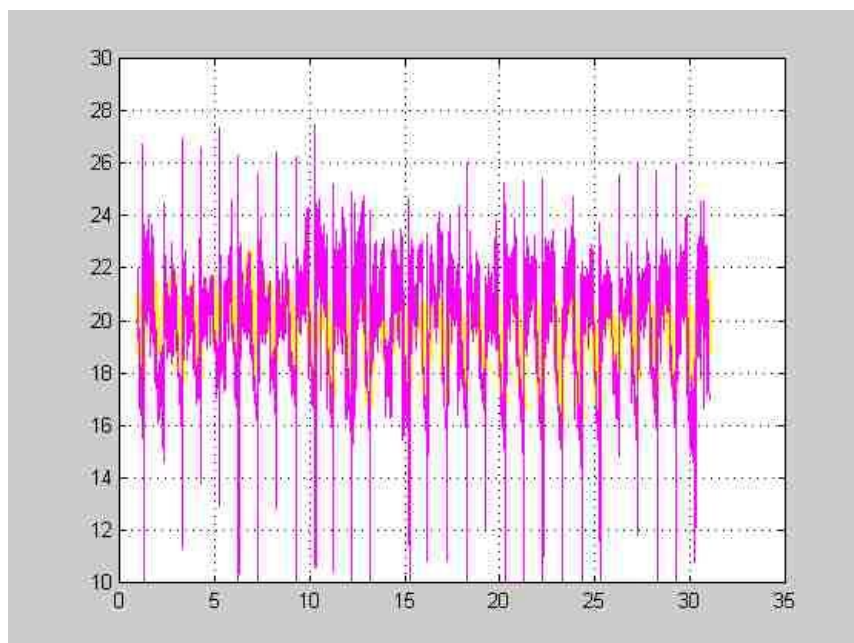
Für diese relativ kurze Messperiode, wurde für die Identifikation der Parameter das gesamte Zeitintervall angewendet. Die Werte der identifizierten Schätzparameter entsprechen folgendem Parametervektor: $x = (7.93, 5084, 196.3)$.



Figur 60: Gemessene Raumtemperatur Tint ([°C], gelb) und berechnete Raumtemperatur ([°C], violett).

Messperiode vom 1. Januar 1999

Die Identifikation der Parameter wurde während der Messperiode der Tage 1 bis 16 ausgeführt und das Evaluationsresultat ist auf das Intervall der Tage 1 bis 31 abgebildet. Der Vektor der angepassten Identifikationsparameter entspricht folgenden Werten: $x = (8.30, 2766, 390.8)$. Abgesehen von den Phasen während des Umschaltbetriebes (on/off) kann eine gute Übereinstimmung der Resultate festgestellt werden (maximale Abweichung der Raumtemperaturen – geschätzt und gemessen - von ca. 2°C).

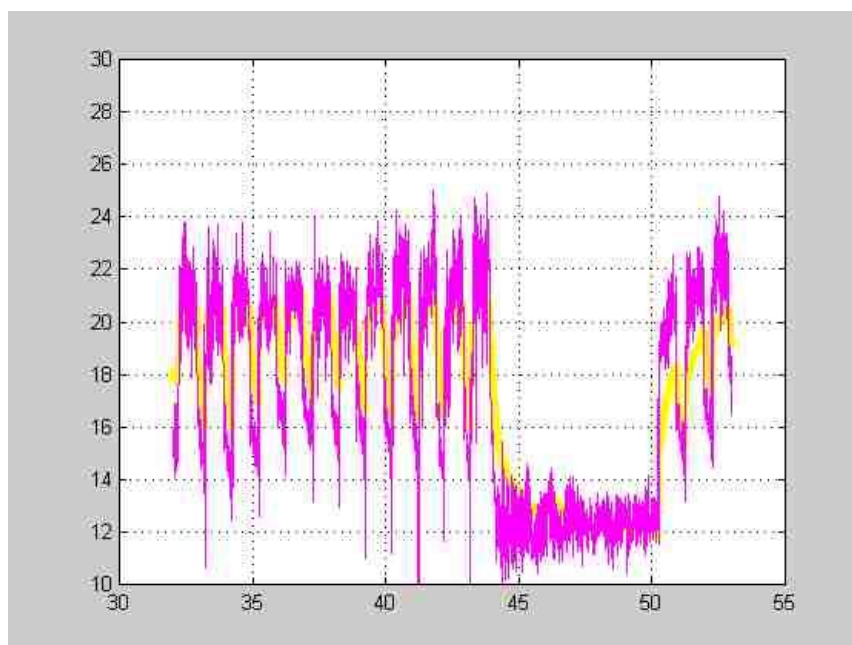


Figur 61: Gemessene Raumtemperatur Tint ([°C], gelb) und berechnete Raumtemperatur ([°C], violett). Periode vom 1. Januar 1999.

Messperiode vom 1. Februar 1999

Die Identifikation der Parameter wurde während dem Intervall der Tage 32 bis 42 durchgeführt, wobei die Resultate der Evaluation auf das gesamte Zeitintervall abgebildet wurden (Tage 32 bis 53). Die Messperiode vom 1. Februar 1999 an wird durch eine Ferienabwesenheit während 6 Tagen charakterisiert, wobei die Heizung ohne Umschaltung auf den Betrieb der Nachtabenkung geschaltet wurde. Die identifizierten Schätzparameter für diese Messperiode entsprechen: $x = (8.52, 5611, 165.9)$.

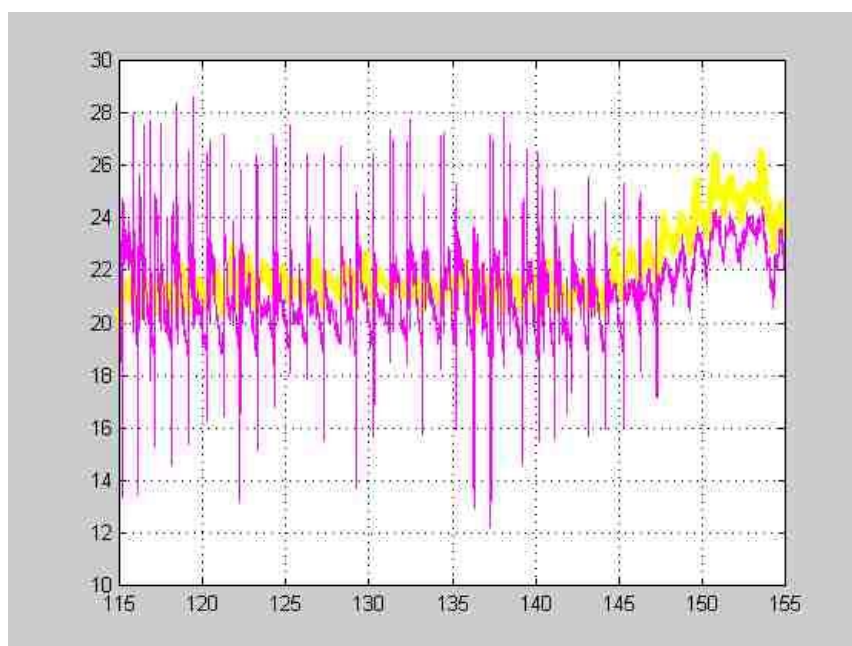
Eine durchschnittliche Abweichung von ca. 2°C zwischen der gemessenen und der geschätzten Raumtemperatur kann gemäss Figur 62 festgestellt werden, wobei mehrheitlich eine Ueberschätzung der Raumtemperatur stattfindet. Während der Phase der Nachtabenkung vom 1. Februar an, ist das Resultat einer guten Uebereinstimmung von Messung und Schätzung nicht weiter ueberraschend (Abweichung von weniger als 1°C, besonders gegen das Ende der Ferienabwesenheit, nachdem sich die Bedingungen stabilisiert haben).



Figur 62: Gemessene Raumtemperatur Tint ([°C], gelb) und berechnete Raumtemperatur ([°C], violett). Periode vom 1. Februar 1999.

Messperiode vom 24. April 1999

Die Messperiode vom 24. April 1999 ist durch Daten, welche einer Zwischensaison entsprechen, gekennzeichnet. Die Identifikation der Schätzparameter wurde während dem Zeitintervall der Tage 115 und 130 vorgenommen und die Evaluation des Schätzalgorithmus wurde auf die gesamte Messperiode (Tage 115 bis 155) abgebildet. Während eines ersten Zeitabschnittes war die Heizung ausgeschaltet, wobei die Zirkulationspumpe in Betrieb blieb. Eine gute Uebereinstimmung der geschätzten mit der gemessenen Raumtemperatur kann festgestellt werden (die geschätzten Werte divergieren um 1 bis 2°C vom gemessenen Werte, obwohl die Identifikation während einer anderen Zeitspanne ausgeführt wurde).



Figur 63: Gemessene Raumtemperatur Tint ([°C], gelb) und berechnete Raumtemperatur ([°C], violett). Periode vom 24. April 1999.

Messperiode vom 24. April 1999 unter Berücksichtigung einer Anpassung der Parameter

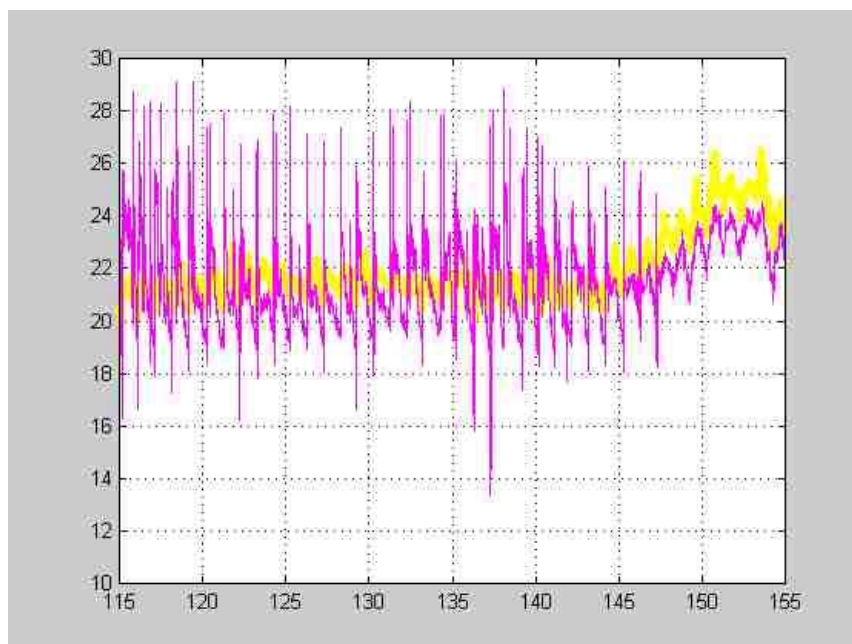
Die Identifikation der Schätzparameter ist, abhängig von der Identifikationsphase, durch grosse Unterschiede gekennzeichnet. Tabelle 21 zeigt die Werte der Koeffizienten betreffend den Identifikationsphasen:

Periode	Identifikationsperiode	x(1)	x(2)	x(3)
25dec98	359 (16h00) - 365 (23h00)	7.93	5084	196.3
1jan99	1 (0h00) - 16 (0h00)	8.30	2766	390.8
1fev99	32 (0h00) - 42 (0h00)	8.52	5611	165.9
24avr99	115 (0h00) - 130 (0h00)	9.32	2851	372.4

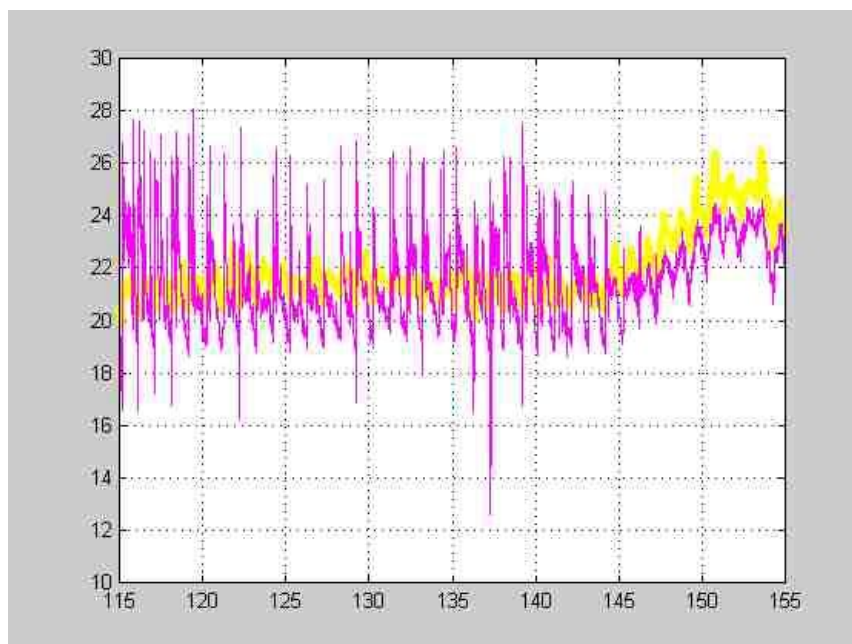
Tabelle 21: Identifikationsparameter für verschieden Messperioden

Zur Vervollständigung der Evaluationsresultate soll im folgenden Identifikationsparameter, welche aus den Berechnungen mit Daten aus einer Messperiode resultieren, auf Messpunkte einer Messperiode, welche durch ganz unterschiedliche Bedingung charakterisiert ist, angewendet werden. So werden im folgenden Beispiel die Identifikationsparameter, welche aus den Berechnungen aus den Messperioden des 1. Januar 1999 und des 1. Februar erfolgen, auf die Messdaten der Periode des 24. April 1999 angewendet werden. Figur 64 und Figur 65 zeigen die Resultate dieser Evaluation:

Die Uebereinstimmung zwischen den gemessenen und den geschätzten Raumtemperaturen ist von bescheidener Qualität (grosses Rauschen auf dem Schätzsignal), jedoch stimmen die Trends (Mittelwerte) der beiden Graphen mehr oder weniger überein. Ein markanter Unterschied ist feststellbar in Uebergangsperioden, d.h. während dem Ein- und Ausschalten der Heizung.



Figur 64: Gemessene Raumtemperatur Tint ($^{\circ}\text{C}$, gelb) und berechnete Raumtemperatur ($^{\circ}\text{C}$, violett). Periode vom 24.April 1999 mit Anpassung der Parameter basierend auf Periode Januar 1999.



Figur 65: Gemessene Raumtemperatur Tint ($^{\circ}\text{C}$, gelb) und berechnete Raumtemperatur ($^{\circ}\text{C}$, violett). Periode vom 24.April 1999 mit Anpassung der Parameter basierend auf Periode Februar 1999.

Empirisches Schätzmodell

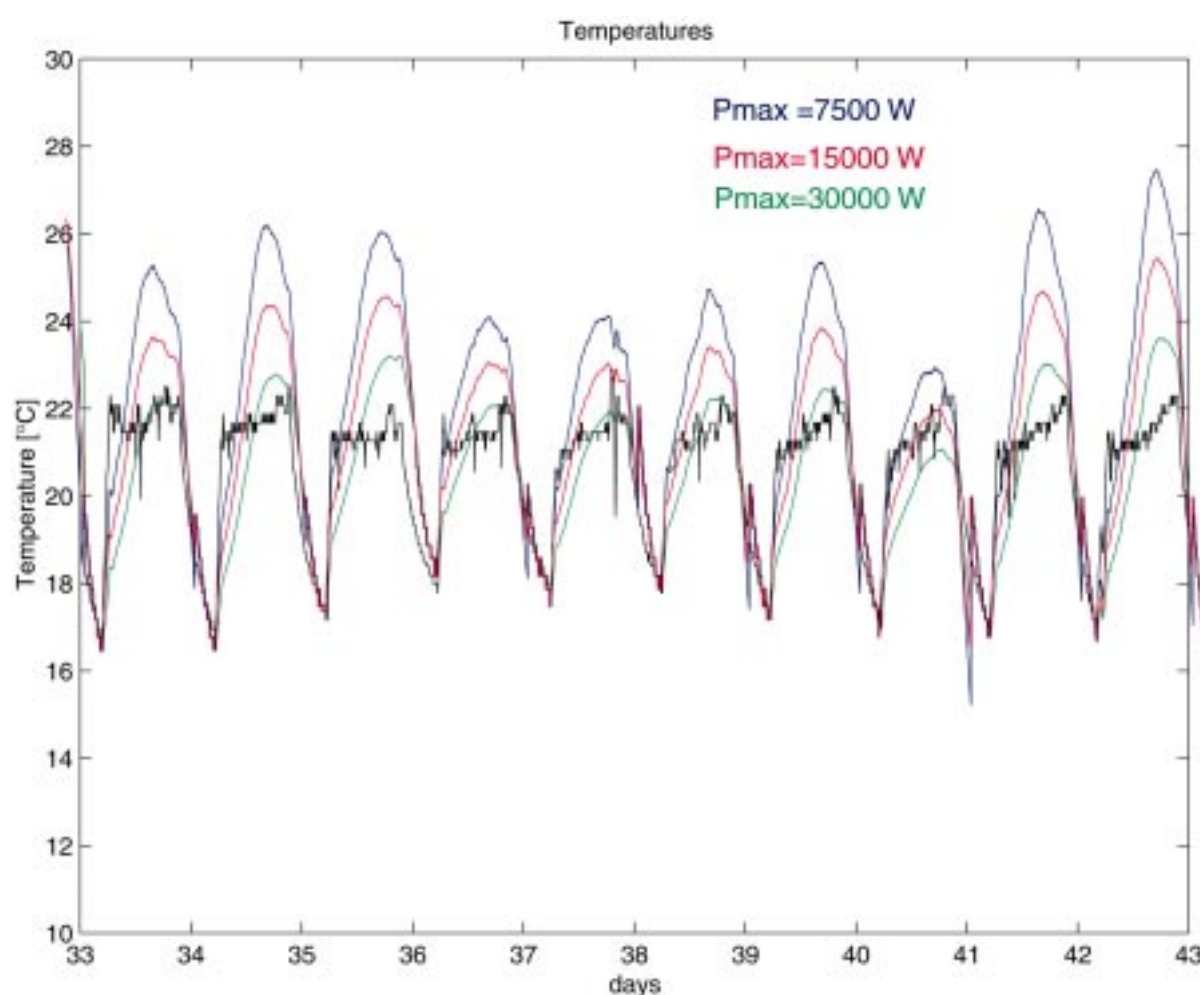
Da die Adaptation des NEUROBAT-Gebäudemodelles nicht mehr möglich ist (die repräsentative Raumtemperatur ist lediglich bekannt, falls das nominale Heizleistungssignal gleich Null ist), ist die Wahl der Initialisierungsparameter des Gebäudemodelles

leistungsbestimmend. Die Sensibilität betreffend des gewählten Gebäude-Initialisierungsmodelles soll im Folgenden untersucht werden.

P_{MAX} Parameter-Sensitivität

Während der NEUROBAT-Inbetriebnahme wird mittels einer Initialisierungsprozedur die maximale Heizleistung bestimmt. Hierbei wird durch vollständiges Öffnen des Mischventils ein fiktiver Durchfluss bestimmt und mit dem Parameter des fiktiven Durchflusses wird eine fiktive maximale Heizleistung berechnet. Falls sich die mittels des Durchflusses berechnete Heizleistung stark von der effektiv an das Gebäude gelieferten Heizenergie unterscheidet, kann sich dies entscheidend auf die Betriebsleistung des Reglers auswirken.

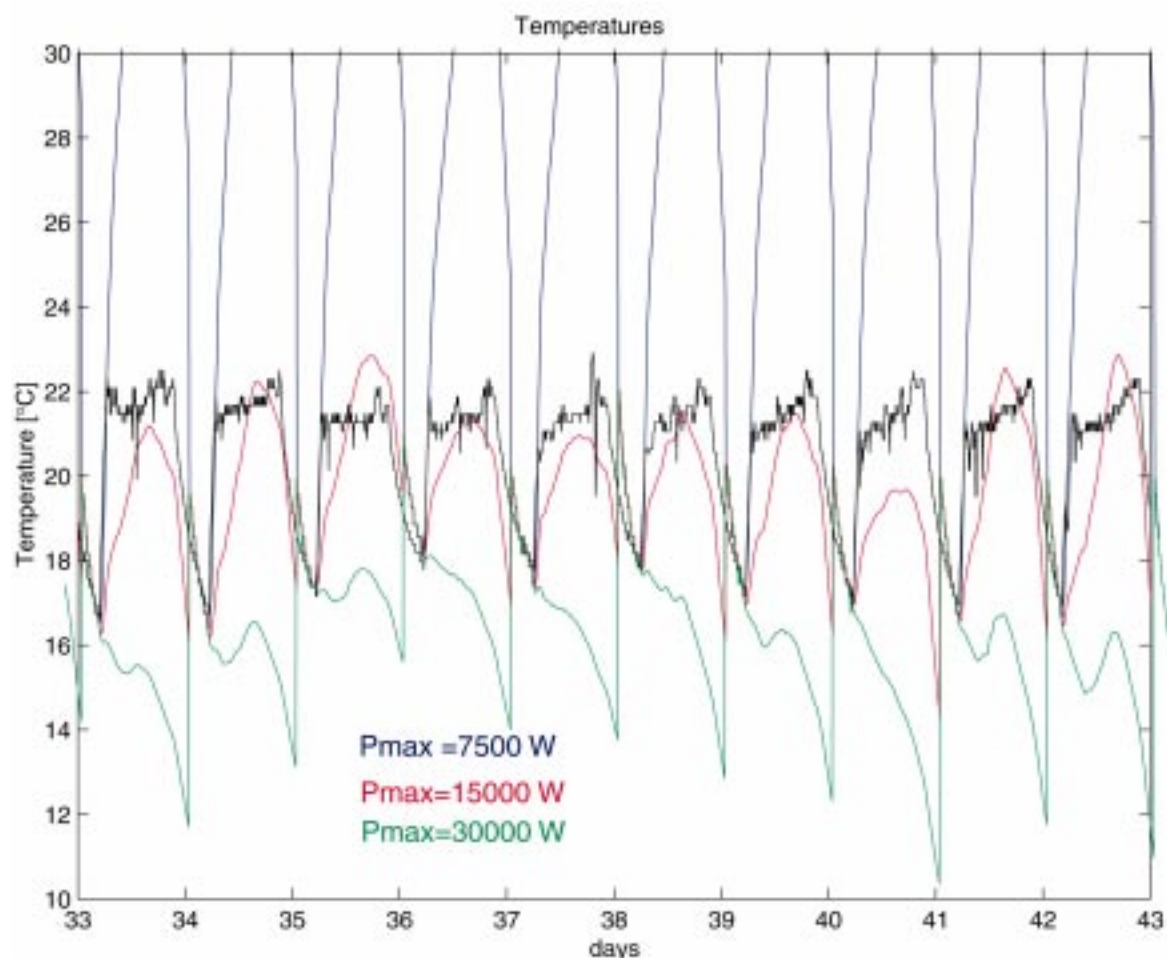
Die eingeführte Initialisierungsprozedur vermindert jedoch den Einfluss des Parameters der maximalen Heizleistung, wie in Figur 66 und Figur 67 gezeigt ist.



Figur 66: Betrieb des ‚Low-Cost-Reglers‘ mit empirischer Raumtemperaturschätzung während 10 Tagen (Daten des Testgebäudes in Basel). Drei unterschiedliche Parameter P_{max} (7500W, 15000W und 30000W) wurden für das Initialisierungsmodell angewendet. Die Initialisierungsprozedur wurde angewendet, um die an das Gebäude gelieferte Heizenergie zu bestimmen.

Es kann festgestellt werden, dass mittels Re-Kalibrierung der Raumtemperatur (basierend auf der Rücklauftemperatur) eine grosse Variation des P_{MAX} -Parameters einen kleinen Einfluss auf die Betriebsleistung des ‚Low-Cost-Reglers‘ hat, falls die Initialisierungsprozedur angewendet wird. Wie Figur 67 zeigt, wirkt sich jedoch eine starke Variation des P_{MAX} -

Parameters verheerend auf die Betriebsleistung aus, falls die Initialisierungsprozedur nicht angewendet wird und dafür die reelle Heizleistung in das Modell eingeführt wird.



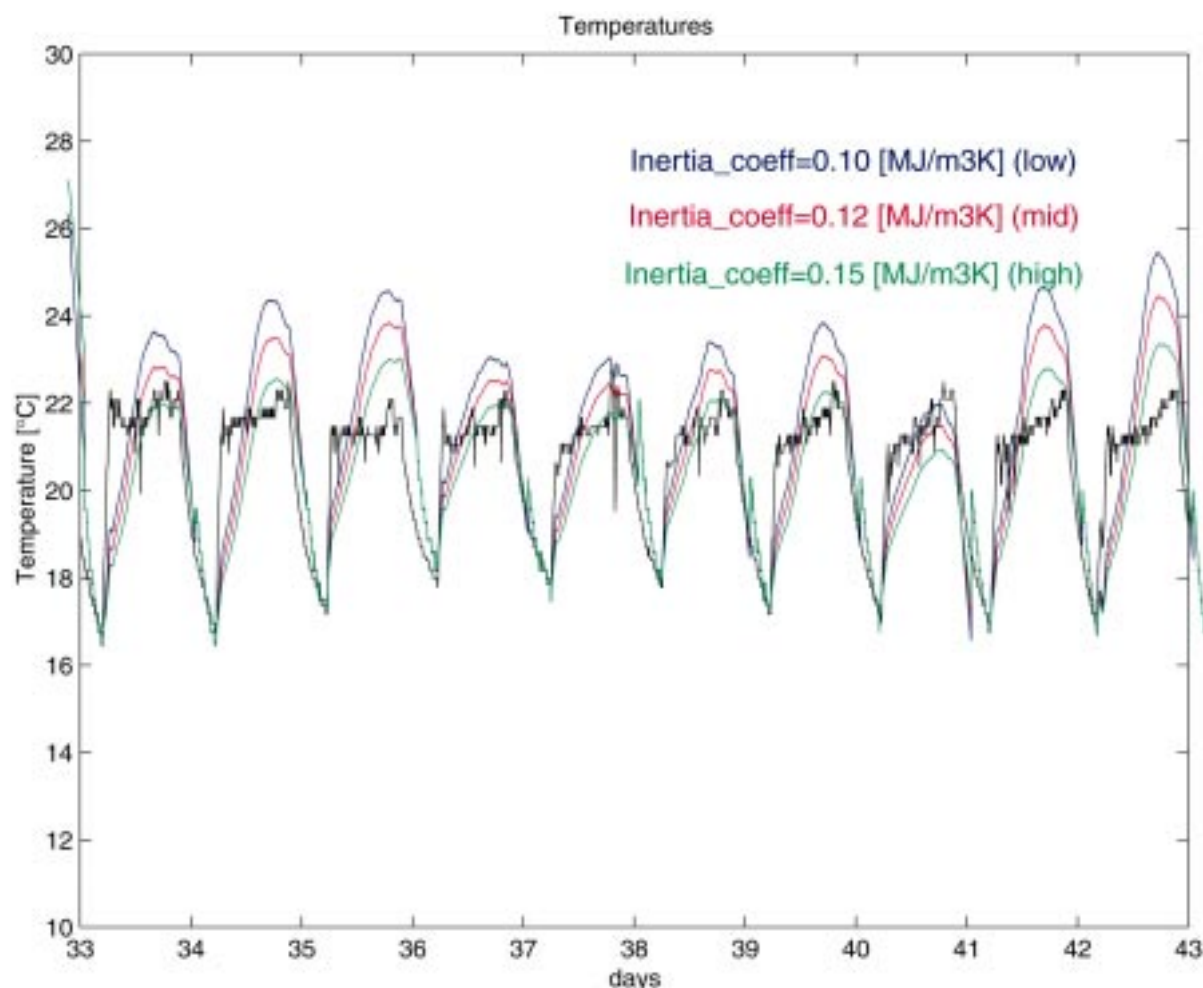
Figur 67: Betrieb des ‚Low-Cost-Reglers‘ mit empirischer Raumtemperaturschätzung während 10 Tagen (Daten des Testgebäudes in Basel). Drei unterschiedliche Parameter P_{max} (7500W, 15000W und 30000W) wurden für das Initialisierungsmodell angewendet. Die Initialisierungsprozedur wurde nicht angewendet, jedoch wurde die reelle Heizleistung im Initialisierungsmodell verwendet.

Sensitivität betreffend den Gebäudeparametern

Das Initialisierungsmodell wird durch folgende drei linguistischen Parameter definiert:

Parameter	Einstellung
Thermische Trägheit	Klein – Mittel – Gross
Thermische Isolation	Klein – Mittel – Gross
Sonneneinstrahlungs-Sensitivität	Klein – Mittel – Gross

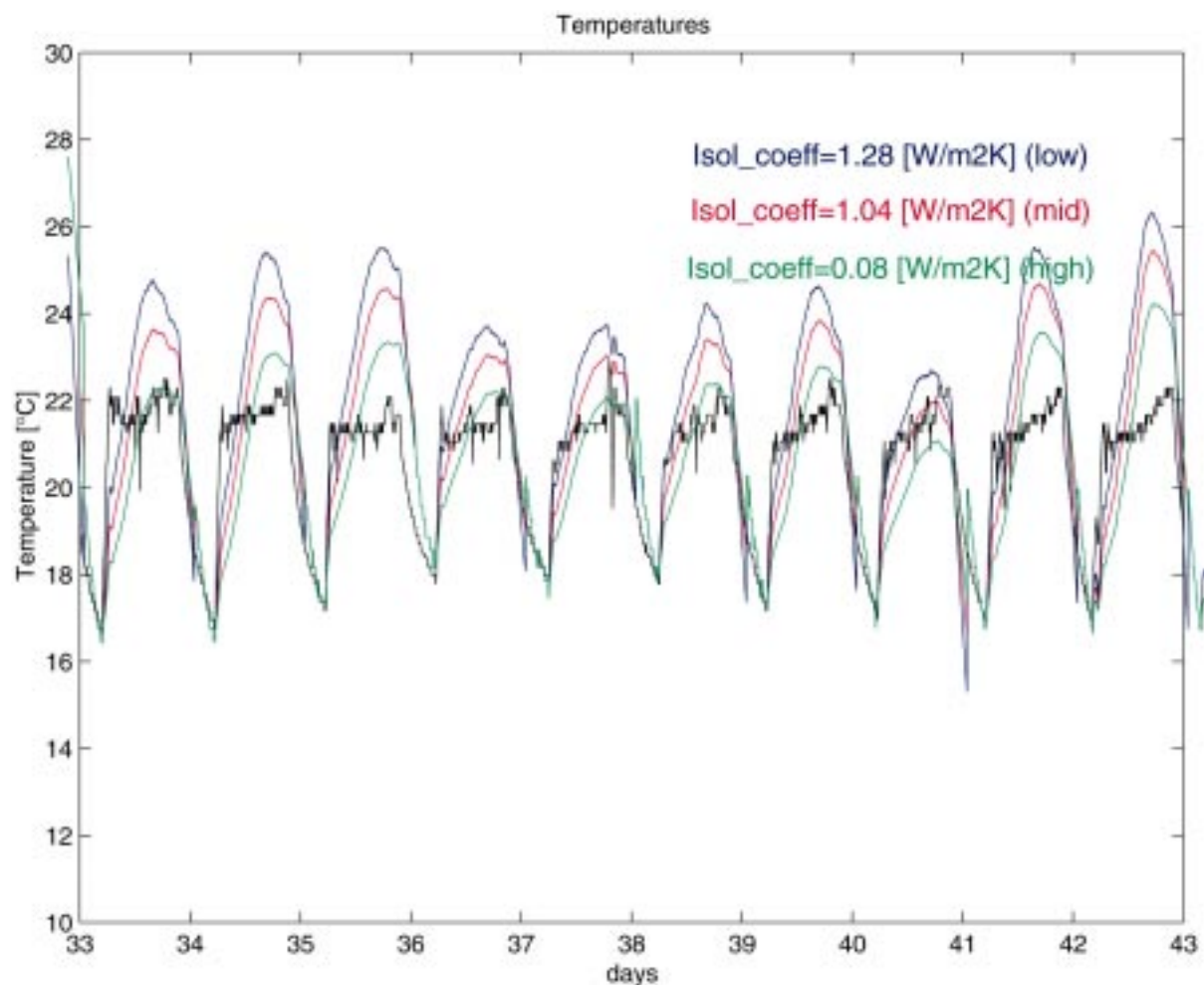
Der Einfluss dieser Initialisierungsparameter auf die Betriebsleistung des ‚Low-Cost-Reglers‘ ist in Figur 68, Figur 69 und Figur 70 abgebildet.



Figur 68: Modell-Sensitivität betreffend des Parameters 'Thermische Trägheit'

Folgende Punkte können betreffend den Resultaten in Figur 68, Figur 69 und Figur 70 gefolgert werden:

- Keines der Modelle beschreibt das reelle thermische Verhalten des Gebäudes in korrekt. Dies erklärt sich mittels der Einfachheit des Initialisierungsmodelles mit lediglich einer Zeitkonstanten, womit das Modell der Dynamik des Systems nicht zu folgen vermag. Es sei jedoch darauf hingewiesen, dass ein solch einfaches Modell gewählt wurde, um die Zahl der Einstellung der Service-Parameter während der Inbetriebnahme zu reduzieren.
- Der Einfluss der Sonneneinstrahlung in Figur 70 ist zu gross (die Raumtemperaturen sind während des Tages zu hoch) ausser der Parameter der Sonneneinstrahlungs-Sensitivität wird gleich Null gesetzt. Dies entspricht jedoch der Realität, da das Testgebäude in Basel über keine Sonnenwärmegewinne verfügt (vergleiche Kapitel 5.1.1').
- Die Sensitivität des Modelles betreffend der Gebäudeinitialisierungsparameter ist klein, kann jedoch im schlimmsten Fall eine Differenz zwischen der reellen und geschätzten Raumtemperatur von 6°C ergeben.

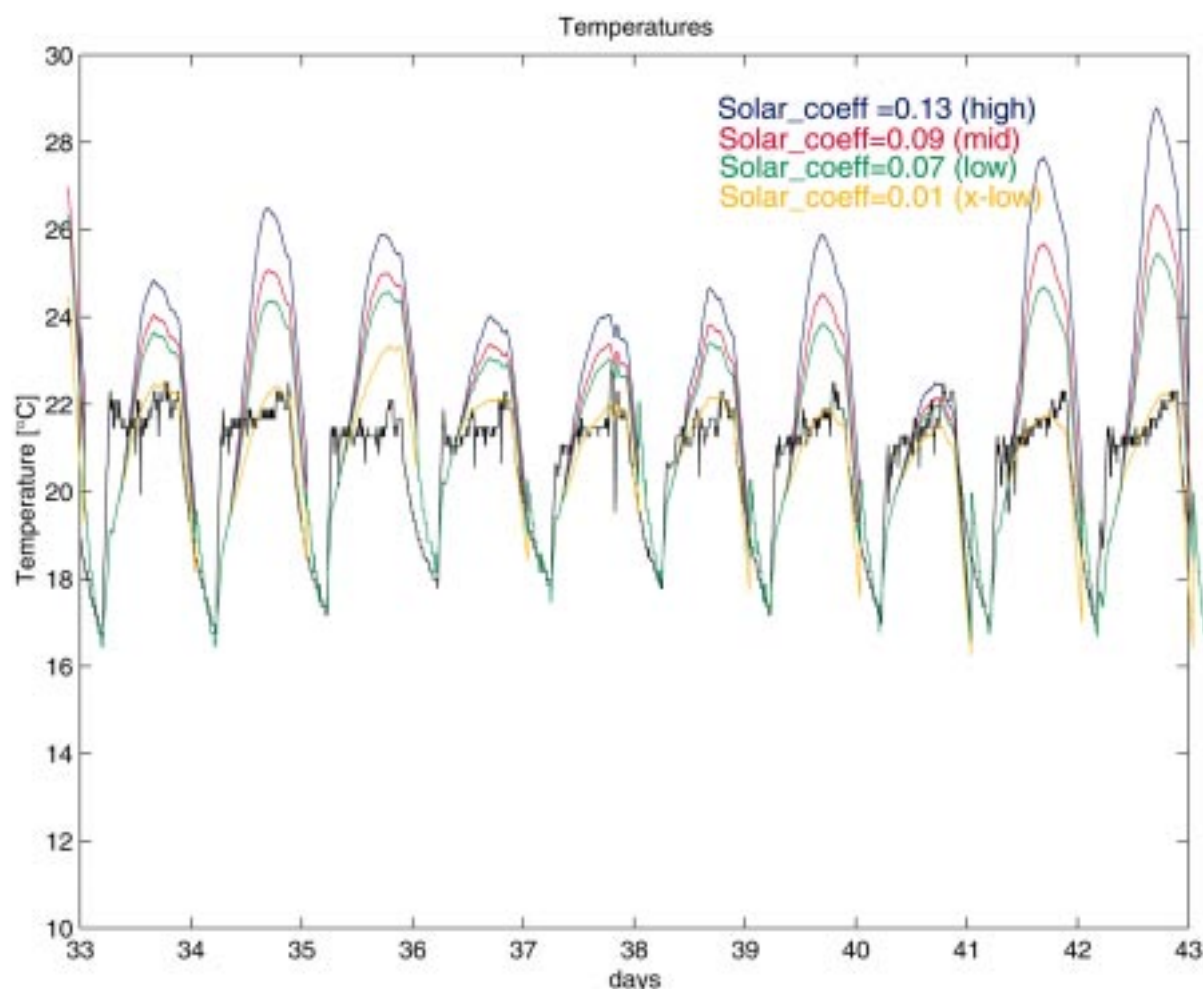


Figur 69: Modell-Sensitivität betreffend des Parameters 'Thermische Isolation'

Optimierung der Methode der empirischen Raumtemperaturschätzung

Um die Qualität des empirischen Raumtemperaturmodelles zu verbessern, ist es notwendig, eine Information betreffend der Qualität Vorhersagemodelles zu erhalten. Folgende drei Feedback-Methoden können dabei angewendet werden:

- Zum Zeitpunkt der Re-Kalibrierung der Raumtemperatur mittels der Rücklauftemperatur (Ende der Nachtabsenzphase) ist der Schätzfehler des Initialisierungsmodelles unbekannt. Der Wert des Schätzfehlers könnte für eine Adaptation des Initialisierungsmodelles verwendet werden.
- Die Eingaben des Benutzers betreffend der maximalen Raumtemperatur während des Tages könnten ebenfalls verwendet werden, um eine Adaptation des Gebäudemodelles vorzunehmen.
- Die Messdaten während der Phase der Nachtabsenkung könnten verwendet werden, um eine Anpassung des Gebäudemodelles vorzunehmen (mittels neuronalen Netzwerken).



Figur 70: Modell-Sensitivität betreffend des Parameters 'Sonneneinstrahlungssensitivität'

3.4.5 Schlussfolgerung

Die während der Definitionsphase des Projektes entwickelten Schätzalgorithmen der Raumtemperatur (Methode 1: Identifikation der Gebäudeparameter, Methode 2: Empirischer Schätzalgorithmus) wurden mittels Daten auf zwei Testgebäuden (mehrstöckiges Wohnhaus in Lausanne, zweistöckiges Doppelfamilienhaus in Basel) analysiert.

Wie bereits aus der Simulationsanalyse der Definitionsphase des Projektes gefolgert wurde, zeigt die Methode 1 eine starke überlagerte Störung, was in einen Fehler von bis zu 8°C resultiert. Die Resultate der Schätzung der Raumtemperatur sind stark von den identifizierten Parameter abhängig, welche mit dem Verhalten der Benutzer, der Installation und dem Klima variiert (siehe Testgebäude Lausanne). Zudem erfordert diese Methode eine vorgängige Identifikation mit zusätzlichen Messfühlern, womit diese Methode wenig attraktiv für die Praxis ist.

Die Methode der empirischen Schätzmodelles ermöglicht das thermische Verhalten des Gebäudes ohne Raumfühler zu bestimmen. Während der Heizphase wird das Initialisierungsmodell des NEUROBAT Reglers angewendet, um die Raumtemperatur zu bestimmen. Die Sensitivität des Initialisierungsmodelles betreffend den Gebäude-Service-Parametern wurde qualitativ getestet und die Resultate zeigen, dass mittels einer Initialisierungsprozedur der Einfluss des P_{MAX} -Service-Parameters limitiert werden kann. Die

Simulationsstudien zeigen, dass die Betriebsdaten des 'NEUROBAT-Low-Cost-Reglers' mit den Betriebsdaten eines modernen und kommerziellen Heizungsreglers mit Raumtemperaturaufschaltung vergleichbar ist (was heisst, dass eine 20%-ige Energieeinsparung betreffend kommerziellen Heizungsreglern ohne Raumtemperaturaufschaltung resultiert). Diese Resultate werden durch die Sensitivitätsstudie betreffend der Wahl der Initialisierungsparameter des Gebäudemodells bestätigt. Eine weitere Optimierung des 'NEUROBAT-Low-Cost-Heizungsreglers' kann mittels einer Feedback-Information betreffend der Qualität des Gebäude-Vorhersagemodells erreicht werden, wobei drei mögliche Methoden vorgeschlagen wurden.

Dennoch sei seitens des Projektteams nochmals darauf hingewiesen, dass das Konzept NEUROBAT auf einem dynamischen Programmieralgorithmus der Raumtemperatur basiert, und daher eine geschätzte Raumtemperatur eine beträchtliche Leistungseinbusse (bis zu 13% betreffend des Energieverbrauches und bis zu 5% betreffend des Komfortes) entspricht (siehe Referenz [6]).

3.5 Kontroll- und Ueberwachungsfunktionen

Der NEUROBAT-Heizungsregler wird durch eine Kontroll-Konzept ergänzt, was ermöglicht, die Funktionalitäten des Heizungsreglers kontinuierlich zu überwachen. Das Konzept der Kontroll- und Ueberwachungsfunktionen wird während der folgenden Testphase erarbeitet und während der Optimierungsphase implementiert.

Gültigkeit der Ausgangssignale der NEUROBAT Reglermodule

Die Reglermodule des NEUROBAT Algorithmus (Klimavorhersage, Gebäudeprädiktion, Gebäudemessungen, etc.) liefern an den dynamischen Programmieralgorithmus physikalisch überprüfbare Ausgangssignale. Daher muss für jedes kritische Reglermodul folgende Werte definiert werden:

- Physikalische Limiten
- Substitutionswerte im Falle einer Ueberschreitung der physikalischen Limiten
- Generierung einer Fehlermeldung

Tabelle 22 resümiert die kritischen Module des Regelalgorithmus mit ihren kontrollierbaren Ausgangsvariablen.

Kritische Module	Kontrollvariablen	Bemerkungen
Meteoprädiktion	T_{ext} , G_{hor}	-
Gebäudeprädiktion	T_{int}	-
Heizleistungsberechnung	P_{opt}	Die Prädiktionen von T_{int} und P_{opt} werden gemäss Tabelle 23 kontrolliert
Sensorenmessungen	T_{ext} , T_{retour} , T_{aller} , T_{int} , G_{hor}	Ueberwachung der Gültigkeit der Messsignale
Adaptierung des Gebäudemodells	Lerndaten	Ueberwachung der Anzahl Lernbeispiele und deren physikalische Gültigkeit
Adaptierung der Klimamodelle	Lerndaten	Ueberwachung der Anzahl Lernbeispiele und deren physikalische Gültigkeit

Tabelle 22: Kritische Module und Variablen

Funktionstests

Folgende Funktionstest werden vorgesehen, um einen korrekten Betrieb des NEUROBAT Reglers zu gewährleisten. Im Besonderen lässt sich die Vorhersage der optimalen Heizleistung überprüfen, da der Regelalgorithmus die Vorhersage der mittleren Raumtemperatur des Gebäudes zur Verfügung stellt. Tabelle 23 zeigt eine Uebersicht dieser Funktionstests.

Funktionstest	Beschreibung
1) Im Falle einer grossen Abweichung der Raumtemperatur unterhalb der Sollwerttemperatur	Ueberprüfung der zukünftigen erhöhten Heizleistung
2) Im Falle einer grossen Abweichung der Raumtemperatur oberhalb der Sollwerttemperatur	Ueberprüfung der zukünftigen verminderten Heizleistung
3) Entsprechend den Komfortperioden	Ueberprüfung der Antizipation des Algorithmus im Falle eines längeren Unterbruchs der Komfortperiode

Tabelle 23: Funktionelle Tests

Weitere Funktionstests

- Ueberprüfung der gelieferten Heizleistung aufgrund des Steuersignales. Dies ermöglicht eine Verifikation des kaskadierten PID Reglers des Mischventils.
- Ueberprüfung der Konvergenz der neuronalen Reglermodule während der Lernphase. Im Falle einer Divergenz sind die Lernalgorithmen neu zu lancieren.

3.6 Installationsprozedur – Durchflussbestimmung

Bei der Inbetriebnahme des NEUROBAT-Heizungsreglers entspricht der Massendurchfluss einem zu definierenden Service-Parameter. Um die Zahl der Service-Parameter zu limitieren, soll der Parameter des Massendurchflusses automatisch bei der Inbetriebnahme bestimmt werden. Das Prinzip dieser automatische Parameter-Bestimmung soll im folgenden beschrieben und aufgrund von Messungen überprüft werden.

Die von der Heizung an das Gebäude gelieferte Heizleistung ist proportionell der Temperaturdifferenz des Vorlaufs und des Rücklaufs, gemäss:

$$P_{HEIZ} = k * (T_v - T_r)$$

Die Konstante k (in [W/K]) ist proportionell dem Massendurchfluss und wird im folgenden als Durchflusskoeffizient bezeichnet. Dieser Durchflusskoeffizient entspricht dem Massendurchfluss multipliziert mit dem Koeffizienten der Wärmekapazität der Heizflüssigkeit.

Um die Kosten der Inbetriebnahme zu limitieren, wird der Durchflusskoeffizient zum Zeitpunkt der Installation des Heizungsreglers nicht gemessen und ist daher nicht bekannt. Um aufgrund der berechneten optimalen Heizleistung die entsprechende Vorlauftemperatur des Heizkreises zu bestimmen, muss der Durchflusskoeffizient k bekannt sein. Dieser Schätzalgorithmus soll im folgenden detailliert werden.

3.6.1 Prozedur ohne Temperaturmessfehler

Die maximale Heizleistung entspricht einem Service-Parameter des NEUROBAT-Heizungsreglers. Mit anderen Worten, falls die maximale Heizleistung an das Gebäude geliefert wird, ist das Mischventil vollständig geöffnet und man erhält:

$$k = P_{\text{MAX}} / (T_v - T_r)_{\text{MAX}}$$

wobei $(T_v - T_r)_{\text{MAX}}$ einem vollständig geöffneten Mischventil entspricht.

Organigramm zur Bestimmung des Durchflusskoeffizienten:

1. Öffnen des Mischventils
2. Einschalten der Pumpe
3. Kalibrierungszeitkonstante von T1 Minuten zuwarten (Parameter T1: siehe unter 3.6.3)
4. Bestimmen von $(T_v - T_r)_{\text{MAX}}$; Mittelung von 20 Messpunkten (Messfrequenz von 10 Sek.)
5. Berechnen von $k = P_{\text{MAX}} / (T_v - T_r)_{\text{MAX}}$

3.6.2 Prozedur mit korrigierten Temperaturmessfehler

Um eine korrekte Berechnung des Durchflusskoeffizienten zu gewährleisten, werden im folgenden mögliche Kalibrierungsfehler der Temperaturmesssonden berücksichtigt. Dabei wird ein Offset der Temperaturen für Vorlauf- und Rücklauf angenommen. In diesem Fall berechnet sich die Heizleistung zu:

$$P_{\text{HEIZ}} = k * (T_v - T_r) - c$$

Mit anderen Worten, falls das Mischventil geschlossen ist ($P_{\text{HEIZ}}=0$), beträgt die gemessene Temperaturdifferenz zwischen Vorlauf und Rücklauf:

$$T_v - T_r = c/k = c1$$

Diese Differenz ist auf den Kalibrierungsfehler der Messsonden zurückzuführen. Es sei an dieser Stelle noch erwähnt, dass die verwendeten Temperaturfühler eines Wärmezählers paarweise realisiert werden, um Kalibrierungsfehler zu minimieren. Dies entspricht jedoch nicht der Praxis für den vorliegenden Fall der Heizungsregelung.

Der Durchflusskoeffizient entspricht daher im Falle eines vollständig geöffneten Mischventils:

$$k = (P_{\text{MAX}} + c) / (T_v - T_r)_{\text{MAX}} = P_{\text{MAX}} / ((T_v - T_r)_{\text{MAX}} - c1)$$

Organigramm zur Bestimmung des Durchflusskoeffizienten:

1. Schliessen des Mischventils
2. Einschalten der Pumpe
3. Kalibrierungszeitkonstante von T2 Minuten zuwarten (Parameter T2: siehe unter 3.6.3)
4. Bestimmen von $(T_v - T_r)$; Mittelung von 20 Messpunkten (Messfrequenz von 10 Sek.)
5. Berechnung von $c1 = (T_v - T_r)$
6. Öffnen des Mischventils
7. Kalibrierungszeitkonstante von T1 Minuten zuwarten (Parameter T1: siehe unter 3.6.3)
8. Bestimmen von $(T_v - T_r)_{\text{MAX}}$; Mittelung von 20 Messpunkten (Messfrequenz von 10 Sek.)
9. Berechnung von $k = P_{\text{MAX}} / ((T_v - T_r)_{\text{MAX}} - c1)$

$$10. c = k * c_1$$

Falls eine Korrektur der Kalibrierungsfehler der Temperaturfühler berücksichtigt wird, so muss diese Korrektur ebenfalls bei der Berechnung der effektiven optimalen Heizleistung berücksichtigt werden (dies ist wichtig für die Datenbank des Gebäudemodelles), gemäss:

$$P_{HEIZ} = k * (T_v - T_r) - c$$

Ebenfalls muss diese Korrektur berücksichtigt werden bei der Berechnung des Sollwertes der Vorlauftemperatur, gemäss:

$$T_v = (P_{HEIZ} + c) / k + T_r$$

Eine andere Möglichkeit, das Kalibrierungsproblem der Temperatursonden zu umgehen, besteht in einer Re-Kalibrierung der Messsonden nachdem das Mischventil geschlossen wird. In diesem Fall berechnet sich der Durchflusskoeffizient k gemäss 3.6.1.

3.6.3 Kalibrierungszeitkonstanten

Nach Schliessen des Mischventils kann aufgrund der Distanz zwischen dem Vorlauf- und Rücklauffühler eine Temperaturdifferenz gemessen werden. Es ist daher notwendig eine Zeit (Zeitkonstante T_2) abzuwarten, dass sich der Heizkreis stabilisiert. Normalerweise ist eine Dauer von einigen Minuten ausreichend. Bei einer Messung von tiefen Temperaturen (die Temperaturdifferenz von Vorlauf und Rücklauf ist von der effektiv gemessenen Temperatur abhängig) vergrössert sich diese Zeitkonstante (normalerweise bis zu 30 Minuten bei Heizinstallationen mit Heizkörpern).

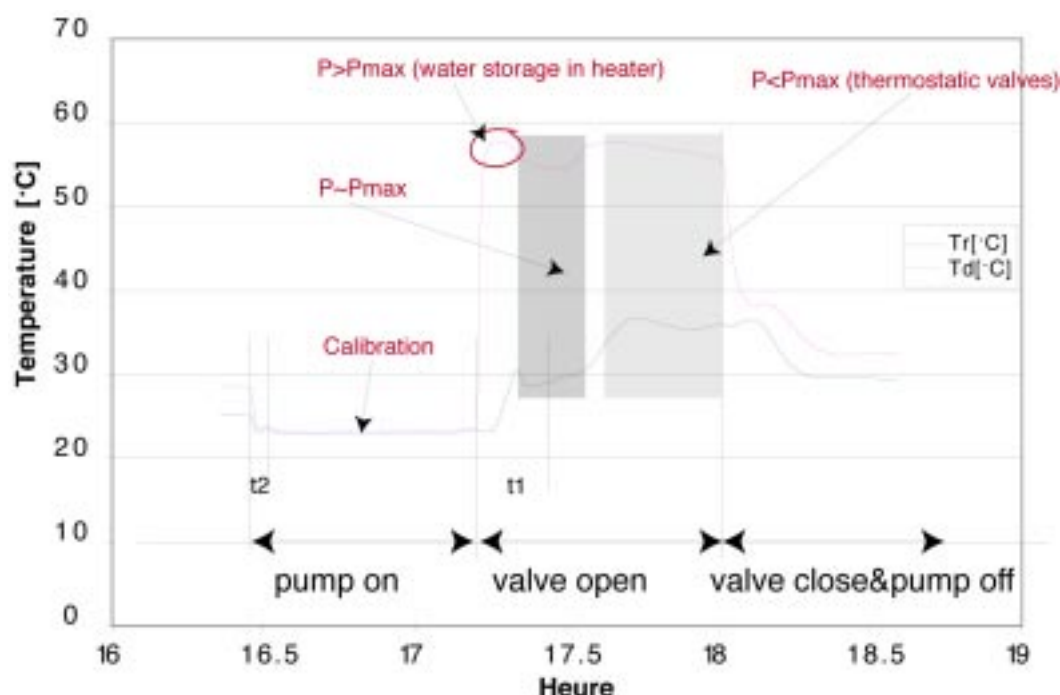
Beim Oeffnen des Mischventils ergeben sich mehrere mögliche Fälle:

1. Der Wasservorrat des Heizboilers (z.B. Wassertemperatur von 80°C) ist voll. In diesem Fall entspricht die gelieferte Heizleistung nach Oeffnen des Mischventils einem Wert, der grösser ist als P_{MAX} ($P_{EFF} > P_{MAX}$).
2. Der Wasservorrat des Heizboilers ist leer, womit nach Oeffnen des Mischventils der Wert der gelieferten Heizleistung gleich dem Wert der maximalen Heizleistung ist ($P_{EFF} = P_{MAX}$).
3. Der Wert der Rücklauftemperatur ist erhöht (z.B. aufgrund geschlossener Thermostatenventile) und die Temperatur des Heizboilers ist durch seinen maximalen Wert limitiert. In diesem Fall gilt: ($P_{EFF} < P_{MAX}$).
4. Der Wert der Vorlauftemperatur ist limitiert aufgrund Sicherheitsvorkehrungen und das Mischventil kann nicht vollständig geöffnet werden.

Um sicherzustellen, dass die effektiv gelieferte Heizleistung der maximalen Heizleistung entspricht muss eine bestimmte Zeit gewartet werden, damit sich der Wasservorrat des Heizboilers leert (Fall 1 und 2), müssen die Thermostatenventile geöffnet werden (Punkt 3) und darf nicht zulange gewartet werden (Punkte 3 und 4). Punkt 4 gilt vor allem für Fussbodenheizungen und ist nicht anwendbar auf Heizinstallationen mit Heizkörpern. Eine Zeitkonstante T_1 von 30 Minuten erscheint vernünftig, muss aber durch Messungen überprüft werden.

3.6.4 Evaluationsdaten

Der Schätzalgorithmus zur Bestimmung des Durchflusskoeffizienten wurde mittels Daten der Testinstallation in Basel evaluiert. Figur 71 zeigt die während den Tests erhaltenen Messwerte:



Figur 71: Vorlauf- und Rücklauftemperaturen während der Inbetriebnahme zur Bestimmung des Durchflusskoeffizienten

Figur 71 zeigt die folgenden Phasen:

1. Schliessen des Mischventils und Einschalten der Pumpe

Vorlauf- und Rücklauftemperatur unterscheiden sich kaum. Der Wert der Temperaturdifferenz geht auf Kalibrierungsfehler der Messsonden zurück.

2. Oeffnen des Mischventils

Nach Oeffnen des Mischventils steigt die Voralufttemperatur stark an (bis gegen 60°C). Die Rücklauftemperatur steigt langsam an aufgrund der Länge des Heizkreises: der stationäre Zustand ist nicht erreicht.

3. Nach Zeitkonstante T1 (15 Minuten)

Der stationäre Zustand ist erreicht: die maximale Heizleistung kann gemessen werden.

4. Ca. 30 Minuten nach Oeffnen des Mischventils

Die Thermostatenventile beginnen zu arbeiten – die maximale Heizleistung kann nicht mehr geliefert werden.

5. Schliessen des Mischventils

Die Temperaturwerte des Vorlaufs und des Rücklaufs fallen zusammen (in diesem Beispiel wurde ebenfalls die Pumpe ausgeschaltet, was die markante Temperaturdifferenz erklärt).

Der aufgrund des eingeführten Schätzalgorithmus berechnete Durchflusskoeffizienten ist in folgender Tabelle wiedergegeben:

P_{MAX} [kW]	T1 [min]	T2 [min]	C [K]	$(T_v - T_r)_{\text{MAX}}$ [K]	K [W/K]	Berechneter Durchfluss [kg/s]	Referenzierter Durchfluss [kg/s]
20	15	15	0.3	25	809	0.193	0.183

Tabelle 24: Schätzung des Massendurchflusses

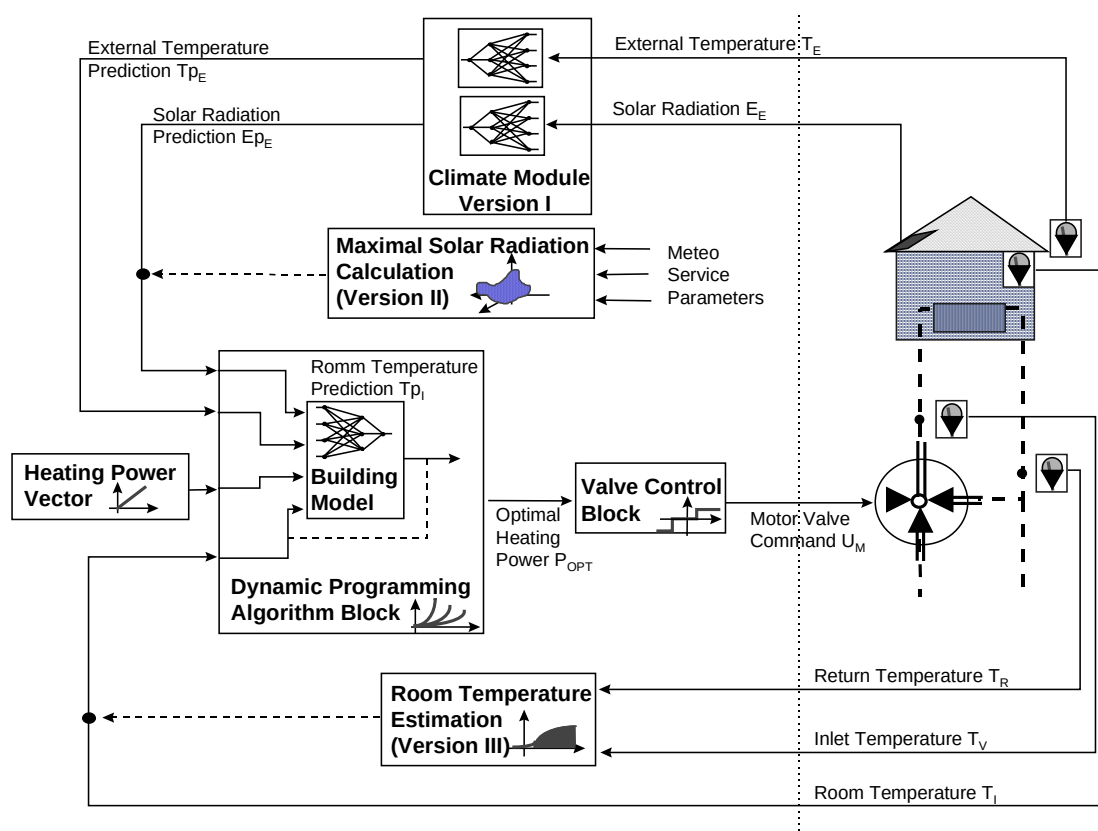
Es kann festgestellt werden, dass der geschätzte Massendurchfluss dem Referenzwert, der mittels eines Wärmezählers gemessen wurde, entspricht ($\pm 5\%$). Die maximale Heizleistung entspricht ungefähr 20 kW (P_{MAX} zwischen 17 und 23 kW). Es sei an dieser Stelle erwähnt, dass eine hohe Präzision für den Durchflusskoeffizienten nicht gefordert ist, da das Verhältnis zur maximalen Heizleistung wichtig ist.

4. NEUROBAT Prototypenentwicklung

4.1 Heizungsregler-Spezifikationen und Benutzerschnittstelle

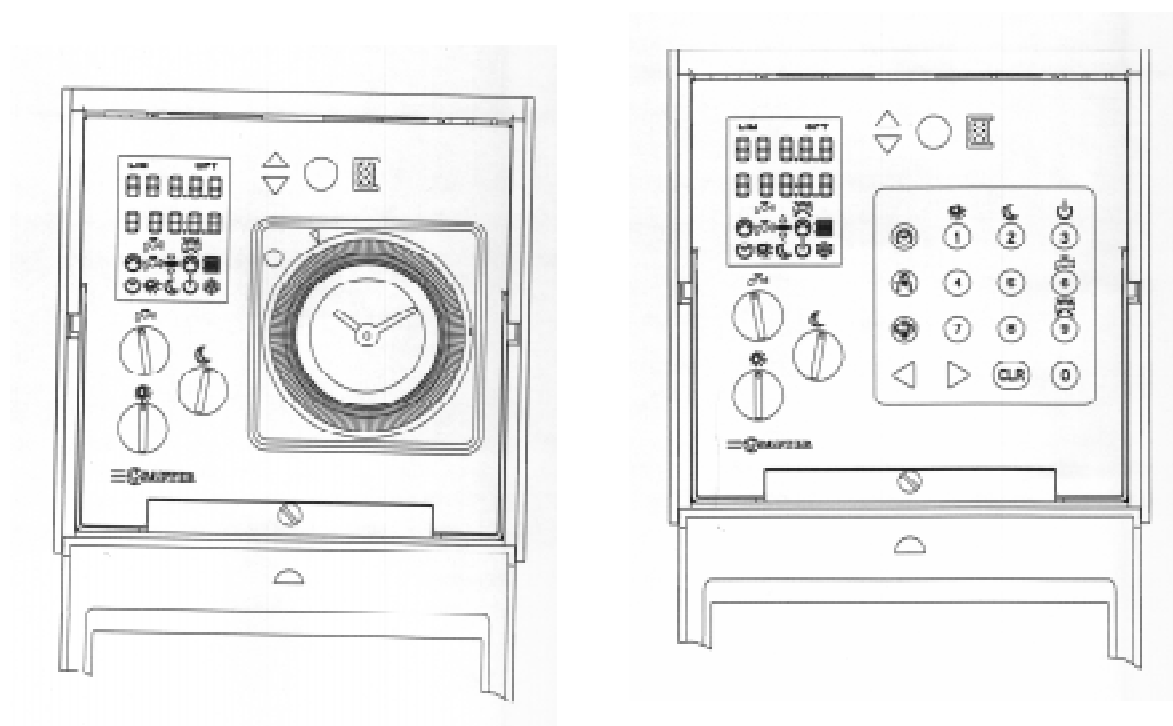
Betreffend den technischen Spezifikationen des NEUROBAT Heizungsreglers für die H/W-Anforderungen und das S/W Designs soll auf Kapitel 2 referenziert werden.

Figur 72 zeigt das Konzept des NEUROBAT Heizungsreglers betreffend der verwendeten Sensorsignale, der Regloptionen und des Regelalgorithmus.



Figur 72: Globales Funktionsschema des NEUROBAT Heizungsreglers

Entsprechend den Anforderungen dieses Konzeptes ist in Figur 73 ist eine erste mögliche Version der Benutzerschnittstelle des NEUROBAT Heizungsreglers dargestellt, welche die Definition der Inbetriebnahmeparameter und der Benutzerparameter ermöglicht. Dabei wird zunächst eine digitale und analoge Version zur Eingabe dieser Service Parameter vorgesehen.



Figur 73: Analoge und digitale Version der Benutzerschnittstelle des NEUROBAT Heizungsreglers

4.2 H/W-Design

Figur 74 zeigt das detaillierte Architekturschema des NEUROBAT Heizungsreglers basierend auf den technischen Spezifikationen

Als zentrales Element ist ein leistungsfähiger 16-bit Microcontroller vorgesehen, der sowohl Regelung als auch Handling der Peripherie übernehmen kann. Der Programmspeicher von ca. 128kb wird in der endgültigen Version wahrscheinlich als Maske ausgeführt, kann während der Entwicklung aber als internes oder externes OTP-, Flash- oder UV-Eprom vorliegen.

Der flüchtige Datenspeicher ist mit 512kb den hohen Anforderungen des neuronalen Algorithmus an die Menge der Berechnungen angepasst. Aus der Komplexität des Algorithmus ergibt sich auch die Notwendigkeit eines relativ grossen unverlierbaren EEPROM-Speichers (bis 64kb), der ausser den eingestellten Parametern auch die relevanten Basisdaten für die Berechnungen umfasst. Zur Ansteuerung der Speicherperipherie kommen die üblichen Busarchitekturen in Frage, dargestellt ist die klassische, 8bit breite Daten-/Adressmultiplexstruktur.

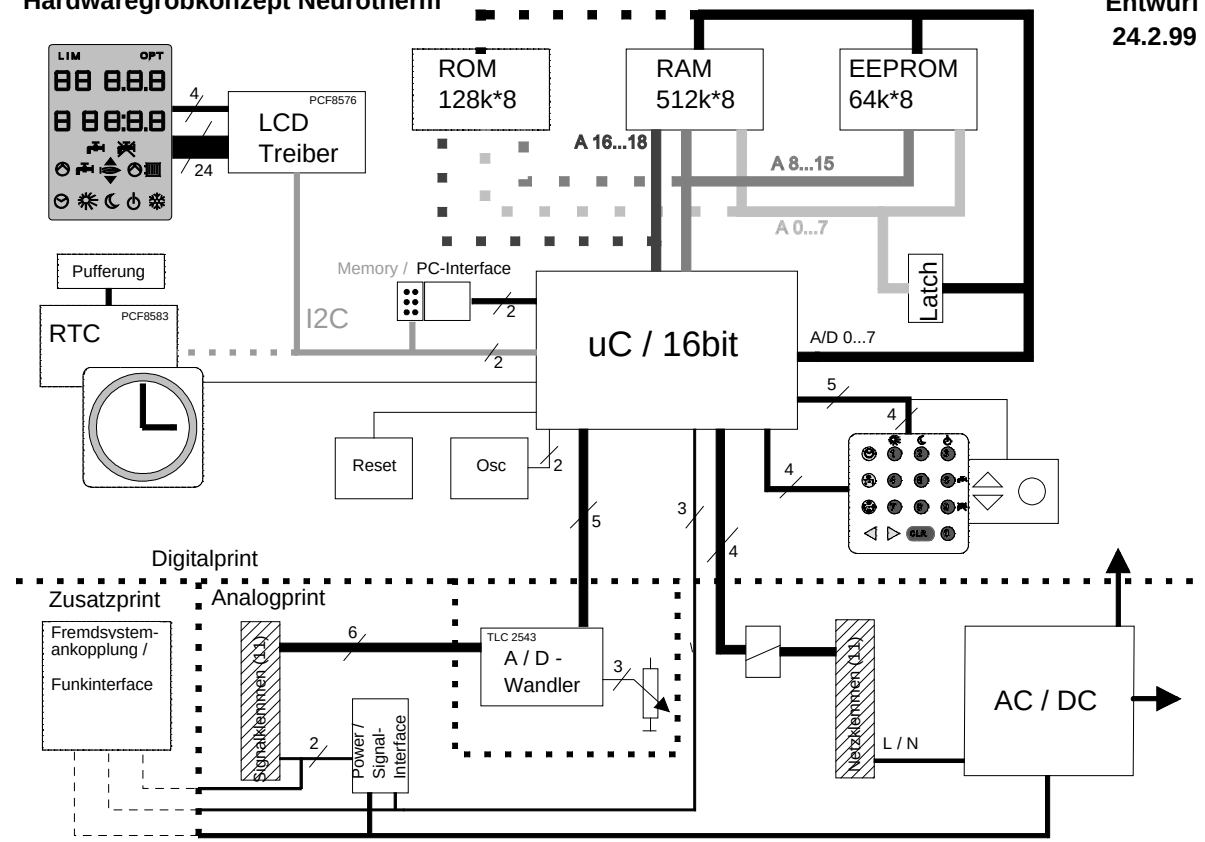
Zur hinreichend genauen und stabilen Erfassung der (max. 7) Messwerte dient ein 12bit A/D-Wandler mit serieller Ansteuerung, die Stellung der analogen Bedienelemente kann dank der 11 Wandlereingänge hier ebenfalls problemlos erfasst werden.

Die Ansteuerung der Ausgänge erfolgt konventionell über 4 Relais.

Für das Schaltprogramm sind zwei Varianten vorgesehen (Referenz: Kapitel 4.1):

- Analoguhr in Tages- oder Wochenausführung mit Einstellung und Darstellung der Schaltzeiten über Schaltreiter.
- Digitale Schaltuhr mittels serielltem (I2C) Uhrenchip, Zeitanzeige über LCD und (Schalt-) Zeiteingabe über 10er- Tastatur.

Hardwaregrobkonzept Neurotherm

Entwurf
24.2.99

Figur 74: Detailliertes Architekturschema des NEUROBAT Heizungsreglers

Konfigurations- und Serviceparameteränderungen werden über eine Minimalknastatur eingegeben, die zusammen mit den Uhrentasten eine Matrix bilden (4 x 5) und vom uC angesteuert werden. Die eingestellten Werte (im Normalbetrieb allerdings nicht sichtbar) sind auf einen LC-Display (ca. 90 Segmente) dargestellt, dessen serieller Treiber am I2C-Bus vom uC bedient wird.

Eine zusätzliche I2C - Schnittstelle nach aussen bietet die Möglichkeit, die Parametrierung von einem Memory - Modul zu lesen oder auf dieses zu kopieren. Alternativ können durch die im Memory-Interface integrierte RS-Schnittstelle via PC Werte übertragen oder Tests durchgeführt werden. Tabelle 25 referenziert die möglichen Parametrisierungen.

Typ	Parameter	Einheit	Bemerkung
Gruppe I			
I00	Text	[°C]	Aktuelle Aussentemperatur
I01	Kesseltemperatur	[°C]	Aktuelle Kesseltemperatur
I02	Tair	[°C]	Aktuelle Raumtemperatur
I03	Td	[°C]	Aktuelle Vorlauftemperatur
I04	Tr	[°C]	Aktuelle Rücklauftemperatur
I05	Gh	[W/m ²]	Aktuelle Sonneneinstrahlung
Gruppe R			
R07	POptimal	[W]	Aktuelle optimale Heizleistung
P11	vorlaufNominal	[°C]	Berechneter Sollwertvorlauf

Gruppe C			
C00	mDot	$[\text{kg/s}] \times 10^{-3}$	Durchfluss
C01	PHeatMax	$[\text{W}] \times 10^3$	Maximale Heizleistung
C02	Cu	[-]	Normierungs-Konstante
C03	tm	[s]	Motorenlaufzeit
C04	TKesselSoll	$[\text{°C}]$	Sollwert der Kesseltemperatur
C05	IntervalPHeat	$[\text{W}] \times 10^2$	Heizleistungsintervall
C06	Occupancy	[-]	Vektor der Präsenz

Tabelle 25: Kontrollparameter des NEUROBAT Prototypen (PC Zugriff via serieller Schnittstelle)

Die dritte serielle Kommunikation (mit überlagerter Speisespannung) nach aussen über die Anschlussklemmen dient im Normalfall der Anschaltung eines Bediengerätes, kann aber auch mit zusätzlicher Hardware auf einem Zusatzprint zur Ankopplung an ein Fremdsystem genutzt werden.

Die restlichen Hardwarekomponenten (Netzteil, Resetschaltung etc.) weisen keine Besonderheiten gegenüber bisherigen konventionellen Reglern auf und sind deshalb nicht näher erläutert.

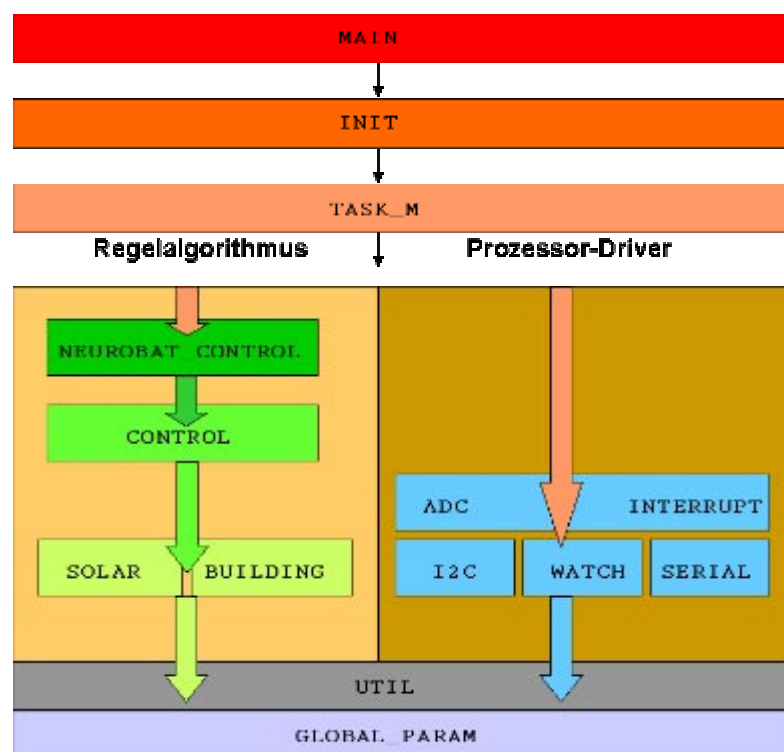
Während des NEUROBAT Projektes, Phase2, wurden zwei Versionen des Heizungsreglers-Prototypen realisiert, wobei Figur 75 die Endversion des NEUROBAT Heizungsreglers zeigt.



Figur 75: H/W-Endversion des NEUROBAT-Heizungsreglerprototypen

4.3 S/W Implementation

Aufgrund einer Limitierung der Prozessor-Rechenleistung und einem Fehlen von Fehlererkennungsfunktionen musste die Struktur der NEUROBAT S/W neu konzipiert werden. Figur 76 zeigt die heute implementierte Struktur der NEUROBAT Prototypen S/W und soll im folgenden kurz erklärt werden.



Figur 76: Struktur der NEUROBAT PrototypenS/W

Das "Main"-Modul der NEUROBAT S/W startet mit der Initialisierung des Prozessoren (wie z.B. Port-Definitionen, etc.) und des Algorithmus (wie z.B. Initialisierung des Gebäude-modelles, etc.).

Die Interrupt gesteuerte "Task"-Funktion innerhalb des "Task"-Modules bildet das Rückgrat der NEUROBAT S/W und wird alle 10ms aufgerufen. Dabei wird innerhalb einer "Event"-Tabelle die zu bearbeitenden "Tasks" kontrolliert, die nach Prioritäten abgearbeitet werden. Bei den "Tasks" innerhalb der "Event"-Tabelle kann es sich einerseits um H/W-nahe Funktionen handeln (in Figur 76 gekennzeichnet durch die Prozessor-Driver; Beispiele: Kommunikation via der seriellen Schnittstelle, Einlesen der Sensorsignale, etc.) oder aber Algorithmus-spezifische Funktionen, welche im folgenden detailliert beschrieben werden sollen.

Das "Util"-Modul umfasst alle Hilfsfunktionen, auf die Algorithmus-spezifische Funktionen (ebenfalls die neuronalen Lernfunktionen) und die Prozessor-Driver-Funktionen zugreifen.

Das Modul "Global_Param" beinhaltet alle global definierten Variablen, wie z.B. die Schaltzeituhr, die Serviceparameter und andere.

Die Algorithmus-spezifischen Module umfassen folgende Funktionen:

- **"Neurobat_Control"-Modul:** Das "Neurobat_Control"-Modul beinhaltet einerseits die Funktion der Berechnung der optimalen Heizleistung, welche alle 15 min in der "Event"-Tabelle aktiviert wird, sowie die Funktion zur Adaptierung der Regelmodelle (Gebäudemodell und Klimamodelle), die alle 24h in der "Event"-Tabelle gesetzt wird.
- **"Control"-Modul:** Das "Control"-Modul umfasst den PI-Algorithmus zur Regelung der Vorlauftemperatur, der alle 5 sek in der "Event"-Tabelle aktiviert wird, sowie den dynamischen Programmialgorithmus, der zur Berechnung der optimalen Heizleistung dient.

- **“Solar“-Modul:** Das “Solar“-Modul umfasst alle Funktionen welche die Klimamodelle betreffen (wie z.B. Vorhersage der Sonneneinstrahlung, Berechnung der maximalen Sonneneinstrahlung, die Adaptation des Prädiktionsmodelles für die Sonneneinstrahlung, etc.) und werden seitens der Funktionen des “Control“-Modules und des “Neurobat_Control“-Modules aufgerufen.
- **“Building“-Modul:** Entsprechend dem “Solar“-Modul umfasst das “Building“-Modul alle Funktionen betreffend des Gebäudemodelles (wie z.B. Adaptation des Gebäudemodelles, Berechnung des Vorhersagewertes der Raumtemperatur, etc.)

Folgende Leistungsdaten können notiert werden:

- Der Uebergang von den floating-point Berechnungen zu den fixed-point Berechnungen, sowie das Re-Design der NEUROBAT Prototypen SW resultierte betreffend den Leistungsdaten zu folgenden Optimierungen:
- Grösse des Programm-Codes: 64 kByte
- Grösse des festen Datenspeichers (EPROM): 4 kByte
- Grösse des dynamischen Datenspeichers (RAM): 256 kByte
- Rechenzeit für die Berechnung der optimalen Heizleistung: 2 min (ursprünglich 12 min)
- Diese Kenndaten resultieren ebenfalls in eine Reduktion der Produktionskosten betreffend eines NEUROBAT Heizungsreglerproduktes.

5. NEUROBAT Testphase

Die Testphase des NEUROBAT Projektes, Phase 2, erstreckt sich über die Heizperioden 98/99 und 99/00. Ein mehrstöckiges Wohngebäude im Raum Basel wurde für diese Testphase mit einem Messsystem ausgerüstet, um die Betriebsleistung des NEUROBAT Heizungsreglers mit den Betriebsdaten eines konventionellen Heizungsreglers zu vergleichen. Im folgenden sollen die Test-Installationen in Basel beschrieben, die angewandten Evaluationsmethoden detailliert und die Messdaten analysiert werden.

In Erweiterung zu den Tests auf dem mehrstöckigen Wohngebäude in Basel zu Evaluationszwecken des NEUROBAT Heizungsreglers, wurde ein mehrstöckiges Wohngebäude in Lausanne mit Messsonden ausgerüstet, um den Raumtemperaturschätzalgorithmus des NEUROBAT Reglers zu testen. Die Test-Installation in Lausanne ist als Ergänzung im Kapitel 5.1.2 zusammengefasst.

5.1 Beschreibung der Test-Installationen

5.1.1 Test-Installation in Basel

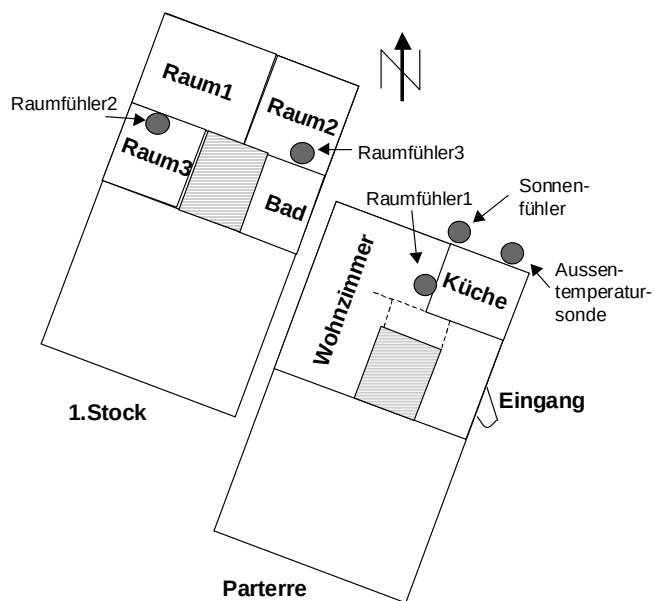
Figur 77 zeigt den Grundriss des Testgebäudes in Basel mit der Positionierung der Messsonden, welche in Tabelle 26 detailliert sind.

Serie No.	Ort	Bezeichnung	Typ	Intervall (Min)
98818	Extern	Text	Temperatur	5
11822	Wohnzimmer	TRoom1	Temperatur	5
4371	1.Stock Osten	TRom2	Temperatur	5
4386	1. Stock Westen	TRom3	Temperatur	5
11935	Heizung	TVorlauf	Temperatur	5
11934	Heizung	TRücklauf	Temperatur	5
94199	Heizung	Energiezähler	Count	15
94191	Heizung	Wärmezähler	Count	15
79237	Eingang	Occ (mV)	Volt	5
79234	Dach	Ghor(mV)	Volt	5

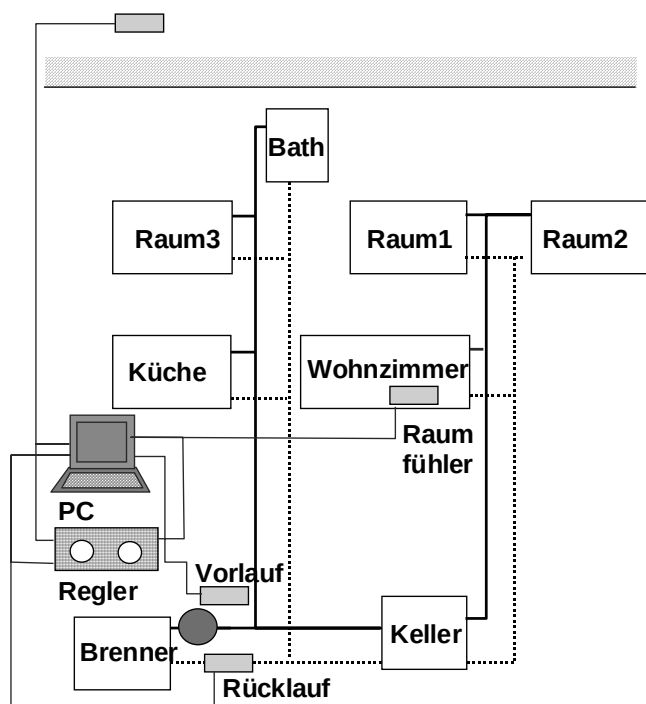
Tabelle 26: Positionierung der Messsonden

Als Messsystem wurde ein vom Heizungsreglersystem unabhängiges Datenakquisitionsverfahren gewählt. Das Verfahren der Positionierung von autonomen Dataloggern, entsprechend den in Tabelle 26 für das Testgebäude Basel verwendeten Speichersystemen, garantiert eine vom Regelalgorithmus unabhängig Evaluation der Betriebsleistung des Heizungsreglers.

Wie Figur 77 zeigt, wurden zur Messung der Raumtemperatur mehrere Messsonden in unterschiedlichen Wohnräumen und mit verschiedener Benutzung und Ausrichtung installiert. Zur Evaluation der Betriebsleistung des Heizungsregelalgorithmus werden zusätzlich die Vorlauf- und Rücklauftemperatur gemessen, sowie die Ausgangssignale des Wärme- und Energiezählers registriert. Um den benutzerabhängigen Komfort zu analysieren wurde ein Präsenzsensoren installiert (Schalter). Die Klimabedingungen werden in Ergänzung zu den Messdaten der Meteostation Basel durch die Signale der Aussentemperatur und der globalen, horizontalen Sonneneinstrahlung vervollständigt.



Figur 77: Grundriss Test-Wohngebäudes in Basel



Leistung: 17.5-23 kW

Boiler: 100l Stock

Figur 78: Heizsystem des Test-Wohngebäudes in Basel

Beim Testgebäude in Basel handelt es sich um ein Zweifamilien-Wohnhaus auf drei Etagen. Betreffend Installation und Messkonzept soll auf den Zwischenbericht der Definitionsphase verwiesen werden [6].

Figur 79 und Figur 80 zeigen die Ost- und Westansicht des Testgebäudes in Basel (Doppeleinfamilienhaus mit einem Untergeschoss, 2 Stockwerke und Estrich).



Figur 79: Testgebäude Basel: Ostfassade



Figur 80: Testgebäude Basel: Westfassade

Für die Messungen wurden folgende Messfühler verwendet (betreffend des Messkonzeptes soll auf [6] verwiesen werden):

- Als Sonnenfühler wurde ein konventioneller Sonnenfühler (L&S, Sonnenfühler QAS92; 0-10V, 1000W/m²) auf Dachhöhe in vertikaler Aussichtung montiert und auf den Regler sowie den TinyTag-Datalogger aufgeschaltet.
- Für die Temperaturfühler (Raumtemperatur, Aussentemperatur, Vorlauftemperatur und Rücklauftemperatur) wurden Nickel 1000Ohm, passiv (Sauter EGT330) verwendet. Parallel zu den Reglertemperatursensoren wurden die Parameter mittels Pt100-Temperaturfühler auf die TinyTag-Datenlogger aufgeschaltet (Monitoringelemente).



Figur 81: Installation der Sensoren auf Testgebäude in Basel

Betreffend der Installation ist zu erwähnen, dass der Heizkessels mit einer Zweipunkt-Steuerung angesteuert wird, wobei der Sollwert auf 80°C festgelegt und ein Regelband von – 5°C definiert wurde.

Figur 82 zeigt eine Beschreibung des verwendeten Heizkessels des Testgebäudes in Basel.

	▪ Stahlkombikessel für Heizung und Warmwasser. ▪ Boiler aus Hwt-Chromstahl (cTc 185 Hwt). ▪ Kessel komplett verdrahtet mit Netzanschlusskabel und Steckdose für den Oelbrenner. ▪ Kesselleistung (Oel;Gas): 17,5 – 23 KW ▪ Boilerinhalt: 100l. ▪ Mischventil mit 3-Punktsteuerung, elektromotorisch, ohne Notstellfunktion (L&G Stellantrieb SQY31).
---	---

Figur 82: Heizkessel des Testgebäudes in Basel

5.1.2 Test-Installation in Lausanne

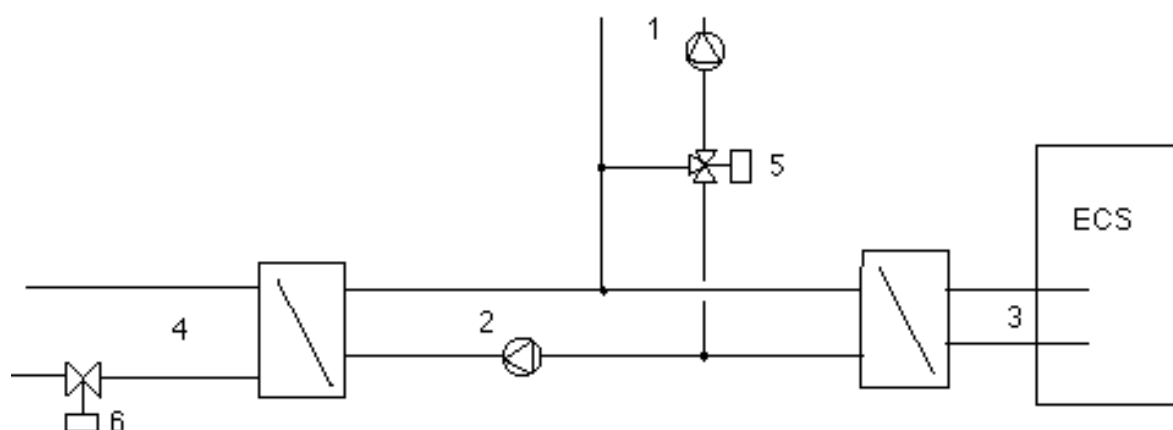
Zur Evaluation des Algorithmus der Raumtemperaturschätzung wurde ein mehrstöckiges Wohngebäude in Lausanne (Adresse: chemin des libellules 8) während des Monats Februar '99 mittels Temperatursensoren am Vorlauf, Rücklauf und in Wohnungen auf verschiedenen Stockwerken und mit unterschiedlicher Ausrichtung ausgemessen. Eine globale Beschreibung dieses mehrstöckigen Gebäudes ist in Figur 83 und Figur 84 dargestellt.

Globale Beschreibung

Die Wohnungen des 7 stöckigen Gebäudes sind entweder nach Osten (2) oder nach Westen (3) ausgerichtet oder aber travererisierend (Ost/West; 2). Das Wohngebäude befindet sich zur Zeit in Renovation zur Implementierung einer passiven Lüftung. Das Heizsystem wurde erst kürzlich installiert, wird auf Distanz geregelt und befindet sich gemäss des Gebäudfachmannes noch nicht in einem stabilen Zustand. Unter Nichtberücksichtigung der Fremdwärme kann damit mit leichten Unterschieden betreffend der Raumtemperaturen in Abhängigkeit der Wohnungen gerechnet werden, eine Situation, welche häufig in der Praxis anzutreffen ist.

Beschreibung des Heizsystems

Figur 83 zeigt das Funktionsschema des Heizsystems des mehrstöckigen Gebäudes in Lausanne:



Légende:

- | | |
|---------------------------------|--|
| 1. Circuit de chauffage | 4. Circuit chauffage à distance |
| 2. Circuit primaire | 5. Commande circuit chauffage |
| 3. Circuit Eau chaude sanitaire | 6. Commande arrivée chauffage à distance |

Figur 83: Funktionsschema des Heizsystems des Test-Gebäudes in Lausanne

Eine Fernwärmeheizung versorgt den Primärkreis der Heizungsinstallation des mehrstöckigen Wohngebäudes mittels eines Wärmetauschers. Der Heizkreis, entsprechend der Brauchwasserversorgung durch den Primärkreis der Heizungsinstallation gespeist, wird mittels eines Mischventils geregelt. Die Heizungsregelung entspricht einer kommerziellen `Low-Cost`-Regelung, basierend auf nicht-adaptierten Heizkurven. Die analysierte Heizungsanlage kann als repräsentativ angesehen werden und entsprechende Zentralheizungsanlagen können in Wohngebäuden als Standard bezeichnet werden. Die Versorgung des Primärkreises mittels einer Fernwärmeheizung entspricht nicht dem Standard, beeinflusst jedoch das thermische Verhalten des Heizkreises nicht.

Positionierung der Raumtemperatursonden

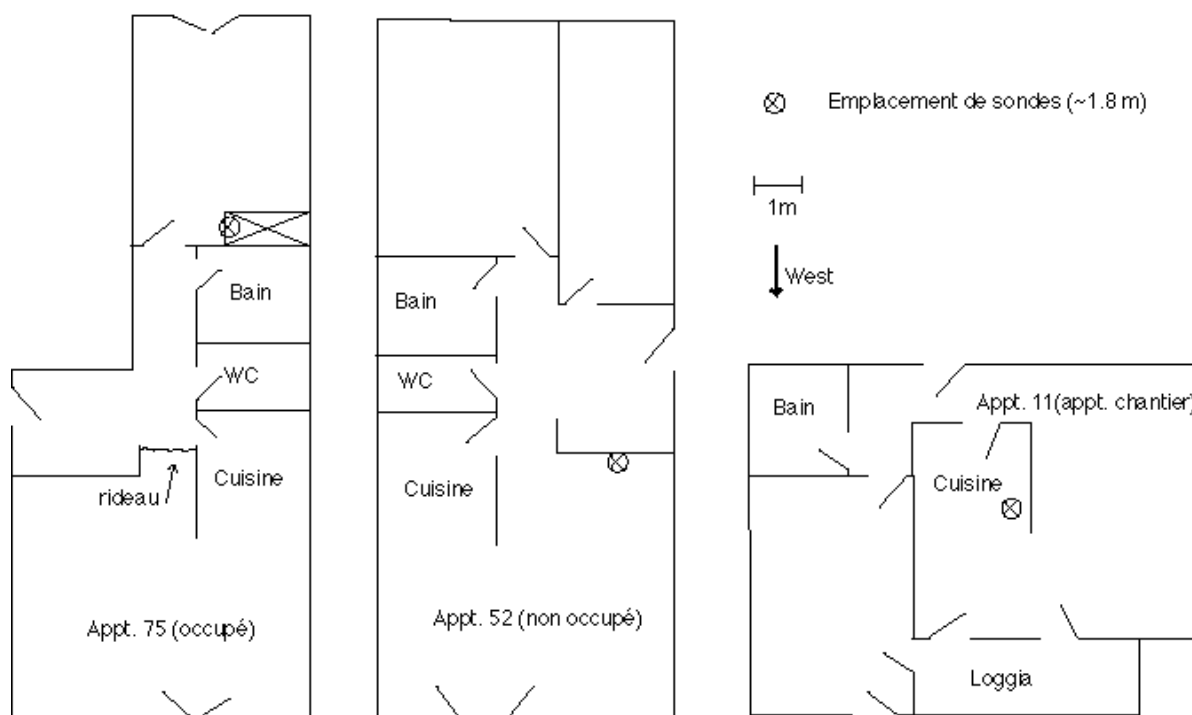
Die im mehrstöckigen Wohngebäude ausgeführten Messungen dienen der Evaluation der Raumtemperaturschätzung mittels der Vorlauf- und Rücklauftemperatur. In verschiedenen Wohnungen des Gebäudes auf unterschiedlichen Stockwerken und mit unterschiedlicher Ausrichtung wurden Raumtemperatursonden installiert :

Temperaturfühler	Installation	Typenbeschreibung
Aussentemperatur [°C]	Ostfassade; beschattet	Tinytag Low Resolution Luftsonde [±0.2°C]
Globale, horizontale Sonneneinstrahlung [W/m²]	Dach	Solarimeter Eppley [5%]
Vorlauftemperatur Heizkreis [°C]	Heizung (lokal)	Tinytag High Resolution Kontaktsonde [±0.1°C]
Rücklauftemperatur Heizkreis [°C]	Heizung (lokal)	Tinytag High Resolution Kontaktsonde [±0.1°C]
Raumtemperatursonde 1	Appartement 11; bewohnt ; 1.Stock ; Ausrichtung Westen;	Tinytag High Resolution Luftsonde [±0.1°C]

Raumtemperatursonde 2	Appartement 52 ; unbewohnt; 5.Stock ; Ausrichtung (West/Ost); geheizt;	Tinytag High Resolution Luftsonde [±0.1°C]
Raumtemperatursonde 3	Appartement 75; bewohnt 7.Stock ; Ausrichtung (West/Ost);	Tinytag High Resolution Luftsonde [±0.1°C]

Tabelle 27: Liste der im mehrstöckigen Wohngebäude installierten Temperatursonden. Die Tastfrequenz der Messsonden beträgt 5min.

Die Raumtemperatursonden wurden auf einer Höhe von 1.80m installiert und deren Positionierung ist in Figur 84 gegeben:



Figur 84: Placierung der Raumtemperaturmesssonden für Test-Gebäude in Lausanne

5.2 Datenevaluations-Methoden

Zur Evaluation des NEUROBAT Heizungsreglers wurde in einem mehrstöckigen Wohngebäude in Basel ein Monitoringsystem installiert. Während der Heizsaison 98/99 wird die Zentralheizung des mehrstöckigen Wohngebäudes mittels einer modernen, kommerziellen Heizungsregelung gesteuert (entsprechend dem während der Phase 1 des Projektes eingesetzten kommerziellen Heizungsregler). Der NEUROBAT Heizungsregler steuert die Zentralheizung des mehrstöckigen Wohngebäudes während der Heizsaison 99/00. Zum Vergleich der Betriebsleistungen des NEUROBAT Heizungsreglers zum modernen, kommerziellen Heizungsregler werden folgende Kriterien angewandt:

- Fähigkeit zur Adaptierung der Regelparameter
- Fähigkeit zur Adaptierung an das Benutzerkomfort-Zeitprogramm
- Betriebsleistung betreffend des Energieverbrauches und des thermischem Komforts.

Das effiziente Fernwärmemanagement des NEUROBAT Heizungsregelalgorithmus wurde durch Tests während zweier Heizsaisons auf dem Testgebäude des LESO/EPFL und mittels einer extensiven Simulationsstudie in der Phase 1 des NEUROBAT Projektes belegt. Für ein Gebäude mit markanten Sonnengewinnen, wie dies für das Testgebäude LESO/EPFL der

Fall ist, resultieren mit dem NEUROBAT Heizungsregler im Vergleich zu einer modernen und kommerziellen Heizungsregelung Einsparungen betreffend des Energieverbrauches von bis zu 13%. Das mehrstöckige Testgebäude in Basel der Phase 2 des NEUROBAT Projektes verfügt über keine signifikativen passiven Sonnenenergiebeiträge, und die Evaluation des NEUROBAT Heizungsreglers fokussiert daher auf Aspekte wie die Optimierung des Benutzerkomforts sowie der Komfortperioden, sowie die Limitierung der Unterhaltsarbeiten des Heizungsreglers.

Evaluation des thermischen Komforts

Der thermische Komfort wird während der Präsenzzeiten der Benutzer in Relation zum gewünschten Benutzerkomfort gemäss der Methode von Fanger evaluiert.

Energetische Effizienz

Ein schlechtes Management der Antipization resultiert generell in einen suboptimalen Komfort zu Beginn und am Ende einer Komfortperiode mit einem erhöhten Energieverbrauch. Ein Vergleich charakteristischer Tage, wie z.B. Montag morgen nach einem Wochenende ohne Benutzerpräsenz, wird die Fähigkeit der Antizipation der Heizungsregler belegen.

Der Vergleich des Energieverbrauches einer Zentralheizung, welche während zweier Heizsaisons von verschiedenen Regelsystemen gesteuert wurde, lässt sich mittels indirekten Methoden durchführen. Die Methode der Energiegrösse ermöglicht die Charakterisierung der Heizanforderungen mittels des Energieverbrauches ausgedrückt in Heiztagen. Diese Methode analysiert den Energieverbrauch der Heizsysteme in klimatisch vergleichbaren Situationen. Folgende Vor- und Nachteile ergeben sich durch die Anwendung dieser Methode:

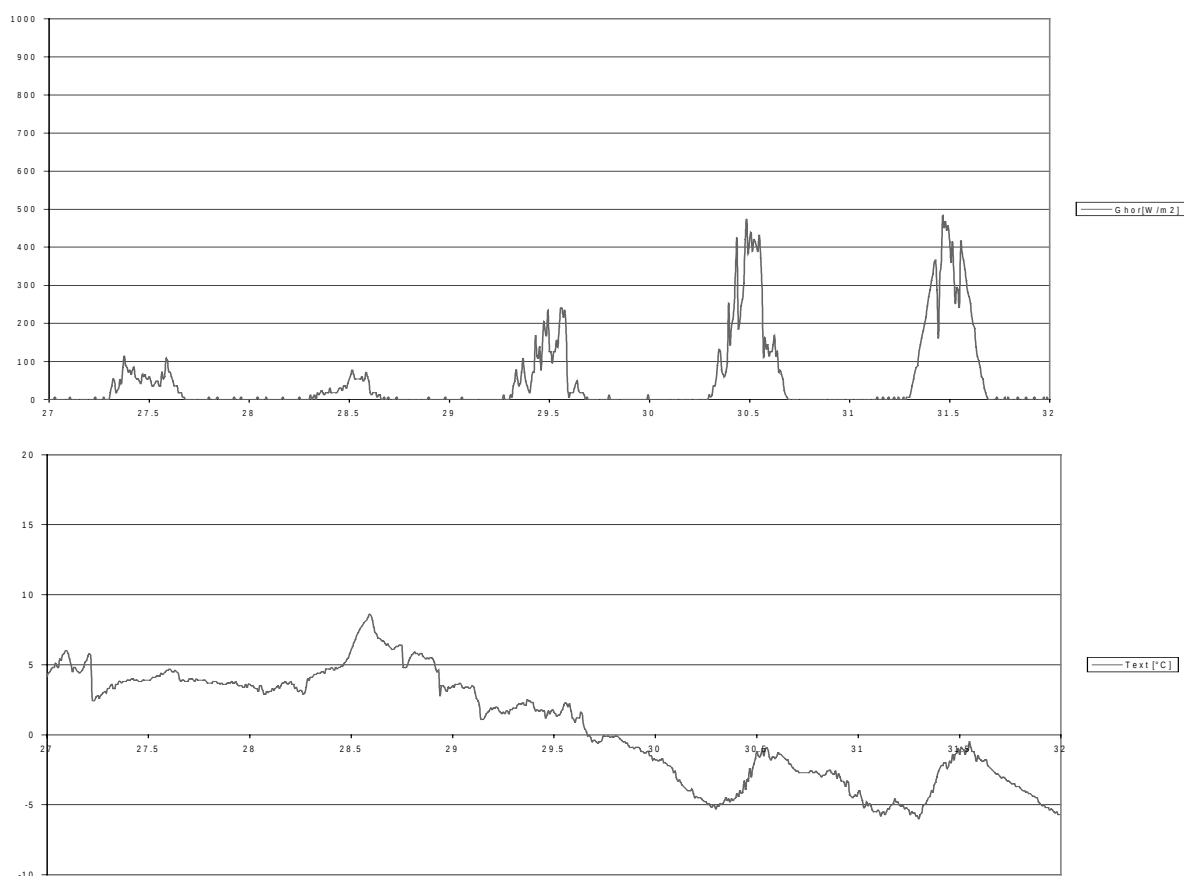
- Diese Methode kann mit Erfolg angewendet werden, falls die Heizanforderungen direkt von der mittleren Aussentemperatur abhängt. Im Falle gewichtiger Fremdwärmebeiträge wie z.B. interner Fremdwärme, oder passiver Solarenergie müssen andere Methoden, wie z.B. die H-m Methode oder die eta-Methode, verwendet werden.
- Es wird angenommen, dass die internen Fremdwärmebeiträge während beider Heizsaisons (98/99 und 99/00) vergleichbar sind).
- Die Präzision des Energievergleiches wird durch die statistische Ungenauigkeit der Energiegrössensteigung bestimmt. Diese wird mit der Anzahl der Punkte auf dem Graphen kleiner (d.h. mit längerer Messperiode) und vergrössert sich mit der Dispersion der Messpunkte (aufgrund der Fremdwärme und der Fluktuation der Raumtemperatur).

Die indirekte Methode der Energiegrössenbestimmung kann für den Fall des Testgebäudes in Basel verwendet werden, da das Gebäude über keine signifikativen Solarenergiebeiträge verfügt und das Benutzerverhalten sich während zweier Heizsaison nicht wesentlich ändern wird. Trotzdem soll an dieser Stelle erwähnt werden, dass die Präzision dieser angewendete Methode nicht jener aus der Phase 1 des NEUROBAT Projektes entspricht. Aufgrund der regelmässigen Kommutierung der beiden Heizregelsysteme (NEUROBAT und moderner, kommerzieller Heizungsregler) während zweier Heizsaisons konnte jeglicher Einfluss von unterschiedlichem Benutzerverhalten oder auch unterschiedliche klimatische Bedingungen eliminiert werden.

5.3 Datenevaluation der Testphase IIA (kommerzieller SAUTER Regler)

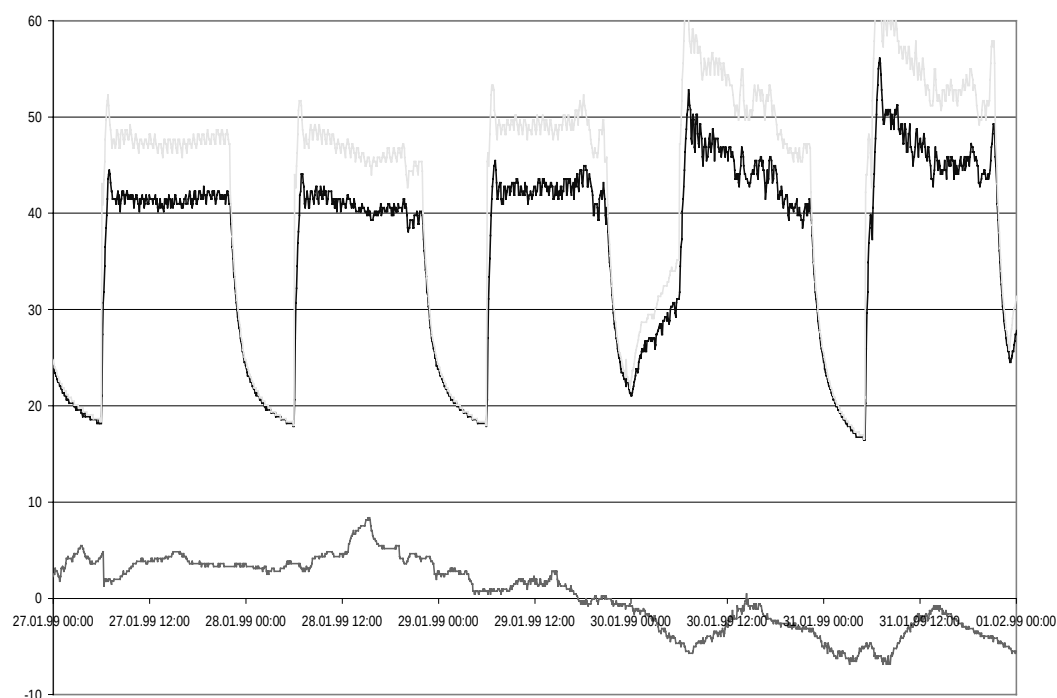
5.3.1 Regelparaxter-Einstellungen und Analyse der Gebäudethermik

Die auf dem Testgebäude in Basel durchgeführten Messungen erlauben, die optimalen Reglerparaxter des modernen, kommerziellen Heizungsreglers zu evaluieren und eine erste Einschätzung der Gebäudethermik zu geben. Hierbei werden die Messdaten des Zeitintervalls von 5 Tagen Ende Januar 1999 gezeigt und Figur 85 zeigt die klimatischen Bedingungen (Aussentemperatur und Sonneneinstrahlung) während dieser Messperiode:



Figur 85: Globale horizontale Sonneneinstrahlung und Aussentemperatur während 5 Tagen, Ende Januar 1999

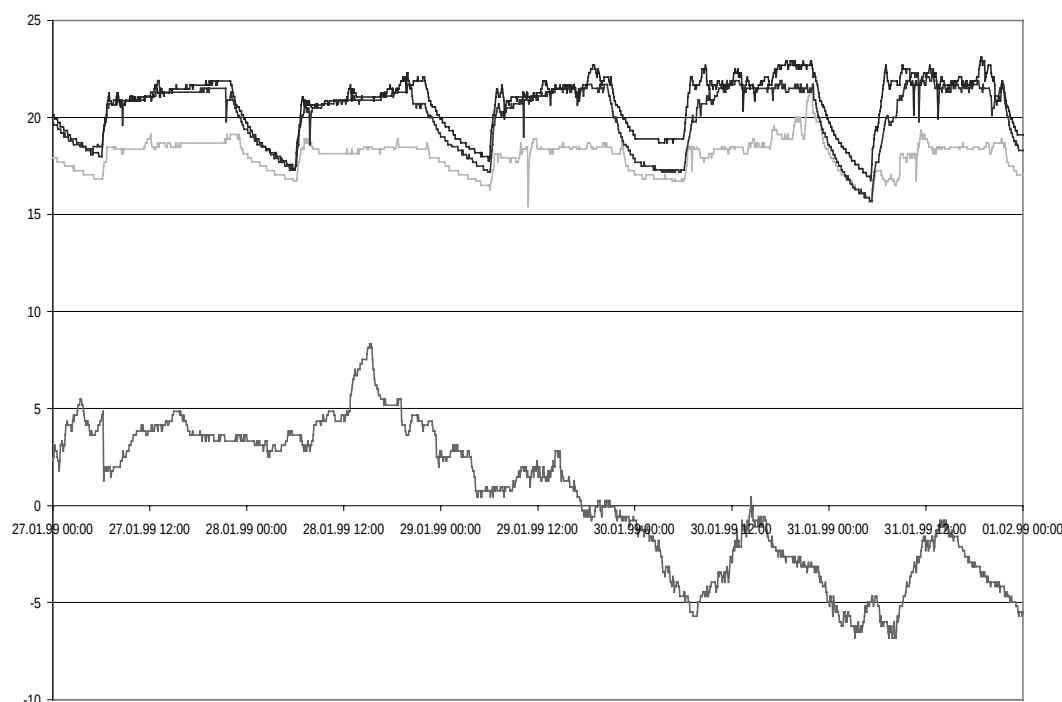
Die Vorlauf- und Rücklauf-temperatur des Heizkreises des Testgebäudes in Basel sind in Figur 86 dargestellt :



Figur 86: Vorlauf- und Rücklaufftemperatur des Heizkreises, sowie die während der Messperiode gemessene Aussentemperatur

- Die steilen Temperaturanstiege und –stürze belegen, dass das Testgebäude in Basel einem 'leichten' Gebäude entspricht, d.h. das thermische Verhalten reagiert mit einer kleinen Zeitkonstanten auf eine Energiezufuhr respektive einen Energieunterbruch.
- Die dem Gebäude zugeführte Heizleistung entspricht dem mittleren Wert der Aussentemperatur und nimmt zu, falls die Aussentemperatur abnimmt (Vergleich der Tage 28 und 30).
- Die Energiezufuhr nimmt mit einem Anstieg der Raumtemperatur ab (Referenz : Raumtemperatur in Figur 87) aufgrund der Kopplung des Regelalgorithmus mit den Messwerten der Raumtemperatursonde (Raumtemperaturaufschaltung).
- Die Periode der Nachtabenkung entspricht dem Intervall zwischen 21h30 und 6h30 mit einer maximalen Antizipationszeit von 1h. Der Parameter der Antizipationszeit wurde vom Benutzer auf 1h fixiert, da der ursprünglich maximale Wert von 3h in eine erhöhte Raumtemperatur zu Beginn der Komfortperiode resultierte.

Die folgende Graphik zeigt die gemessene Raumtemperatur im Wohnzimmer (Parterre) und den Schlafzimmern (1.Stock) des Testgebäudes in Basel:



Figur 87: Raumtemperaturen im Testgebäude in Basel

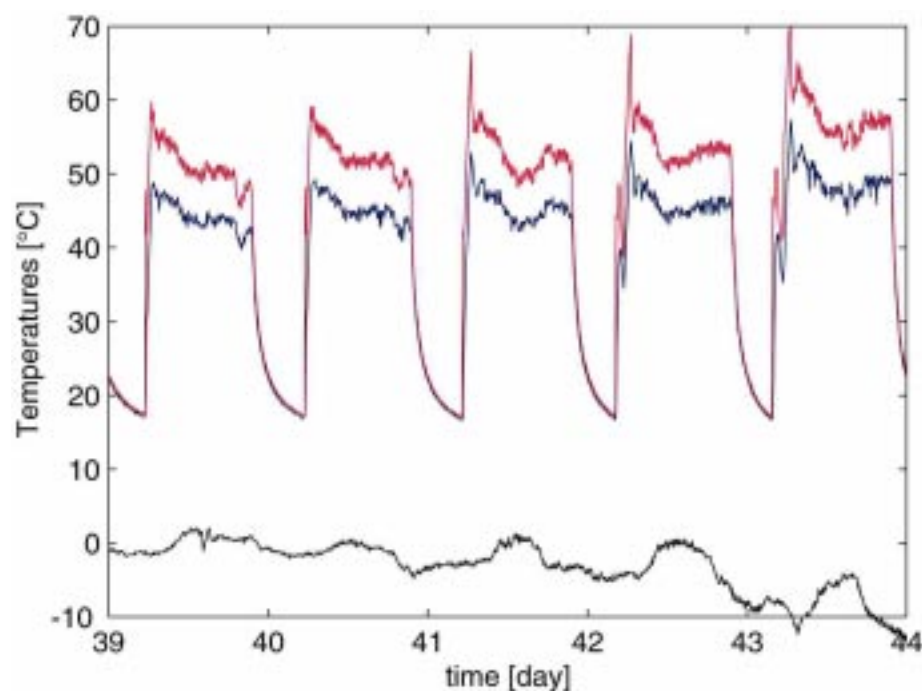
- In den Wohnräumen 1 und 2 (Wohnzimmer und Schlafzimmer Ost) entspricht die Raumtemperatur annähernd der Sollwerttemperatur (21°C) während der Komfortperiode.
- Im Wohnraum 3 (Schlafraum West) liegt die Raumtemperatur 3°C unter der Sollwerttemperatur. Dieser Temperaturunterschied ist auf einen unterschiedlichen Benutzerkomfort zurückzuführen (Thermostatventil).
- Die Sonneneinstrahlung hat einen vernachlässigbaren Einfluss auf die Raumtemperatur des Testgebäudes. Dieses Resultat bestätigt die Feststellung, dass es sich beim Testgebäude in Basel um ein Gebäude mit nicht-signifikanter Solarfremdwärme handelt.

Aufgrund eines erfahrenen Benutzers betreffend Gebäudethermik und Heizungsregler funktioniert kann davon ausgegangen werden, dass die konventionelle Heizungsregelung sehr gut funktioniert und damit eine ideale Vergleichsbasis für den NEUROBAT Heizungsregler darstellt.

5.3.2 Funktionsanalyse während der Winterperiode

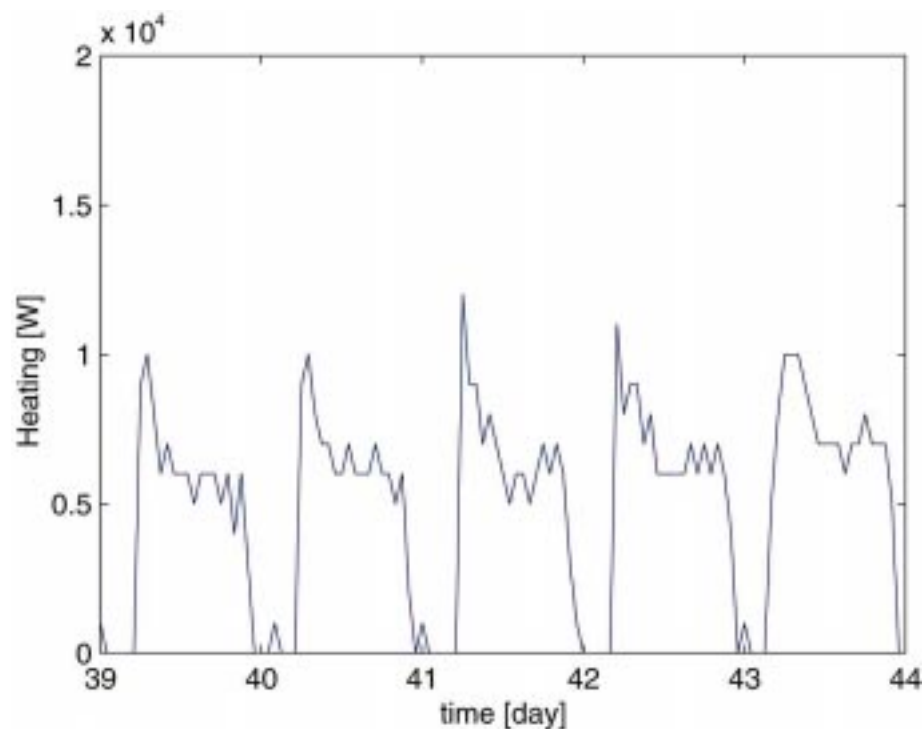
Die hier beschriebene Zeitperiode (vom 8. bis 12. Februar 1999) ist durch einen Temperatursturz der Aussentemperatur charakterisiert (innerhalb von 5 Tagen von 2° C auf -12°C). Figur 88 zeigt die Aussen-, Vorlauf- und Rücklauftemperatur für die beschriebene Zeitperiode.

Figur 89 zeigt, dass die abgegebene Heizleistung mit einer Absenkung der Aussentemperatur zunimmt und in Referenz zur vorprogrammierten Komfortperiode von 6.30 bis 21.30 ist die morgentliche Antizipation gut erkennbar. Die Antizipation erlaubt einen wie in Figur 90 dargestellten optimalen Benutzerkomfort (die gestrichelten Linien kennzeichnen die den Beginn und das Ende der vorprogrammierten Komfortperiode).



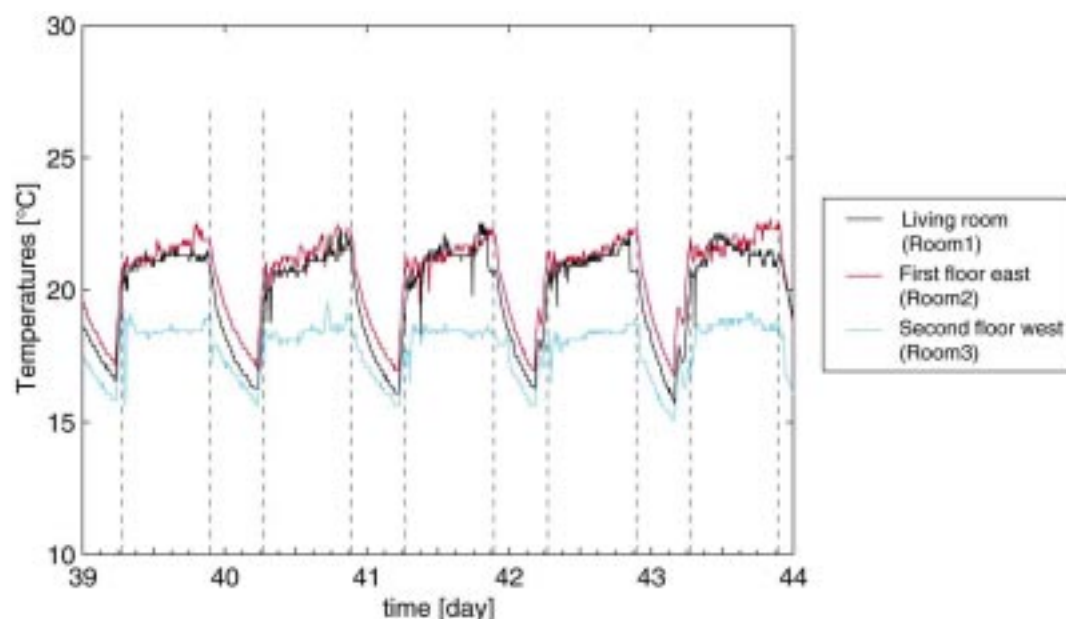
Figur 88: Aussen-, Vorlauf- und Rücklauftemperatur während einer Zeitdauer von 5 Tagen im Monat Februar 1999 (Testgebäude in Basel).

Wie in Figur 90 erkennbar, entspricht in den Wohnräumen 1 und 2 (Wohnzimmer und Schlafzimmer Ost) die Raumtemperatur während der Komfortperiode annähernd der Sollwerttemperatur (21°C). Im Wohnraum 3 (Schlafzimmer West) liegt die gemessene Raumtemperatur 3°C unter der Sollwerttemperatur. Dieser Temperaturunterschied ist auf einen unterschiedlichen Benutzerkomfort zurückzuführen (Thermostatventil).



Figur 89: Abgegebene Heizleistung während einer Zeitdauer von 5 Tagen im Monat Februar 1999 (Testgebäude in Basel).

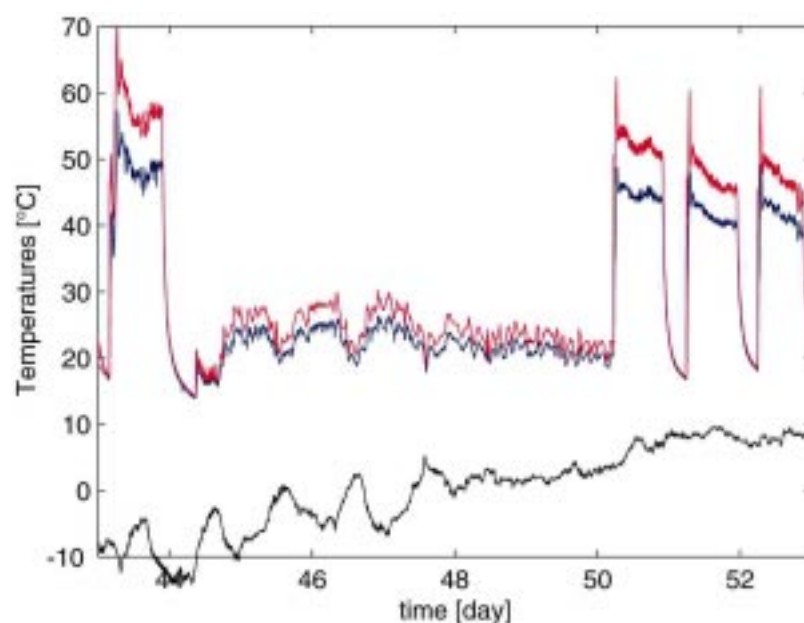
Trotz der auftretenden starken Aussentemperaturschwankung kann die Raumtemperatur während der vorprogrammierten Komfortperiode auf den Sollwert stabilisiert werden. Die Regelung wurde vom Hausbesitzer "manuell" nachgeregelt, wobei eine Komfortperiode von 5:50 bis 21:30 definiert wurde d.h. mit einer 40-minütigen forcierten Heizantizipation. Die maximale Antizipationszeit wurde auf 1 Stunde festgelegt um einen frühzeitigen Heizbeginn zu verhindern. Es soll angeführt werden, dass die beinahe perfekte Regelung der Antizipationsparameter dank Intervention eines Experten, der das thermische Gebäudeverhalten sowie die Reglerfunktion genau kennt, erreicht werden konnte.



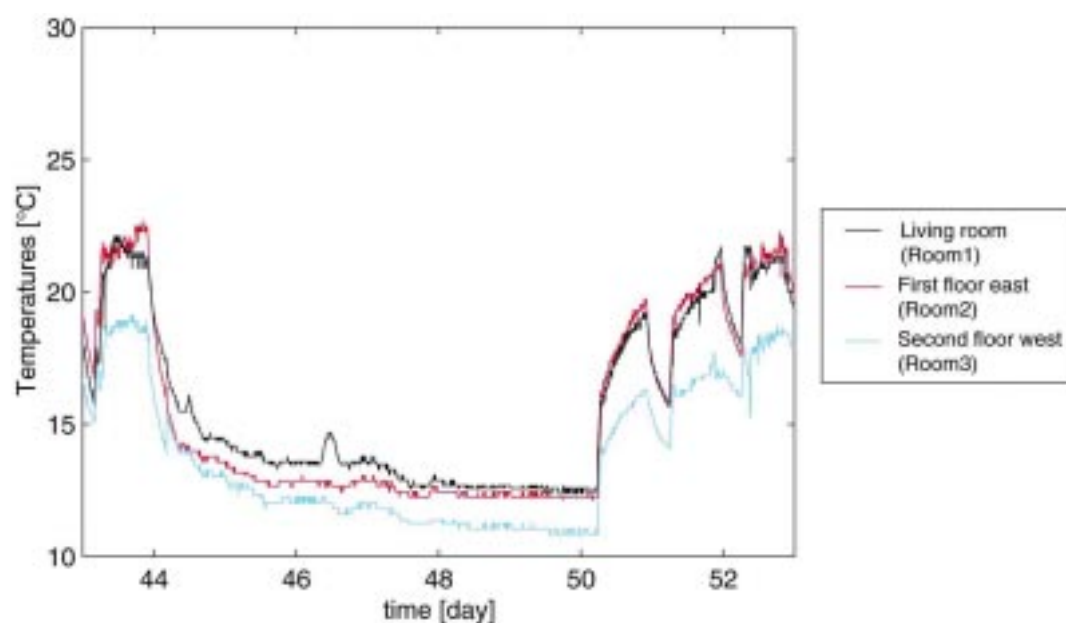
Figur 90: Raumtemperaturen (Wohnzimmer, Schlafzimmer Ost und Schlafzimmer West erster Stock) während einer Zeitdauer von 5 Tagen im Monat Februar 1999 (Testgebäude in Basel).

5.3.3 Funktionsanalyse der Ferienabwesenheit

Während einer Ferienabwesenheit von 6 Tagen wurde eine Heizabsenkung programmiert. Figur 91 zeigt die gemessene Aussen-, Vorlauf- und Rücklauftemperatur, sowie in Figur 92 die während dieser Periode gemessenen Raumtemperaturen.



Figur 91: Aussen-, Vorlauf- und Rücklauftemperatur während einer Zeitdauer von 5 Tagen mit Ferienabwesenheit (Testgebäude in Basel).



Figur 92: Raumtemperaturen (Wohnzimmer, Schlafzimmer Ost und Schlafzimmer West erster Stock) während einer Zeitdauer von 10 Tagen mit Ferienabwesenheit (Testgebäude Basel). Die Absenkhase und Heizphase sind gut erkennbar an den Tagen 44 und 50.

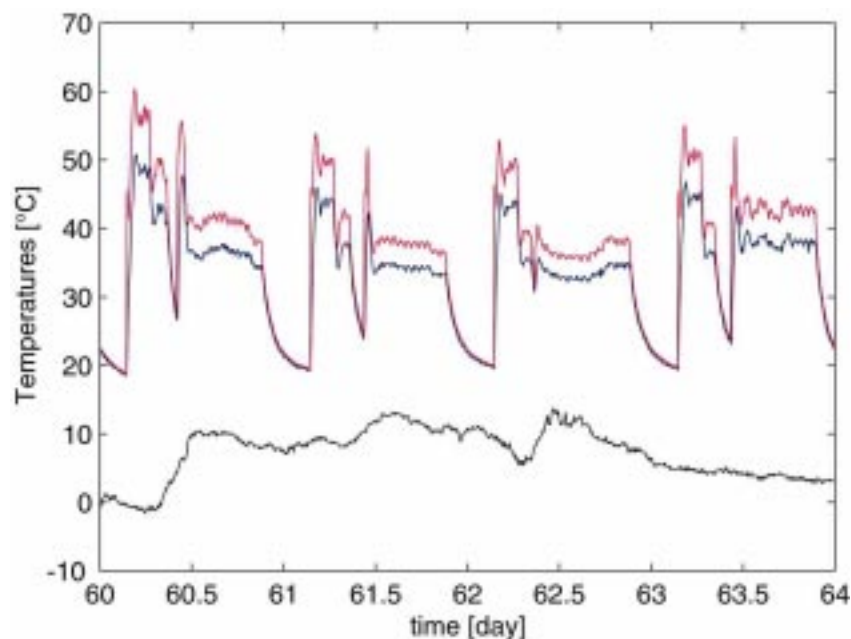
In Figur 92 kann ein ausgeprägter Abfall der Raumtemperatur bis zu 13°C festgestellt werden. Dieser Temperatursturz innerhalb kurzer Zeit weist auf eine leichte Baukonstruktion hin. Der Anstieg der Raumtemperaturen nach der Ferienabwesenheit ist ebenfalls durch eine kleine Zeitkonstanten gekennzeichnet, jedoch wird der Raumtemperatur-Sollwert nicht erreicht. Die durchschnittliche Raumtemperatur am ersten Tag nach der Absenkhase beträgt 17°C und bei Normalbetrieb wird der Raumtemperatur-Sollwert erst nach 3 Tagen erreicht.

Die Regelstrategie der Heizkurven basierend auf der Aussentemperatur (und mit Korrektur mittels der Aufschaltung der aktuellen Raumtemperatur) ist unter den hier präsentierten Bedingungen ungenügend, ein Faktum, das bereits in der Phase I des NEUROBAT Projektes festgestellt werden konnte. Das klassische Regelkonzept von Zentralheizungs-reglern erlaubt nicht, eine markante Differenz der Raumtemperatur zum gewünschten Sollwert innerhalb eines minimalen Zeitintervalls auszugleichen und dies selbst für ein Gebäude leichter Bauweise. Eine Regelstrategie, die schnell und mit maximal verfügbarer Leistung auf eine markante Differenz betreffend des Komfort reagiert, würde unter diesen Bedingungen eine optimale Komfortsituation gewährleisten. Eine Möglichkeit der Optimierung besteht darin, die Absenkung während kurzen Perioden (Abwesenheit von 1 Tag) zu systematisieren, um den Energieverbrauch ohne Komfortverlust zu reduzieren.

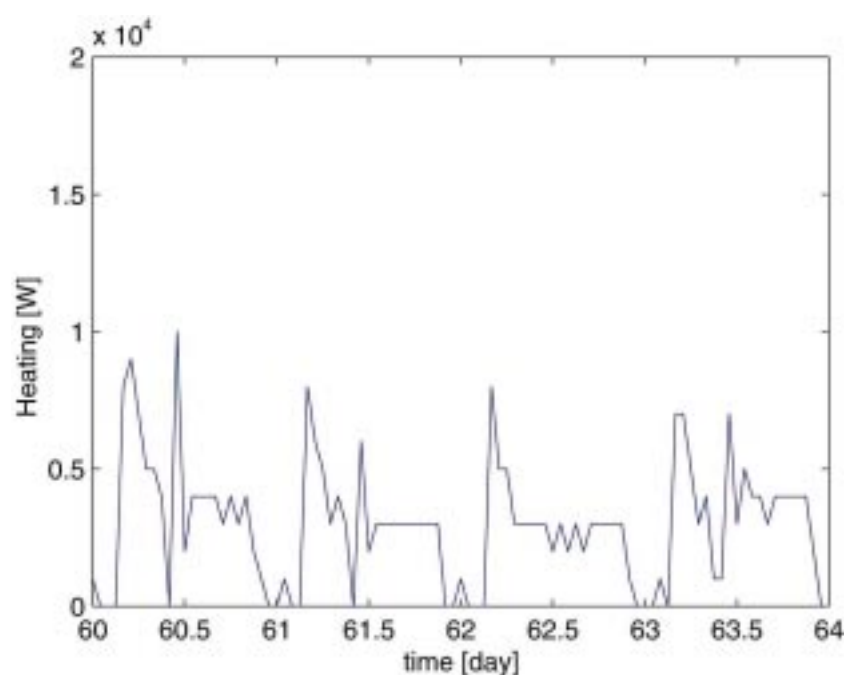
5.3.4 Funktionsanalyse der täglichen Absenkung

Um die Reglerantizipation im Detail zu analysieren, wurde eine morgendliche Reduktion des Raumtemperatur-Sollwertes (von 9:00 bis 11:00) programmiert (siehe Figur 93, Figur 94 und Figur 95). Es kann festgestellt werden, dass sich diese kurzfristige Reduktion für die klassische Regelstrategie der Heizkurven positiv auf die Leistungsdaten auswirkt, da mittels der Fremdwärmezufuhr (Sonneneinstrahlung, Freiwärme etc.) der Komfort während eines kurzen Zeitintervalls stabilisiert werden kann. Damit resultiert eine Antizipation der Fremdwärme und eine Abflachung des Profils der Raumtemperatur für den verbleibenden Tag.

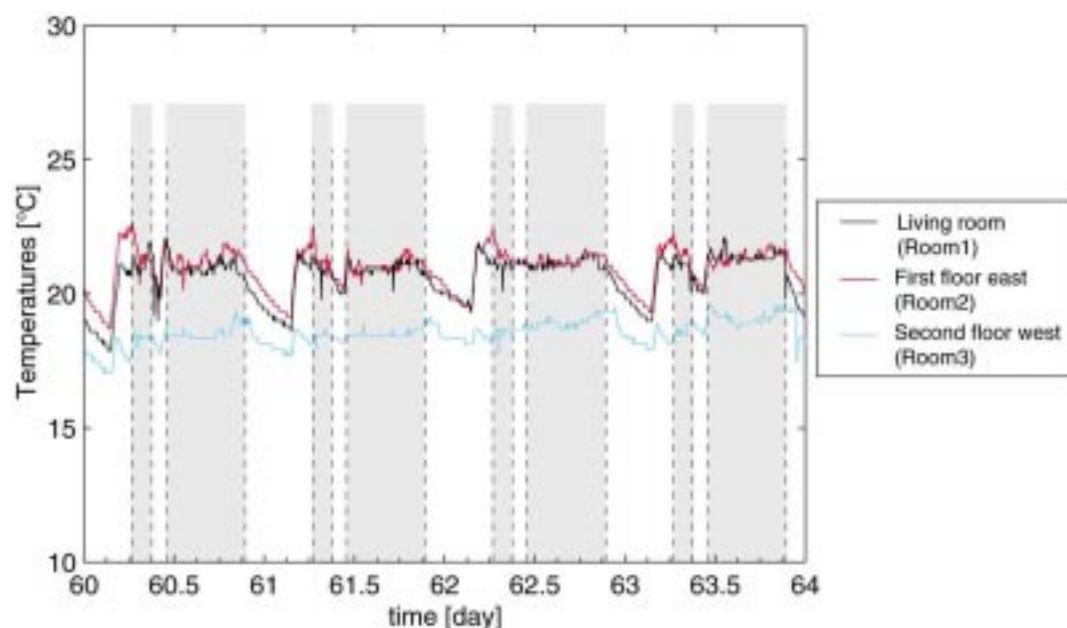
Die Anpassung an das geänderte Schaltzeitprogramm (Reduktion von 9:00 bis 11:00) wird gemäss Figur 93 und Figur 94 korrekt ausgeführt. Die Antizipation von 1 Stunde (Service-Parameter!) entspricht der Wärmeträgheit in diesem Gebäude leichter Bauweise.



Figur 93: Aussen-, Vorlauf- und Rücklauftemperatur während einer Zeitdauer von 4 Tagen mit einer täglichen Absenkung zwischen 9 und 11 Uhr (Testgebäude Basel).



Figur 94: Abgegebene Heizleistung während einer Zeitdauer von 4 Tagen mit täglicher Absenkung von 9 bis 11 Uhr (Testgebäude in Basel).



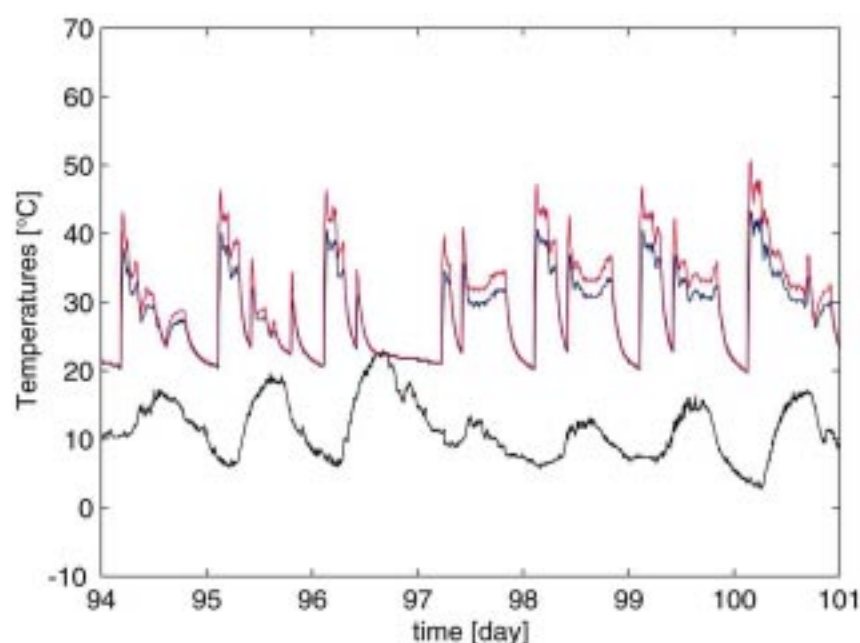
Figur 95: Raumtemperaturen (Wohnzimmer, Schlafzimmer Ost und Schlafzimmer West erster Stock) während einer Zeitdauer von 4 Tagen mit täglicher Absenkung von 9 bis 11 Uhr (Testgebäude Basel). Die Perioden der Benutzerpräsenz sind in Grau gekennzeichnet.

5.3.5 Funktionsanalyse während einer Zwischensaison

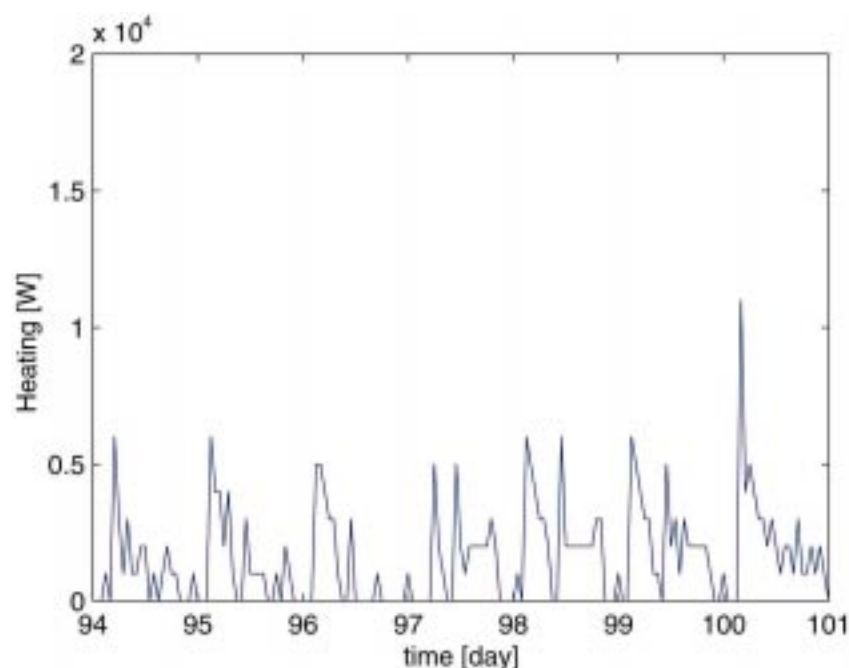
Das hier untersuchte Zeitintervall (vom 4. bis 10. April 1999) wird durch klimatische Bedingungen einer Zwischensaison charakterisiert (schwankende Aussentemperatur zwischen 5°C und 20°C).

In Anbetracht der relativ tiefen frühmorgendlichen Aussentemperaturen ist die Wärmezufuhr zu Beginn einer Komfortperiode signifikant (siehe Figur 96). Daraus resultiert eine Raumtemperatur, welche den erwünschten Sollwert wesentlich überschreitet (bis 24°C gegen Mittag; siehe Figur 97). Es sei an dieser Stelle zu erwähnen, dass ohne die vorprogrammierte tägliche Absenkung von 9:00 bis 11:00 und mit einem Gebäude, das nennenswerten Sonnenenergiegewinnen unterworfen wäre, die Ueberschreitung des Raumtemperatur-Sollwertes noch signifikanter ausfallen würde, mit dem Resultat eines wärmetechnischen Diskomforts. Eine Verbesserung der hier vorliegenden Leistungsdaten wurde zudem erreicht, indem der Raumtemperatur-Sollwert von 21°C auf 20.8°C reduziert wurde und die Amplitude der Leistungszufuhr während der Periode der Antizipation verkleinert wurde (manuelle Regelung seitens des Benutzers mittels Service-Parametern).

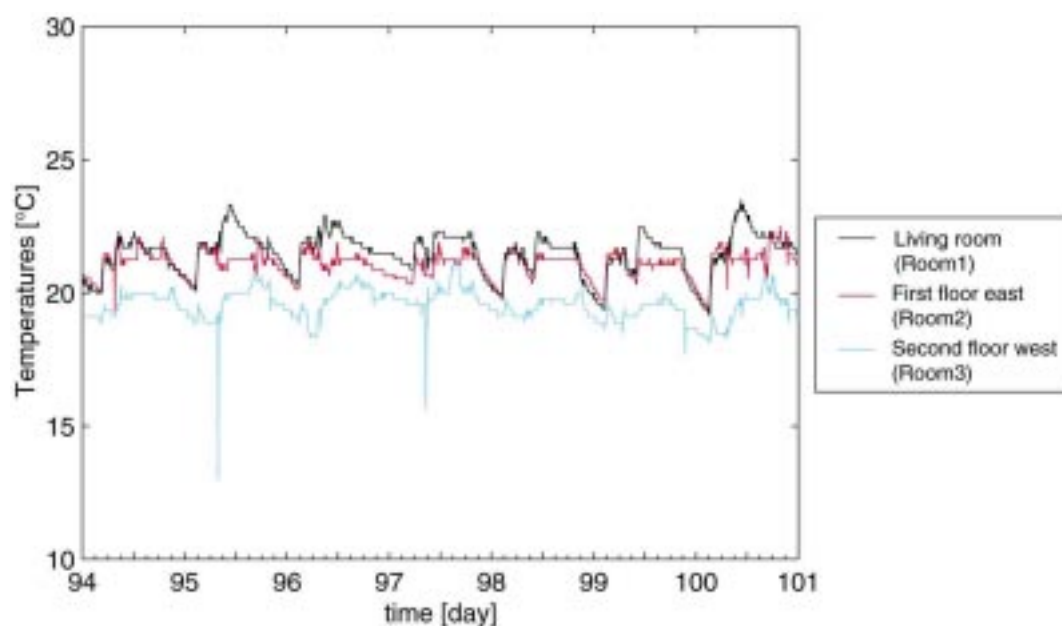
Die Funktionsanalyse der Zwischensaison lässt schliessen, dass eine verbesserte Antizipation der Fremdwärme den Energieverbrauch, relativ betrachtet, signifikant vermindern würde und dies mittels eines verbesserten Komforts (Reduktion der Ueberheizperioden).



Figur 96: Aussen-, Vorlauf- und Rücklaufftemperatur in der Zwischensaison (Monat April) während einer Zeitdauer von einer Woche mit täglicher Absenkung von 9 bis 11 Uhr (Testgebäude Basel).



Figur 97: Abgegebene Heizleistung in der Zwischensaison (Monat April) während einer Zeitdauer von einer Woche mit täglicher Absenkung von 9 bis 11 Uhr (Testgebäude in Basel).

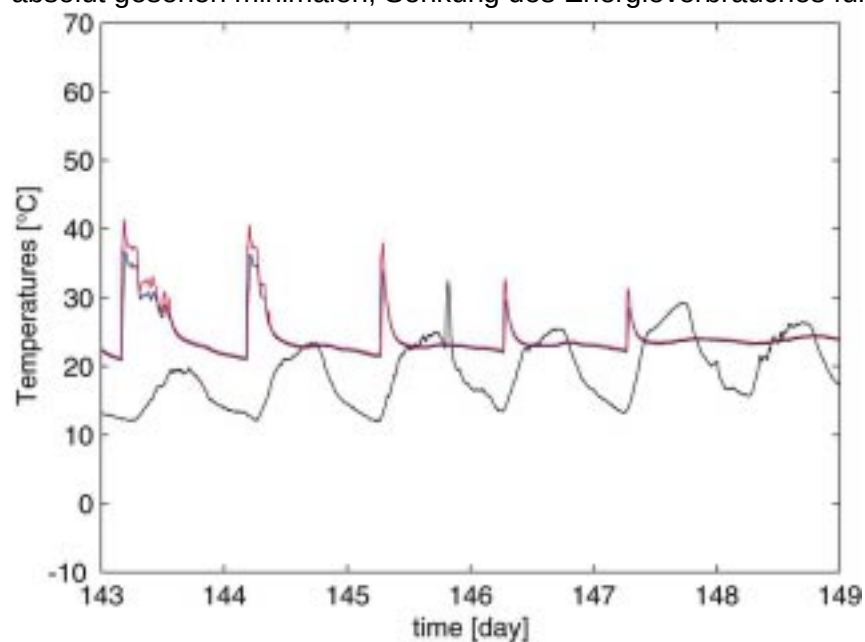


Figur 98: Raumtemperaturen (Wohnzimmer, Schlafzimmer Ost und Schlafzimmer West erster Stock) in der Zwischensaison (Monat April) während einer Zeitdauer von einer Woche mit täglicher Absenkung von 9 bis 11 Uhr (Testgebäude Basel).

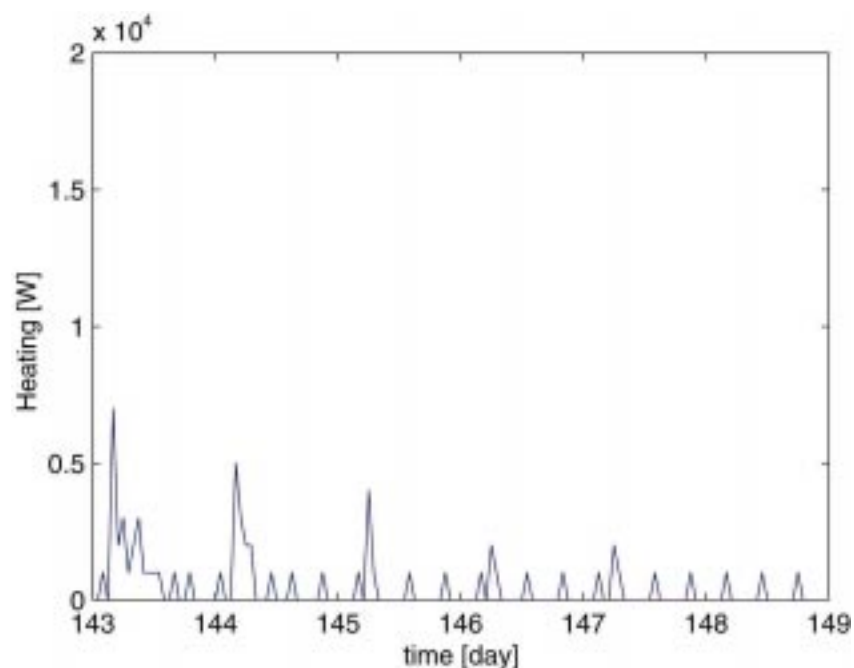
5.3.6 Funktionsanalyse gegen Ende der Heizsaison

Das hier analysierte Zeitintervall (vom 22. bis 27. Mai 1999) wird durch klimatische Bedingungen gegen Ende der Heizperiode charakterisiert (schwankende Aussentemperatur von 5°C bis 20°C). Kleinere Mengen der Wärmezufuhr sind morgens zu Beginn der Komfortperiode zu beobachten (siehe Figur 99). Diese Energiezufuhren sind nutzlos und tragen zu einer Ueberschreitung des Raumtemperatur-Sollwertes während des Nachmittags

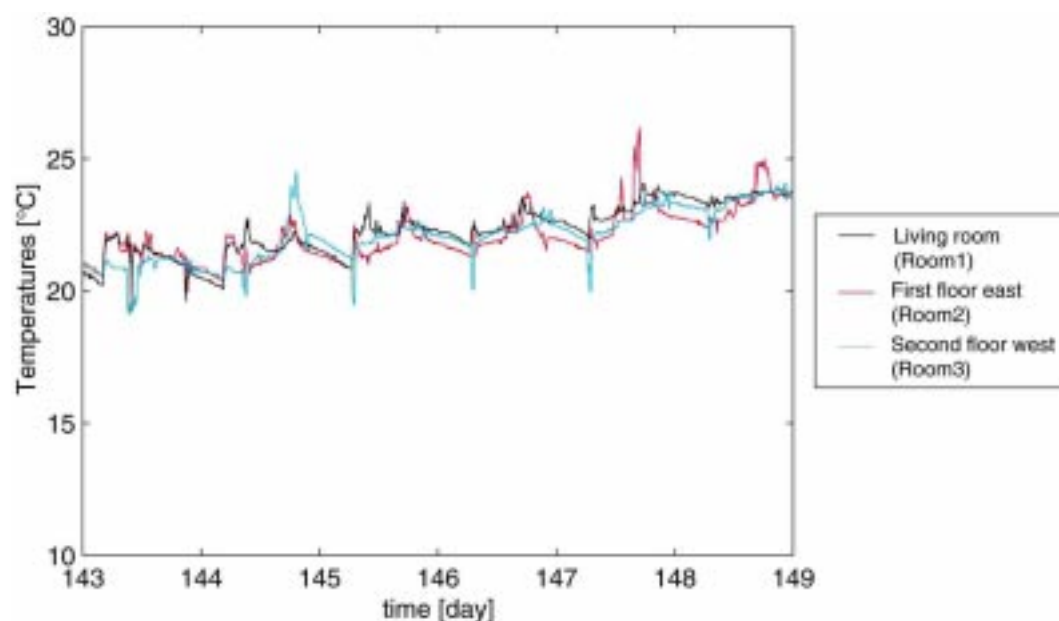
bei. Eine verbesserte Antizipation der Fremdwärme würde auch hier zu einer, wenn auch absolut gesehen minimalen, Senkung des Energieverbrauches führen.



Figur 99: Aussen, Vorlauf- und Rücklaufftemperatur gegen Ende der Heizsaison (Monat Mai) während einer Zeitdauer von 6 Tagen mit täglicher Absenkung von 9 bis 11 Uhr (Testgebäude Basel).



Figur 100: Abgegebene Heizleistung gegen Ende der Heizsaison (Monat Mai) während einer Zeitdauer von 6 Tagen mit täglicher Absenkung von 9 bis 11 Uhr (Testgebäude in Basel).



Figur 101: Raumtemperaturen (Wohnzimmer, Schlafzimmer Ost und Schlafzimmer West erster Stock) gegen Ende der Heizsaison (Monat Mai) während einer Zeitdauer von 6 Tagen mit täglicher Absenkung von 9 bis 11 Uhr (Testgebäude Basel).

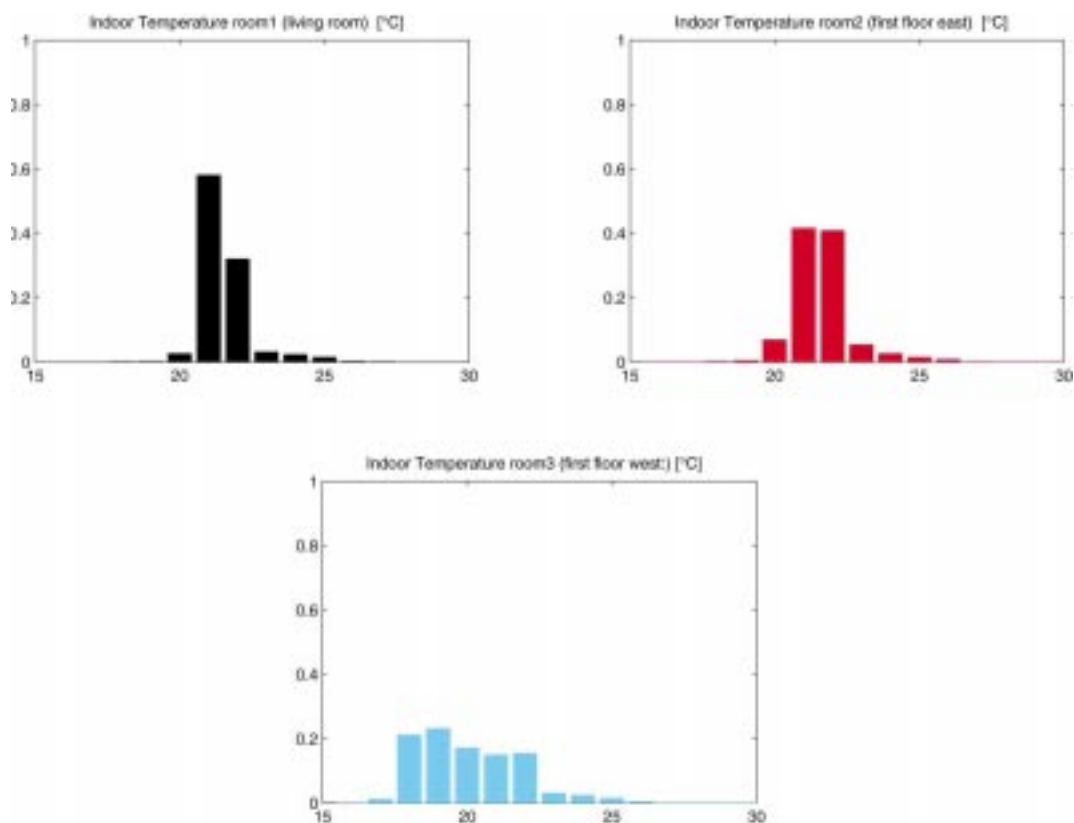
5.3.7 Leistungsbilanz des kommerziellen SAUTER Reglers (QRK 151)

Die Messungen wurden über die Gesamtheit der Heizsaison 98/99 analysiert (Beginn der Messungen: 23. Dezember 1998; Ende der Messungen: 20. Juni 1999). Im folgenden sollen einige Statistiken betreffend Klima, Energieverbrauch und charakteristische Interpolation des Gebäudes aufgelistet werden:

	Gebäude	Wohn- zimmer	Schlafräum Ost	Schlafräum West
Anzahl Messtage [-]	162.7			
Abgegebene Energie [MJ]	33834			
Durchschnittliche tägliche Heizleistung [W]	2407			
Durchschnittliche Aussen- temperatur [°C]	9.2			
Horizontale Sonnen- einstrahlung [MJ/m ²]				
Thermischer Transfer- Koeffizient des Gebäudes [W/K]	238 ±3			
Durchschnittliche Aussen- temperatur ausserhalb der Heizperioden [°C]	19±0.5			
Durchschnittliche Raumtemp. während der vorprogrammierten Komfortperiode [°C]		21.55	21.57	20.10
Durchschnittliche Raumtemperatur [°C]		21.13	21.03	19.83

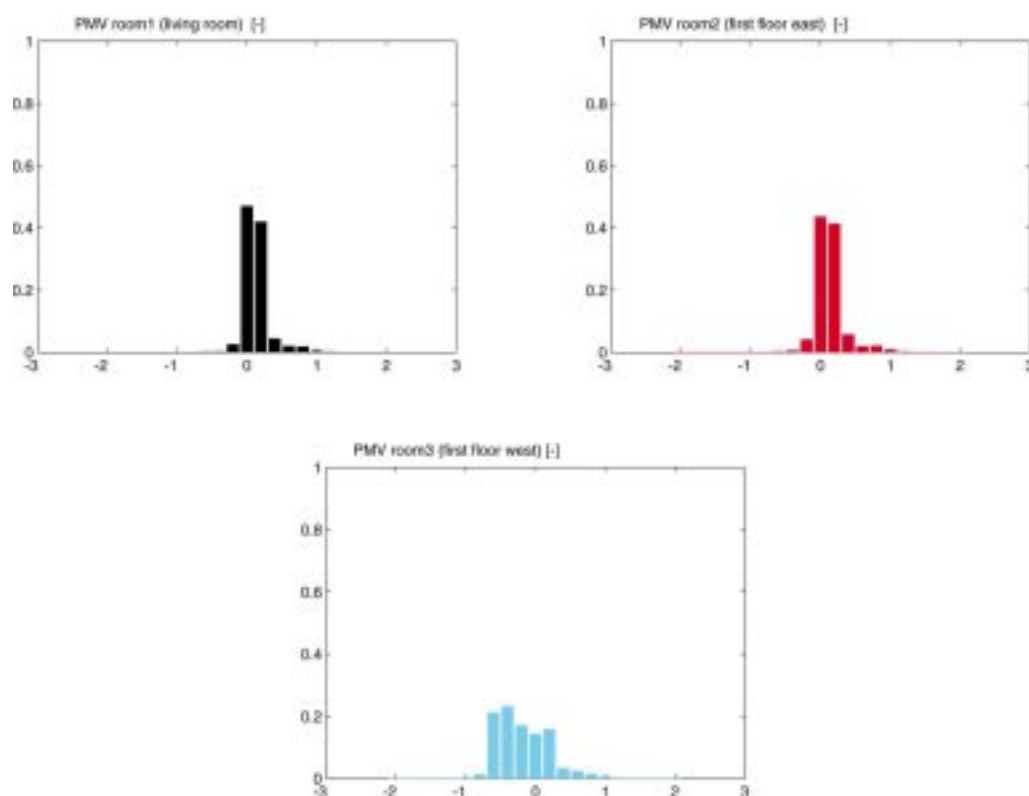
Tabelle 28: Leistungsbilanz-Statistiken des kommerziellen SAUTER-Reglers während der Heizsaison 98/99

Figur 102 zeigt das Histogramm der gemessenen Raumtemperaturen während der Komfortperiode für die verschiedenen Messorte (Wohnzimmer, Schlafraum Ost, Schlafraum West). Ausser in Raum 3 (Schlafraum West), in welchem das Thermostatventil annähernd geschlossen ist, zeigt sich eine um die 21-22°C zentrierte Verteilung.



Figur 102: Histogramm der Raumtemperaturen während einer Heizsaison und während der Komfortperiode (Präsenz des Benutzers) mit der gemessenen Raumtemperatur im Wohnzimmer (Graph links oben), im ersten Stock Ost (Graph rechts oben) und im ersten Stock West (Graph unten).

Dies resultiert in einen Komfortfaktor (PMV: Predictive Mean Vote; siehe Theorie Fanger) der um den optimalen Wert 0 (Sollwert) zentriert ist (siehe Figur 103). Die Histogramme der Raumtemperaturen während der Komfortperiode und des Komfortfaktors entsprechen sich.



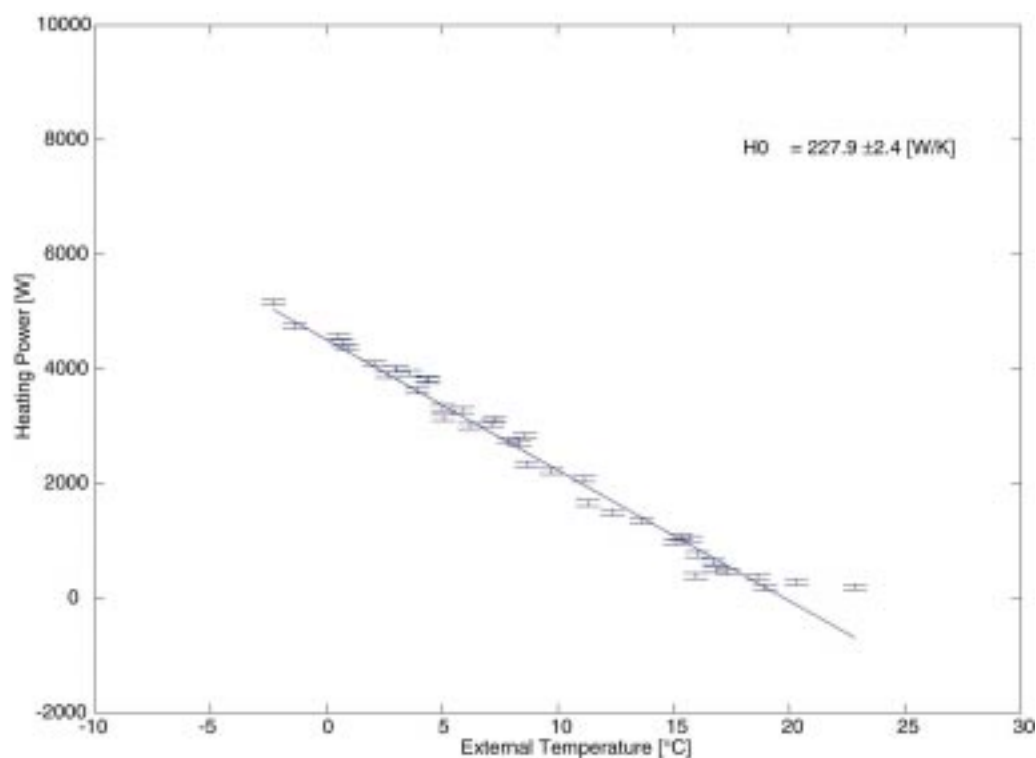
Figur 103: Histogramm des Komfortfaktors (PMV: Predicted Mean Vote) während einer Heizsaison und während der Komforperiode (Präsenz des Benutzers) für Wohnzimmer (Graph links oben), erster Stock Ost (Graph rechts oben) und erster Stock West (Graph unten).. Ein PMV-Wert von 0 entspricht dem optimalen Komfort, ein PMV-Wert von +0.5 einer leichten Ueberheizung und ein PMV-Wert von -0.5 einer leichten Unterkühlung.

Figur 104 zeigt den Energieverbrauch während einer Heizsaison mittels einer geradlinigen Charakteristik. Dabei wird die Heizleistung in Abhängigkeit der Aussentemperatur gesetzt und über einen Zeitraum von 4 Tagen integriert. (Punkte in der Graphik entsprechen einem 4-Tage-Integrationsraum).

Die erhaltene Korrelation ist sehr gut, was beweist, dass für dieses Gebäude die Aussentemperatur den Energieverbrauch bestimmt und der Einfluss der Sonnenzufuhr vernachlässigbar ist.

Bei einer erhöhten durchschnittlichen Aussentemperaturen um die 20°C, kann eine Abflachung und ein Verlust der Korrelation festgestellt werden. Dies entspricht einer Reduktion der gelieferten Heizenergie gegen das Saisonende hin. Eine ideale Heizungsregelung sollte in dieser Zone die Wärmezufuhr unterdrücken.

Unter Nichtberücksichtigung der Aussentemperaturwerte um die 20°C ergibt der interpolierte Wert für eine gelieferten Leistung von 0 [W] (Schnittpunkt der Geraden für $y=0$) den Aussentemperaturwert ausserhalb der Heizperioden von 19°C. Dieser Wert ist im Vergleich zu anderen Gebäuden sehr hoch und bestätigt den sehr geringen Beitrag der Fremdwärme.



Figur 104: Energetische Effizienz (Heizleistung in Funktion der Aussentemperatur) mit einem Integrationsintervall von 4 Tagen: SAUTER Regler (Equitherm QRK150), Heizsaison 98/99.

5.3.8 Schlussfolgerung Testphase IIA

Während der Heizsaison 98/99 wurde der kommerzielle SAUTER Heizungsregler (QRK 150) auf einem Wohngebäude in Basel ausgewertet und analysiert.

Während der Wintersaison ist die Antizipation der Komfortperioden sowie die Regelung der Raumtemperatur auf den Sollwert beinahe perfekt. Dies erklärt sich durch eine vernachlässigbare Trägheit des Gebäudes und einem minimalen Fremdwärmepotential (insbesondere der Sonneneinstrahlungswärme). Eine Antizipation der Fremdwärme wurde durch eine Reduktion der Wärmezufuhr zwischen 9:00 bis 11:00 erreicht (manuelles Schaltzeitprogramm), was den thermischen Komfort und den Energieverbrauch verbesserte.

Eine verbesserte Antizipation der Fremdwärme während den Zwischensaisons konnte festgestellt werden, wobei dabei der Energieverbrauch reduziert und der Komfort verbessert werden könnte.

Es muss an dieser Stelle nochmals erwähnt werden, dass die Regelparameter des kommerziellen Heizungsreglers manuell durch einen Experten geändert wurden, der die Funktionalitäten des Reglers und das thermische Verhalten des Gebäudes bestens kennt. Diese Bedingungen und die erhaltenen Vergleichsresultate entsprechen daher einer idealen Vergleichsbasis des NEUROBAT Reglers, jedoch wird ein entsprechendes Einstellniveau in der Praxis nie erreicht.

Der Spielraum einer Leistungsprogression, welche an den Heizungsregler gebunden ist, ist in diesem Gebäude sehr gering. Für die Heizsaison 1999-2000 werden vom NEUROBAT-Regler vergleichbare Resultate erwartet, die jedoch ohne Intervention eines Experten resultieren. Zudem ist eine wesentliche Verbesserung der Leistungsdaten während den Zwischensaisons (Herbst, Frühling) zu erwarten.

5.4 Datenevaluation der Testphase IIB (NEUROBAT Heizungsregler)

5.4.1 NEUROBAT-S/W Versionenübersicht

Wie bereits einführend erwähnt, wurden während den Betriebstests des NEUROBAT Prototypen auf dem Testgebäude in Basel verschiedene Änderungen vorgenommen, welche einen kontinuierlichen Betrieb des NEUROBAT Prototypen verunmöglichte. Bevor die Testdaten im Detail analysiert werden, soll im folgenden eine Übersicht der verschiedenen NEUROBAT S/W Versionen gegeben werden, wobei die wesentlichen Änderungen, sowie das Datum der Installation auf dem Testgebäude in Basel angegeben werden sollen:

Version 00:

Änderung: Inbetriebnahme des NEUROBAT-Prototypen

Inbetriebnahme-Datum: 12.Okt.1999

Version 01:

Änderung: Im Falle, dass die berechnete Heizleistung gleich Null ist, wird der Sollwert der Vorlauftemperatur ebenfalls auf Null gesetzt (Schliessen des Mischventils!)

Inbetriebnahme-Datum: 15.Okt.1999

Version 02:

Änderung: Inbetriebnahme des externen Fehlererkennungssystems (PCQRK)

Inbetriebnahme-Datum: 29.Okt.1999

Version 03:

Änderung: Implementation des neuen Gebäudemodells, Schreiben der Regelparameter auf das externe EEPROM

Inbetriebnahme-Datum: 14.Dez.1999

Version 04:

Änderung: Adaptation des Gebäudemodells korrekt aktiviert

Inbetriebnahme-Datum: 07.Jan.2000

Version 05:

Änderung: Korrektur der Normalisierungsfaktoren der Lerndaten. Erhöhung der Diskretisierung des dynamischen Programmieralgorithmus

Inbetriebnahme-Datum: 08.Feb.2000

Version 06:

Änderung: Übergang von Floating-Point zu Fixed-Point Berechnungen

Inbetriebnahme-Datum: 17.Feb.2000

Version 07:

Änderung: Erhöhung der Diskretisierung des Leistungsvektors. Re-Installation der Fixed-Point Berechnungen

Inbetriebnahme-Datum: 25.Feb.2000

Version 08:

Aenderung: Uebergang von Floating-Point zu Fixed-Point Berechnungen (Korrektur verschiedener Transformationsfehler)

Inbetriebnahme-Datum: Nicht installiert – getestet auf Gebäudesimulation (14.März 2000).

Version 09:

Aenderung: Re-Design der NEUROBAT SW

Inbetriebnahme-Datum: Nicht installiert – getestet auf SAUTER Gebäudesimulation (19.April 2000).

5.4.2 NEUROBAT Evaluationsmethoden

Während der Heizsaison 99/00 wurden auf dem Test-Wohngebäude in Basel der NEUROBAT-Prototyp betrieben. Die während der Heizsaison 98/99 mit dem kommerziellen Heizungsregler durchgeführten Messungen dienen dabei als Betriebsreferenz.

Die hier vorliegende Datenevaluation umfasst dabei zwei Evaluationsmethoden:

Funktionsanalyse des Heizungsregelbetriebes. Dabei werden die Betriebsfunktionen des Heizungsreglers während charakteristischen Heizperioden (im Durchschnitt 4 Tage bis 9 Tage) im Detail analysiert. Diese Evaluationsmethode ermöglicht die Funktionsmuster des Heizungsreglers unter bestimmten Bedingungen zu analysieren, wie z.B.:

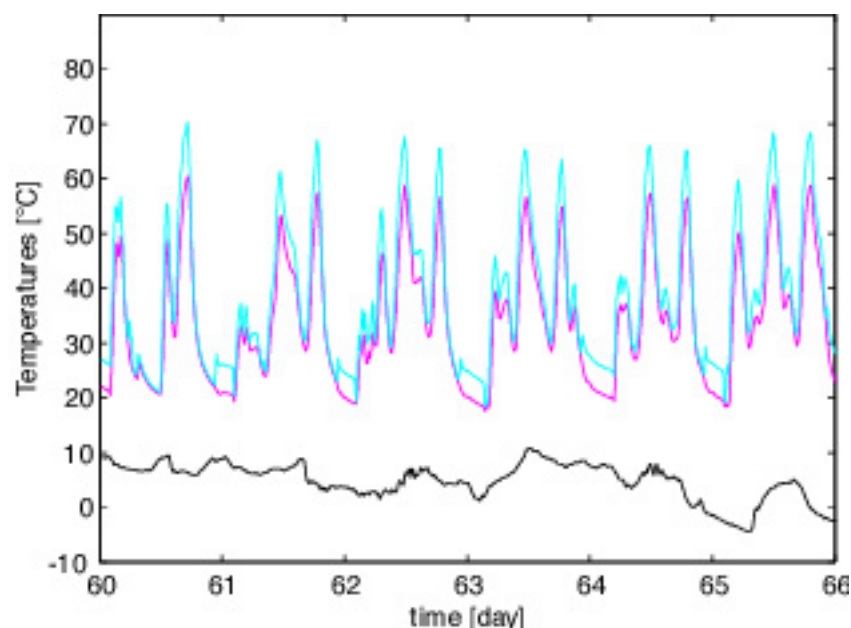
- Inbetriebnahme des Heizungsreglers
- direkter Betriebsvergleich NEUROBAT versus kommerzieller Heizungsregler
- Betrieb während Heizperioden in der Zwischensaison (Herbst, Frühling) und im Winter
- variable Belegungszeiten wie z.B. Ferienabwesenheiten der Benutzer, Nachtabsenkungen während des Tages etc.

Leistungsanalyse des Heizungsregelbetriebes. Die Analyse der Testdaten über die gesamte Dauer der Heizsaison ermöglicht die Evaluation:

- des Benutzerkomfort
- des Energieverbrauches
- die Charakterisierung des Energieverbrauches in Abhängigkeit externer Parameter (Energiekennlinie)

5.4.3 Funktionsanalyse der Inbetriebnahmeprozedur

Die hier beschriebene Heizperiode (vom 29.Februar bis 6.März 2000) ist durch eine starke Fluktuation der Aussentemperatur charakterisiert (Abfall der Aussentemperatur von 10°C auf -5°C innerhalb von 6 Tagen). Diese Heizperiode entspricht einem Test der NEUROBAT-Inbetriebnahme. Der Sollwert der Raumtemperatur wurde auf 21°C fixiert, wobei unter Berücksichtigung der physiologischen Temperaturempfindung eine Sinusschwingung von $\pm 0.5^\circ\text{C}$ überlagert wurde (morgens mit einer Reduktion des Raumtemperatursollwertes und abends mit einer Erhöhung des Raumtemperatursollwertes). Zu Beginn der beschriebenen Heizperiode wurde eine Initialisierung des NEUROBAT-Prototypen vorgenommen, wobei keine Lernbeispiele des Gebäude- respektive Klimamodelles im Datenspeicher gespeichert sind. Figur 105 zeigt die Aussentemperatur, die Vorlauf- und Rücklauf-temperatur während der Heizperiode der NEUROBAT-Inbetriebnahme.

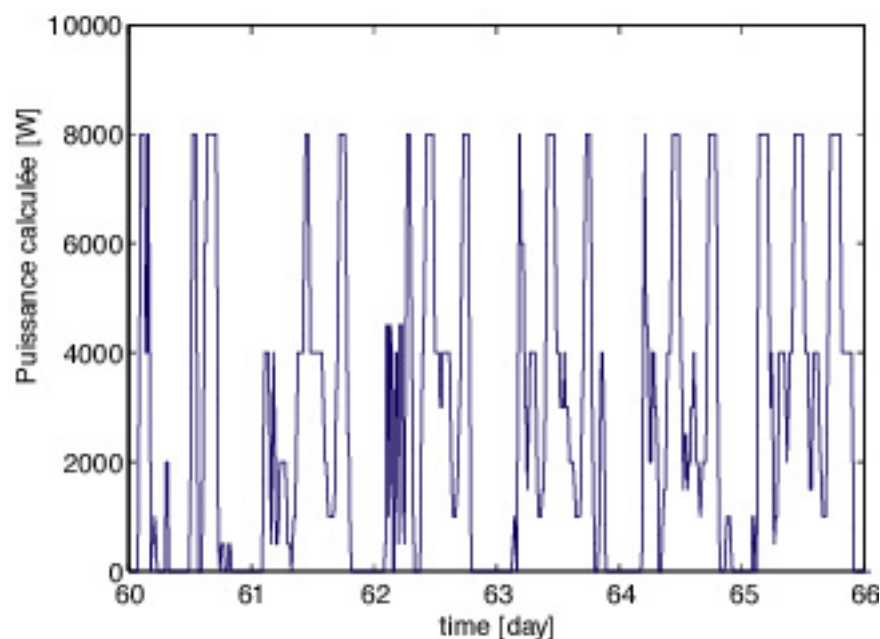


Figur 105: Aussen-, Vorlauf- und Rücklauftemperatur während einer NEUROBAT-Inbetriebnahme

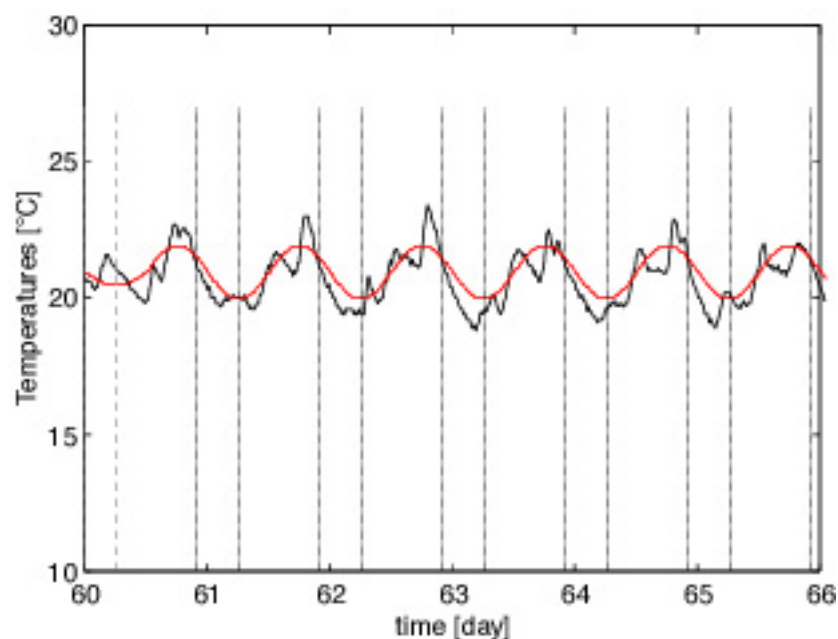
Figur 106 zeigt, dass die an das Gebäude gelieferte Heizenergie im Verlauf eines Tages stark variiert. In Figur 106 ist die morgendliche Heizenergie-Antizipation klar erkennbar, wobei während den ersten Tagen diese Antizipation zu früh einsetzt (die Heizung wird bereits 5 Stunden vor der Komfortperiode eingeschaltet, was dem maximal antizipierenden Stundenwert entspricht).

Bereits am ersten Tag der Inbetriebnahme kann ohne die Intervention eines Experten (die Besetzungszeiten wurden manuell nicht von adaptiert) von einem zufriedenstellenden Betrieb gesprochen werden, da der Raumsollwert während den Komfortperioden (von 6h30 bis 22h) respektiert wird (siehe Figur 107). Aufgrund der wenigen Lernbeispiele, welche bereits nach 24 Stunden zur Adaptation des Gebäudemodells verwendet werden, ist bereits nach wenigen Tagen eine Betriebsoptimierung feststellbar, da trotz des markanten Aussentemperatur-abfalles, der Raumsollwert gehalten wird.

Zudem ist eine Ueberhöhung der Schätzwerte der Sonneneinstrahlung feststellbar, welche für den Abfall der gemessenen Raumtemperatur um die Mittagszeit verantwortlich ist.



Figur 106: Gelieferte Heizenergie während der NEUROBAT-Inbetriebnahme

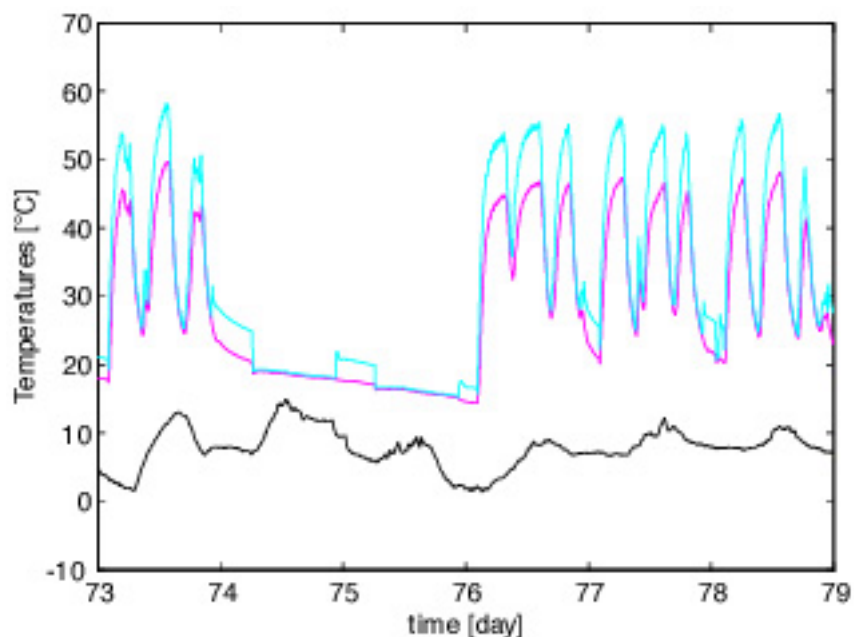


Figur 107: Gemessene Raumtemperatur (Wohnzimmer – Referenzsonde) und Raumsollwert während der NEUROBAT-Inbetriebnahme

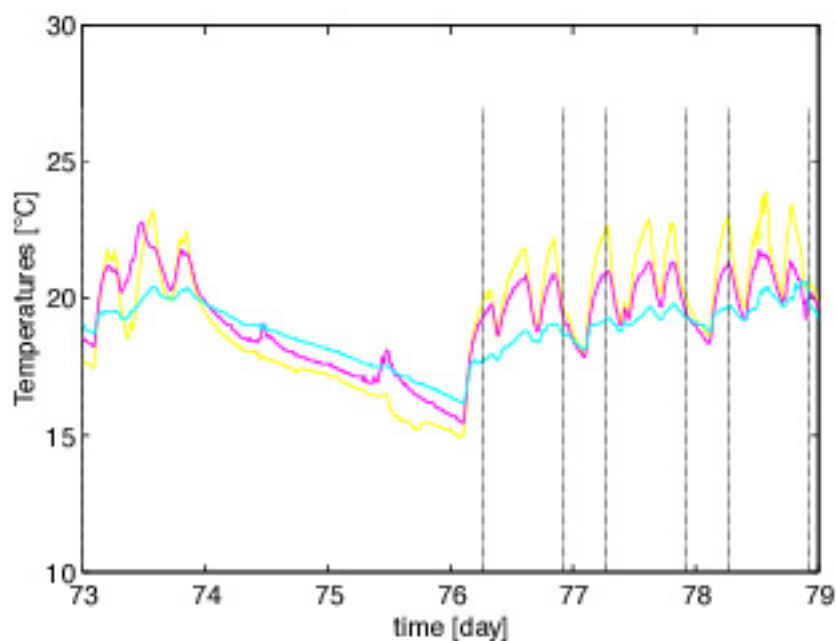
5.4.4 Funktionsanalyse bei Abwesenheit

Während einer Ferienabwesenheit der Benutzer wurde über einige wenige Tage eine Nachtabsenkung im NEUROBAT Heizungsregler definiert. Die [Figur 108](#) und [Figur 109](#) zeigen die während der Ferienabwesenheit gemessenen Aussen-, Vorlauf-, Rücklauf- und Raumtemperaturen.

Die Graphiken zeigen nach Beginn der Ferienabwesenheit einen raschen und markanten Abfall der Raumtemperaturen bis auf 15°C. Das Ende der Ferienabwesenheit ist ebenfalls durch kurze Zeitkonstanten charakterisiert und ein rascher Raumtemperaturanstieg kann festgestellt werden, wobei bereits am ersten Tag der Raumsollwert erreicht wird. Es sei an dieser Stelle erinnert, dass konventionelle Heizungsregler, basierend auf dem Konzept der Heizkurven, nach einem längeren Komfortunterbruch Mühe bekunden, die geforderte Raumtemperatur einzuhalten.



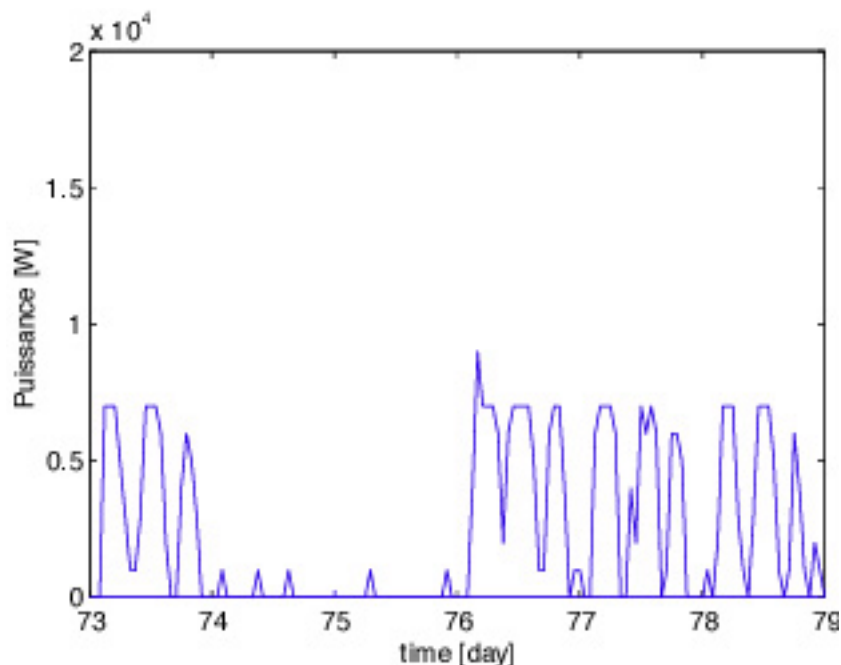
Figur 108: Aussen-, Vorlauf- und Rücklauftemperatur während einer Abwesenheitsperiode



Figur 109: Gemessene Raumtemperaturen während einer Abwesenheitsperiode in [°C] (Wohnzimmer, Schlafraum Ost und Schlafraum West im 1.Stock)

Der NEUROBAT Heizungsregler erlaubt aufgrund des Prädiktionskonzeptes eine konstante grössere Heizleistung über einen längeren Zeitraum dem Gebäude zuzuführen (maximal dem Prädiktionshorizont, in diesem Falle 5 Stunden), falls eine Komfortperiode nach einem längeren Heizungsunterbruch bevorsteht. Es sei hierbei angeführt, dass beim vorliegenden Beispiel der [Figur 108](#), [Figur 109](#) und [Figur 110](#) die Dynamik des Gebäudes nicht optimal charakterisiert wird. Dieser suboptimale Betrieb ist auf eine reduzierte Anzahl von Lernbeispielen des Gebäudemodell zurückzuführen, da der NEUROBAT Regler am 60.Tag zu Testzwecken initialisiert wurde. Zudem sind gerade die hier gezeigten Testdaten als Lernbeispiele von Interesse, da diese die Dynamik des Gebäude sehr gut veranschaulichen.

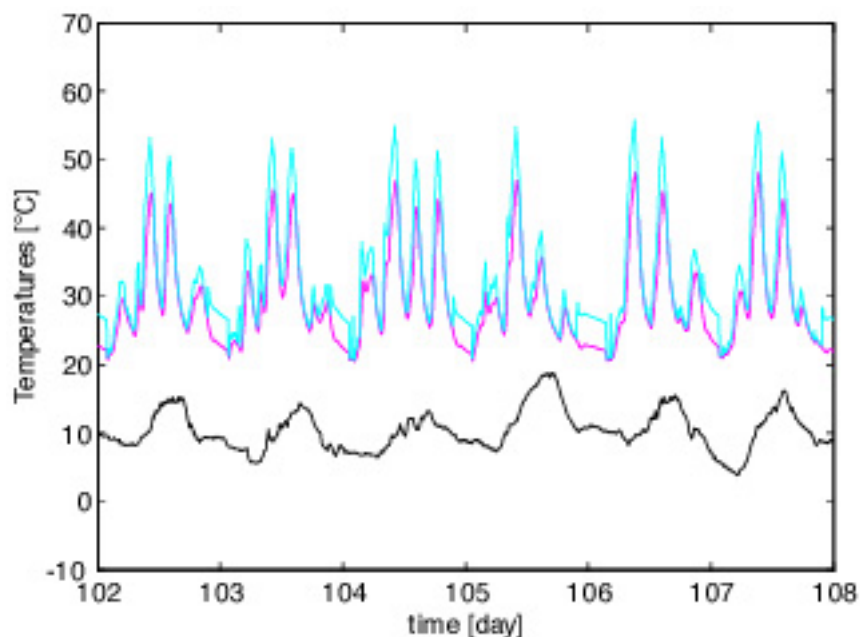
[Figur 110](#) zeigt, dass das NEUROBAT Konzept insbesondere für systematische Heizungsunterbrüche von kurzer Dauer von Interesse sein kann: ein intermittierender Betrieb kann ohne Komfortverlust systematisch programmiert werden, was ebenfalls in eine nicht zu vernachlässigende Energieeinsparung resultiert.



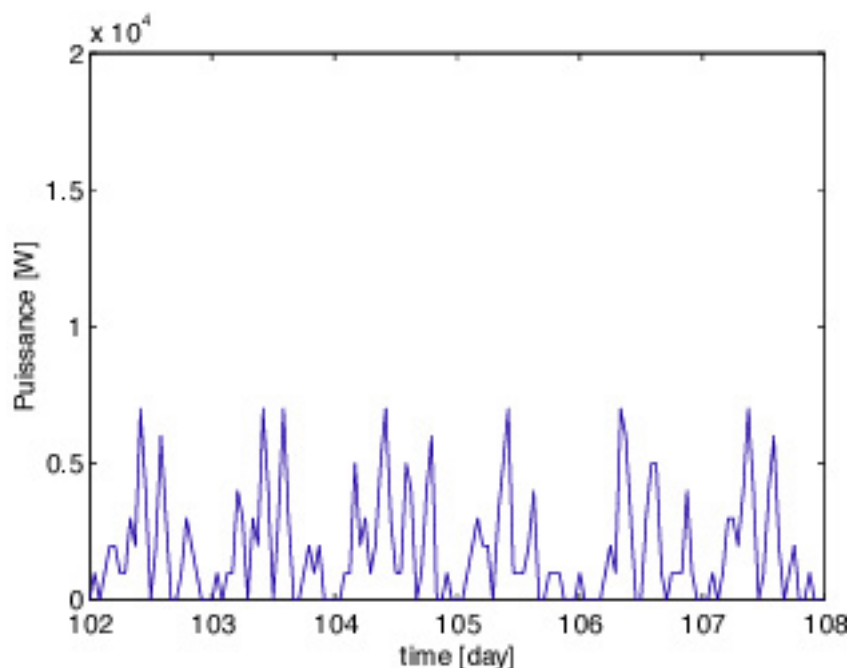
Figur 110: Zugeführte Heizenergie während einer Abwesenheitsperiode

5.4.5 Funktionsanalyse in der Zwischensaison

Die hier besproche Testperiode (vom 11. bis 17. April 2000) ist durch klimatische Bedingungen der Zwischensaison charakterisiert (siehe [Figur 111](#) – Aussentemperaturschwankungen zwischen 5°C und 18°C). Die zugeführten Heizleistungen bleiben trotz der vorteilhaften klimatischen Bedingungen signifikant, da die Fernwärmegewinne des Gebäudes vernachlässigbar sind (siehe [Figur 112](#)). Der Raumsollwert während den Komfortperioden wird eingehalten und keine Ueberheizperioden treten im Laufe des Tages auf. Es sei hier nochmals erwähnt, dass unter denselben Bedingungen der kommerzielle Heizungsregler manuell optimiert werden muss, um vergleichbare Resultate zu erhalten: einerseits muss die maximale Antizipations-Heizleistung limitiert, andererseits eine Nachtabenkung während des Tages programmiert werden, um Ueberheizperioden zu verhindern.



Figur 111: Aussen-, Vorlauf- und Rücklaufftemperatur während einer Heizperiode in der Zwischensaison



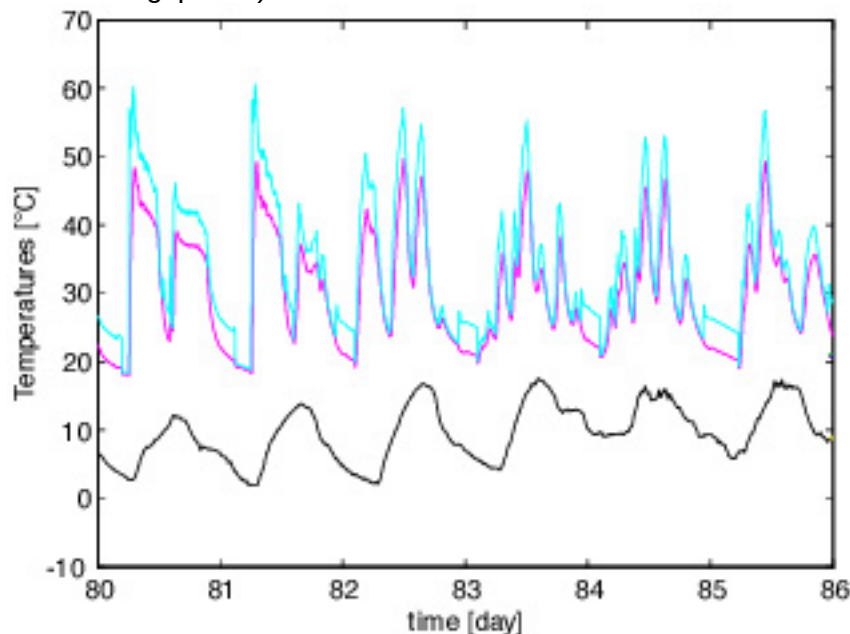
Figur 112: Gelieferte Heizenergie während einer Heizperiode in der Zwischensaison

Figur 113: Gemessene Raumtemperaturen während einer Heizperiode in der Zwischensaison

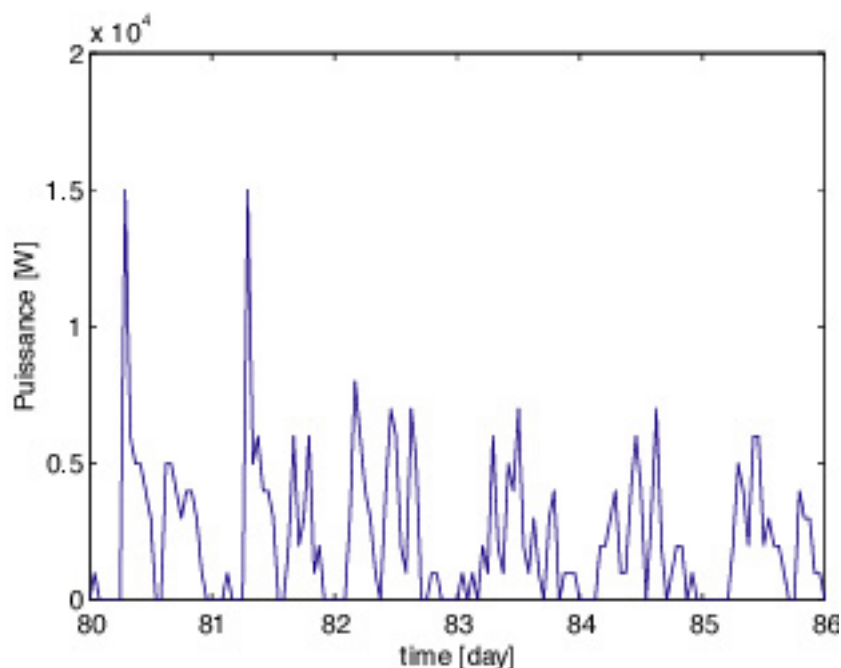
5.4.6 Direkter Betriebsvergleich SAUTER- und NEUROBAT-Regelung

Während einer Dauer von einigen Tagen wurden die Betriebsdaten des kommerziellen Heizungsregler QRK150 und des NEUROBAT Heizungsregler direkt verglichen. Dabei

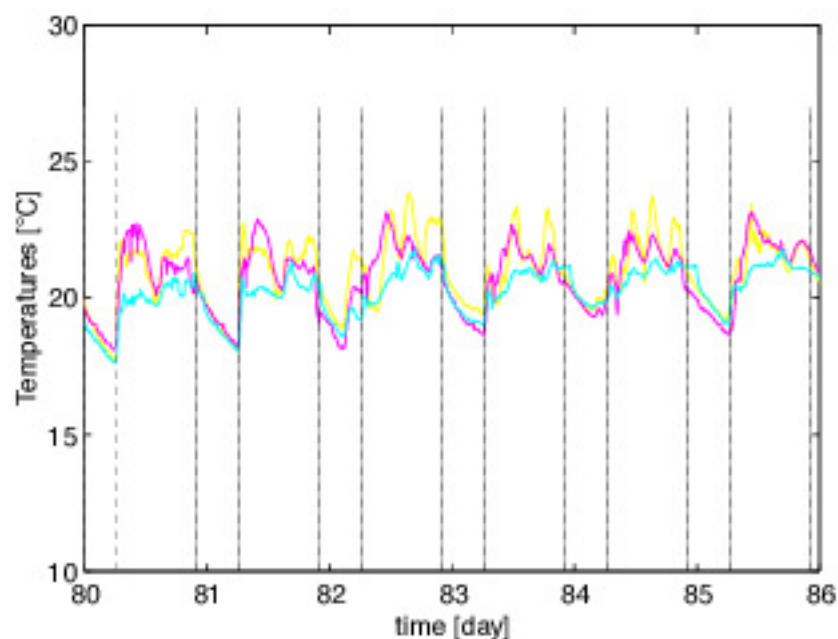
wurde der kommerzielle Heizungsregler mit einer täglichen Nachtabenkung von 9h bis 11h programmiert, um die zugeführte Heizenergie während der Periode der stärksten Fernwärmegewinne zu limitieren (siehe Technischer Zwischenbericht der Entwicklungsphase).



Figur 114: Aussen-, Vorlauf- und Rücklauftemperatur während einer Vergleichsperiode: SAUTER-Regler (Tage 80-82) und NEUROBAT-Regler (Tage 83-86)



Figur 115: Gelieferte Heizenergie während einer Vergleichsperiode: SAUTER-Regler (Tage 80-82) und NEUROBAT-Regler (Tage 83-86)



Figur 116: Gemessene Raumtemperaturen während einer Vergleichsperiode: SAUTER-Regler (Tage 80-82) und NEUROBAT-Regler (Tage 83-86)

In Figur 114, Figur 115 und Figur 116 ist ein qualitativer Unterschied betreffend der zugeführten Heizleistungen festzustellen.

Der kommerzielle Heizungsregler QRK150 liefert vor Beginn der morgendlichen Komfortperiode eine maximale Heizleistung (was in einen raschen Abfall der Kesseltemperatur der Heizung resultiert), die sich dann kontinuierlich auf einen mittleren Wert einpendelt. Die Nachtabenkung von 9h bis 11h ist, wie bereits erwähnt, sehr effizient, da dadurch eine Ueberheizung um die Mittagszeit verhindert werden kann.

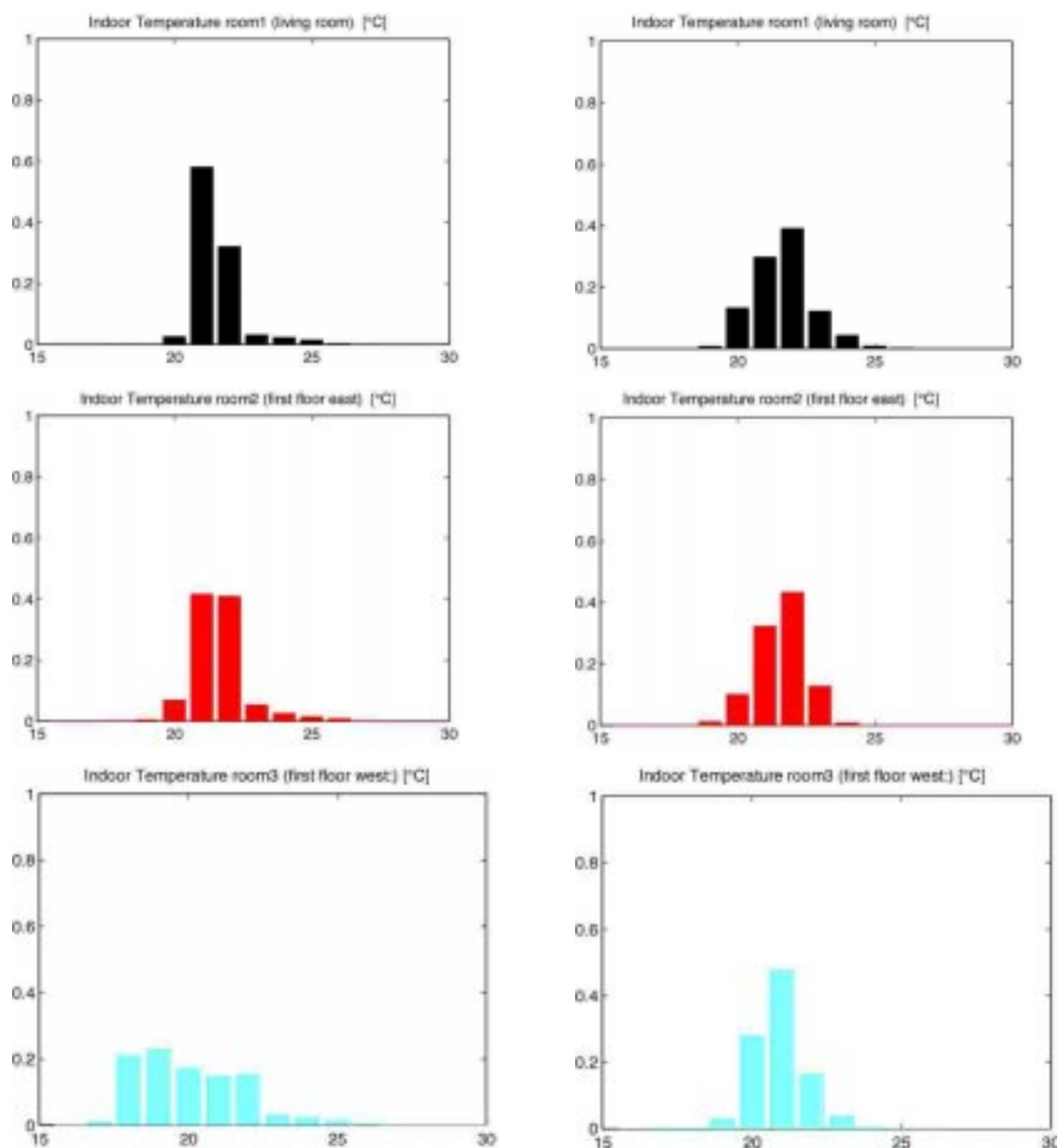
Beim NEUROBAT Regler wird die Heizleistung vor der morgendlichen Komfortperiode kontinuierlich erhöht und Absenkungen der Heizleistung werden im Verlauf des Tages im Hinblick von Fernwärmegewinnvorhersagen ausgeführt.

Das Verhalten der Raumtemperaturen (Raumsollwert von 21°C) über die gesamte Testperiode zeigt ein vergleichbares Betriebsverhalten der beiden Heizungsregler. Wie bereits erwähnt, resultiert die manuelle Parametrisierung des kommerziellen Heizungsreglers QRK150 (Nachtabenkung von 9h bis 11h) in ein zum NEUROBAT Regler vergleichbaren optimalen Betrieb.

5.4.7 Leistungsbilanz des NEUROBAT Heizungsreglers

Figur 117 zeigt die Evaluation des Komforts für die Heizsaison '98/'99 und die Heizsaison '99/'00 im Vergleich (kommerzieller Heizungsregler: Graphen links; NEUROBAT Prototyp: Graphen rechts). Die Histogramme der Raumtemperaturen umfassen die Messwerte während einer Heizsaison während den Komfortperioden mit einem konstanten Raumsollwert von 21°C für den kommerziellen Heizungsregler und einem variablen Raumsollwert von 21.5°C für den NEUROBAT Prototypen.

Generell kann für den kontinuierlich parametrisierten kommerziellen Heizungsregler von einem optimalen Komfort gesprochen werden (Graphen links in Figur 117) mit einer Häufung der Raumtemperatur um den Raumsollwert von 21°C (abgesehen für den Schlafraum West im 1.Stock, wo das Thermostatenventil während der Heizsaison '98/'99 geschlossen war).

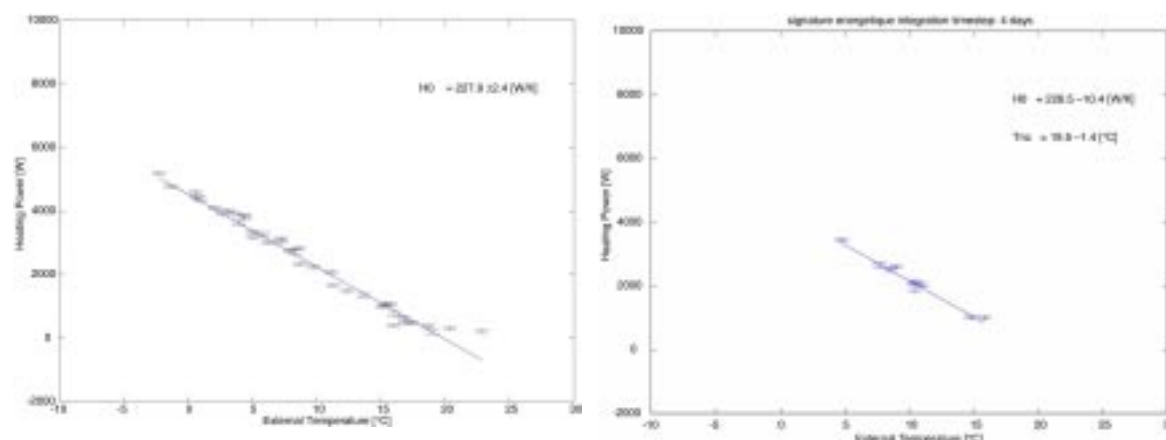


Figur 117: Histogramm der Raumtemperaturen für Wohnzimmer (Graph oben), Schlafraum Ost (Graph mitte) und Schlafraum West (Graph unten) im 1.Stock. Kommerzieller Heizungsregler mit konstantem Raumsollwert von 21°C (Graphen links), NEUROBAT Prototyp mit variablem Raumsollwert von 21.5°C $\pm$ 0.5°C (Graphen rechts).

Die Raumtemperaturen für den NEUROBAT Prototypen sind aufgrund eines variablen Raumsollwertes ($\pm 0.5^\circ\text{C}$) um den Wert von 21.5°C gestreut und können deshalb nicht direkt mit den Komfortdaten der Heizsaison '98/'99 verglichen werden. In Anbetracht der Programmierung eines variablen Raumsollwertes für den NEUROBAT Heizungsregler kann auch für die Heizsaison '99/'00 von einem optimalen Komfort geredet werden. Es sei bemerkt, dass während der Heizsaison '99/'00 das Thermostatenventil des Schlafraum West geöffnet war, was in einen korrekten Komfort resultiert (Graph unten rechts in Figur 117).

Zur Charakterisierung der energetischen Effizienz ist in Figur 118 die Energiekennlinie für die Heizsaison '98/'99 (kommerzieller Heizungsregler: Graph links) und die Heizsaison '99/'00

(NEUROBAT Prototyp: Graph rechts) angeführt. Dabei wird die Heizleistung über einen Zeitraum von 4 Tagen in Abhängigkeit der Aussentemperatur gesetzt.



Figur 118: Energiekennlinien im Vergleich (Kommerzieller Regler während Heizsaison '98/'99: links; NEUROBAT während Heizsaison '99/'00: rechts)

Die energetische Effizienz der beiden Heizungsregler ist vergleichbar, was durch die Kenngrössen, die sich aus Figur 118 ergeben, bestätigt wird. Für den kommerziellen Heizungsregler ist der thermische Gebäudetransferkoeffizient $H_0 = 238 \pm 3 [W/K]$ und der Wert der Nichtheiz-Ausstemperatur $T_{nh_ext} = 19.2 \pm 0.4 ^{\circ}C$. Die entsprechenden Grössen für den NEUROBAT Prototypen sind $H_0 = 226 \pm 10 [W/K]$ und $T_{nh_ext} = 19.5 \pm 1.4 ^{\circ}C$.

Die Analyse des Benutzerkomforts und der energetischen Effizienz zeigt, dass die Betriebseffizienz des kommerziellen Heizungsregler (Heizsaison '98/'99) und des NEUROBAT Prototypen (Heizsaison '99/'00) vergleichbar sind. Diese vergleichbare Betriebsleistung basiert auf einem manuell kontinuierlich parametrisierten kommerziellen Heizungsregler während der Heizsaison '98/'99, während der NEUROBAT Heizungsregler nach dem Plug-and-Play Prinzip installiert wurde und sich im Verlaufe des Betriebes an das Gebäude adaptierte.

5.5 Schlussfolgerung Testphase IIB

Während der Heizsaison 99/00 wurde der NEUROBAT-Heizungsregler auf dem Test-Wohngebäude in Basel ausgemessen.

Die Betriebsdaten des Heizungsreglers sind vom ersten Tag der Inbetriebnahme an zufriedenstellend, trotz der Absenz von Lernbeispielen für das Gebäude- und die Klimamodelle. Nach wenigen Betriebstagen wird der Raumsollwert in Referenz zu den Komfortperioden korrekt eingehalten.

Die Betriebsdaten des NEUROBAT-Heizungsreglers während den Heizperioden im Winter zeigen ein vergleichbares Verhalten zum kommerziellen Heizungsregler QRK150, dessen Parameter von einem Experten manuell optimiert wurden. Während den Heizperioden in den Zwischensaisons (Frühling, Herbst) ermöglicht die Antizipation der Fernwärmegewinne die Limitierung von Ueberheizperioden.

Das Einschalten des NEUROBAT-Heizungsreglers nach einer Ferienabwesenheit funktioniert in einer optimalen Art und Weise. Das NEUROBAT-Konzept erlaubt unter Einhaltung des Komforts ein Runterfahren der Heizung auch während kürzeren Abwesenheiten, was zu einer nicht vernachlässigbaren Energieeinsparung führt.

Es sei an dieser Stelle nochmals erwähnt, dass die NEUROBAT Einsparungen betreffend des Energieverbrauches und ein optimaler Benutzerkomfort in einem Gebäude mit nicht vernachlässigbaren Fernwärmegewinnen grösser sind. Zudem sind die Betriebsdaten des NEUROBAT-Heizungsreglers mit den Testdaten eines optimal parametrisierten kommerziellen Heizungsreglers verglichen worden. In der Praxis ist es jedoch üblich, die Parameter lediglich bei der Inbetriebnahme zu definieren und der Leistungsvergleich des NEUROBAT Heizungsreglers mit automatischer Parameteradaptation wäre gerade für diesen praktischen Fall von Interesse.

6. Schlussfolgerung und Ausblick

6.1 Zusammenfassung

Das für Zentralheizungsanlagen konzipierte NEUROBAT Konzept wurde mittels eines PC-Prototypen in Büroräumlichkeiten des LESO-EPFL getestet und in einer ersten Projektphase mit den Betriebsdaten eines kommerziellen adaptiven HLK-Heizungsreglers verglichen. Der entwickelte NEUROBAT-Regler zeichnete sich dabei im Vergleich durch eine durchschnittliche Reduktion des Energieverbrauches von 10-15% unter verbessertem Benutzerkomfort und eine markante Vereinfachung der Inbetriebnahmeprozedur aus.

In einer zweiten Phase des Projektes sollte das NEUROBAT Konzept auf seine industrielle Machbarkeit hin untersucht werden. Das Projekt wurde in Phase durchgeführt und im folgenden sollten die Resultate der Definitions-, der Entwicklungs-, der Test- und der Optimierungsphase kurz zusammengefasst werden.

In einem ersten Schritt wurden die technischen Spezifikationen des NEUROBAT Heizungsreglers erarbeitet. Zudem wurde die Inbetriebnahme-Prozedur des NEUROBAT-Regelalgorithmus weiter optimiert und die Zahl der Service-Parameter auf 4 reduziert.

Aufgrund der Spezifikationen des NEUROBAT-Heizungsreglers wurde während der Entwicklungsphase in enger Zusammenarbeit mit dem industriellen Partner ein industrieller Prototyp des Heizungsreglers realisiert. Dabei wurde mit dem Ende des Projektes eine zweite Version des Prototypen entwickelt, welche im Hinblick auf eine breitangelegte Testphase die gemachten Erfahrungen mit dem im Rahmen dieses Projektes entwickelten Prototypen berücksichtigt.

Vergleichstest wurden während zweier Heizsaison auf einem Wohngebäude in Basel ausgeführt, um den Leistungsausweis des NEUROBAT-Heizungsreglers aus der ersten Projektphase zu beweisen. Während der Heizsaison 1998-1999 wurde ein kommerzieller Heizungsregler (QRK 151) auf dem Testgebäude eingesetzt, der während des Betriebes kontinuierlich manuell parametrisiert wurde – dies entspricht einem in der Praxis nicht anzutreffenden Optimierungsgrad. Entsprechend diesem Optimierungsprozess und aufgrund des konventionellen Testgebäudes ohne Sonnenfremdwärmegewinne, ist der Leistungsausweis des kommerziellen Heizungsregler (QRK 151) sehr gut. Während der Heizsaison 1999-2000 wurde der NEUROBAT-Prototyp auf dem Testgebäude installiert. Die Analyse des Komforts und der energetischen Effizienz zeitigt eine vergleichbare Betriebsleistung, wobei das 'Commissioning'-Konzept des NEUROBAT Prototypen nach dem 'Plug-and-Play'-Prinzip funktioniert: bei der Inbetriebnahme benötigt der NEUROBAT Heizungsregler lediglich zwei Benutzereingaben und vier Serviceparameter. Alle übrigen Einstellungen optimiert der Regler, ausgehend von mittleren Startwerten, in einer Lernphase selbstständig. Der Benutzer und Installateur kann Begriffe wie Heizkurven, Parallelverschiebungen, Nachtabsenkungen, Heizgrenzenschaltung, Gebäudetragheit, intermittierendes Heizen usw. vergessen.

Während einer abschliessenden Optimierungsphase wurde praktische Aspekte, wie die Bestimmung des Massendurchflusses untersucht und Vorbereitungen für die Industrialisierungsphase getroffen (zweite Version des NEUROBAT-Prototypen).

Mit Blick auf die vertraglich festgesetzten Zielsetzungen, wurden diese mit den hier vorgelegten Resultaten zum grossen Teil erfüllt. Leider konnte die geforderte 10%-ige Energieeinsparung des NEUROBAT-Heizungsreglers aufgrund des Testprozedere nicht aufgezeigt werden.

6.2 Ausblick

Mit dem NEUROBAT Prototypen sind für kommende Heizsaison '00/'01 weitere Tests auf verschiedenen Bürogebäuden (unter anderem dem CSEM Hauptgebäude) vorgesehen. Basierend auf der Evaluation der Testdaten wird seitens des industriellen Projektpartners eine Industrialisierungsphase des NEUROBAT Projektes in Betracht gezogen. In einem

Die Resultate des NEUROBAT Projektes, Phase II, eröffnet interessante Möglichkeiten betreffend des Einsatzes des entwickelten Regelkonzeptes in anderen haustechnischen Anwendungen wie z.B. Klimaanlage oder Solaranlagen. Unter Berücksichtigung des prädiktiven Charakters des NEUROBAT Reglers ist zudem eine Koppelung des Heizungsreglers mit anderen haustechnischen Installationen (wie z.B. Stromverbrauch in öffentlichen Gebäuden) energietechnisch von Interesse.

Literaturhinweise:

- [1] Thomas E. Mull: *HVAC Principles and Applications Manual*, McGraw-Hill Companies Inc, USA, **1997**
- [2] H. Michael Newman: *Direct Digital Control of Building Systems: Theory and Practice*, Wiley & Sons Inc, USA, **1994**
- [3] J.Krauss, M.Bauer, N.Morel, M.El-Khoury: *NEUROBAT – Predictive Neuro-Fuzzy Building Control System*, BfE-Schlussbericht, Bern, Switzerland, **May 1998**
- [4] Edoarda Mosca: *Optimal, Predictive and Adaptive Control*, Prentice Hall, New Jersey, USA, **1995**
- [5] Hagan, Demuth, Beale: *Neural Network Design*, PWS Publishing Company, Boston, USA, **1996**
- [6] D.Bertsekas: *Dynamic Programming and Stochastic Control*, Academic Press, New York, USA, **1976**
- [7] P.O. Fanger: *Thermal Comfort*, Krieger, Malabor, USA, **1981**
- [8] P.Lute, D.van Paassen: *Optimal Indoor Temperature Control Using a Predictor*, IEEE Control Systems, 4-9, **1995**
- [9] M.M.Rosset: *Gestion thermique optimale d'un batiment*, PhD Thesis, Université de Paris-Sud, Centre d'Orsay, France, **1986**
- [10] P.Parent: *Optimal Control Theory Applied to Dwelling Heating Systems*, IRCOSE, Agence francaise pour la maîtrise de l'énergie, Paris, France, **1987**
- [11] A.M.Nygard: *Predictive Thermal Control of Building Systems*, PhD Thesis no.876, EPFL, Lausanne, Switzerland, **1990**
- [12] SAUTER AG, *Aussentemperaturfühler EGT301*, SAUTER AG, Basel, Suisse, **1995**
- [13] SAUTER AG, *Raumtemperaturfühler EGT330*, SAUTER AG, Basel, Suisse, **1995**
- [14] SAUTER AG, *Anlegetemperaturfühler EGT310*, SAUTER AG, Basel, Suisse, **1995**
- [15] Landis&Staefa, *Sonnenfühler QAS92*, Landis&Staefa, Zug, Switzerland, **1995**
- [16] M. Bauer: *Gestion biomimétique de l'énergie dans le bâtiment*, PhD Thesis no.1792, EPFL, Lausanne, Switzerland, **1998**
- [17] SAUTER AG, *Heating Control QRK 201*, SAUTER AG, Basel, Switzerland, **1996**