

# ***DEMONBAT***



Ausgearbeitet durch

***J. Krauss, CSEM SA***

Im Auftrag des

***Bundesamtes für Energie***

Dezember 2003

**Auftraggeber:**

Bundesamtes für Energie  
Forschungsprogramm Rationelle Energienutzung in Gebäuden

**Auftragnehmer:**

Centre Suisse d'Electronique et de Microtechnique SA, 2007 Neuchâtel

**Autoren:**

J. Krauss, CSEM SA, 2007 Neuchâtel  
C. Verjus, CSEM SA, 2007 Neuchâtel

**Projektbegleitung:**

M. Zimmermann, Programmleiter BFE, EMPA Dübendorf

2003

Diese Studie wurde im Rahmen des Forschungsprogramms „Rationelle Energienutzung in Gebäuden“ des Bundesamtes für Energie erarbeitet. Für den Inhalt ist alleine der/die Studiennehmer/in verantwortlich.

**Bundesamt für Energie BFE**

Worblentalstrasse 32, CH-3063 Ittigen • Postadresse: CH-3003 Bern  
Tel. 031 322 56 11, Fax 031 323 25 00 • [office@bfe.admin.ch](mailto:office@bfe.admin.ch) • [www.admin.ch/bfe](http://www.admin.ch/bfe)

Vertrieb: EMPA ZEN, Überlandstrasse 129, 8600 Dübendorf, [www.empa-ren.ch](http://www.empa-ren.ch)  
ENET, Egnacherstrasse 59, 9320 Arbon, [enet@temas.ch](mailto:enet@temas.ch), [www.energieforschung.ch](http://www.energieforschung.ch)

## Zusammenfassung

Zur Evaluation des NEUROBAT Heizungsreglers wurde seit Herbst 2001 in einer Wärmezone (Nord-Ost) des CSEM Gebäudes JD1 in Neuchâtel ein Neurobat-Regler Prototyp als Pilotinstallation und ein Monitoringsystem installiert (Kapitel 3).

Der Neurobat-Regler funktioniert seit zwei Heizsaisons erfolgreich.

Die Analyse des Komforts (Figur 11), im Vergleich zu einer Referenzzone (Nord-West) und der energetischen Effizienz (Figur 18 und Figur 22) für das ganze CSEM Gebäude, im Vergleich zu den früheren Jahren (gewichtet mit den monatlichen Heizgradtagen), zeigt eine bessere Betriebsleistung als mit dem kommerziellen Heizungsregler, wobei das 'Commissioning'-Konzept des NEUROBAT Prototyps nach dem 'Plug-and-Play'-Prinzip funktioniert (Kapitel 4.2): 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 können Begriffe wie Heizkurven, Parallelverschiebungen, Nachtabsenkungen, Heizgrenzenschaltung, Gebäudetragheit, intermittierendes Heizen usw. vergessen.

## Résumé

Pour évaluer le contrôleur de chauffage NEUROBAT, un prototype de contrôleur Neurobat ainsi qu'un système d'enregistrement ont été installés dans une aile (nord-est) du bâtiment JD1 du CSEM à Neuchâtel en automne 2001 (Chapitre 3).

Le contrôleur Neurobat fonctionne avec succès depuis maintenant deux hivers.

L'analyse du confort (Figure 11) comparé à une aile de référence (nord-ouest) et le l'efficacité énergétique (Figure 18 et figure 22) au niveau de l'ensemble du bâtiment comparé aux années précédentes (pondérée par les degré-jours de chauffage mensuel) montre une meilleure efficacité qu'avec le régulateur de chauffage commercial. De plus, l'installation du prototype NEUROBAT s'opère sur un principe « plug and play » (Chapitre 4.2) : lors de sa mise en service, le contrôleur de chauffage NEUROBAT n'a besoin que de deux informations d'utilisation et quatre paramètres. Tous les autres réglages sont optimisés par le contrôleur lui-même au cours d'une phase d'apprentissage, à partir de valeurs de départ moyennes. L'utilisateur et l'installateur peuvent oublier les concepts de courbe de chauffe, chauffage intermittent, inertie thermique, déplacements de courbes, réglage de l'heure de démarrage et autres.

## Summary

For the evaluation of the NEUROBAT heating system controller, a Neurobat controller prototype, as well as a monitoring system, were installed in one wing of the CSEM JD1 building in Neuchâtel during autumn 2001 (Chapter 3).

The Neurobat controller has been successfully used for the last two winters.

Analysis of both the user comfort (Figure 11) relative to a reference wing (north-west wing) and of the energy efficiency (Figure 18 and figure 22) of the building (relative to former years, weighted by heating-degree days) displays an improved efficiency relative to the commercial heating regulator. Moreover, installing the Neurobat prototype is a "plug and play" type operation (Chapter 4.2): to start up the Neurobat heating controller requires only two user informations and four service parameters. All other settings, starting from initial approximate mean values, are optimised by the controller itself during a learning phase. Both the user and the heating technician no longer need to bother about concepts such as heating curve, intermittent heating, thermal inertia, curve displacement, heating system starting time, etc.



## Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung .....	1
Résumé .....	1
Summary .....	1
Inhaltsverzeichnis .....	3
1 Einleitung .....	4
2 Projektziele.....	5
3 Testinstallation: CSEM Hauptgebäude JD1 .....	6
4 Regelkonzept .....	11
4.1 Kommerzielles Gebäudeleitsystem der Referenzheizzone .....	11
4.2 Neurobat-Regler .....	14
5 Ergebnisse : Analyse der Betriebsverhalten .....	17
5.1 Datenevaluations-Methoden.....	17
5.2 Datenevaluation des Neurobat-Reglers .....	17
5.3 Betriebsvergleich bezüglich thermischen Komfort.....	19
5.4 Betriebsvergleich bezüglich Energetische Effizienz .....	21
6 Schlussfolgerung und Ausblick .....	27
6.1 Schlussfolgerung .....	27
6.2 Ausblick .....	27
Referenzen .....	28

## 1 Einleitung

Im Auftrag des Bundesamtes für Energie entwickelte das CSEM in Zusammenarbeit mit dem Projektkonsortium ESTIA GmbH, SAUTER AG und LESO-PB/EPFL den neuronalen Heizungsregler NEUROBAT. Während einer ersten Phase des NEUROBAT Projektes (NEUROBAT, Phase I: Projekt No 51'565) wurde das neuronale Reglerkonzept entwickelt und experimentell mittels eines PC-Prototypen getestet. Die Testdaten wurden dabei mit den Betriebsdaten eines modernen und kommerziellen Heizungsreglers (SAUTER Equitherm QRK 151) verglichen. Die Simulations- und Testresultate bestätigten die Vorteile der Anwendung von neuronalen Methoden im Bereich der Klimatechnik, wobei der Energieverbrauch und der Inbetriebnahmeaufwand von HLK-Regelsystemen markant reduziert werden konnte (siehe [Referenz \[1\]](#)). In einer zweiten Phase des Projektes (NEUROBAT, Phase II: Projekt No.29'083) wurde im Hinblick auf eine zukünftige Produkteentwicklung die industrielle Machbarkeit des NEUROBAT Regelkonzeptes unter Beweis gestellt. Der hierzu entwickelte industrielle NEUROBAT Prototyp wurde während einer Heizsaison auf einem Zweifamilien-Wohngebäude in Basel getestet und mit den Betriebsdaten des kommerziellen SAUTER Equitherm QRK 151 verglichen. Die resultierende Betriebseffizienz des NEUROBAT Heizungsreglers zeichnete sich dabei insbesondere durch das "Plug-and-Play"-Inbetriebnahmekonzept aus (siehe [Referenz \[2\]](#)).

Im Rahmen des Umweltmanagementprogrammes ISO 14001 hatte sich die Direktion des CSEM entschieden, eine Installation des vom Projektkonsortiums CSEM-SAUTER-ESTIA-LESO/EPFL entwickelten NEUROBAT Heizungsreglers auf dem CSEM-Hauptgebäude JD1 zu evaluieren. Diese Test-Installation sollte genutzt werden, die Betriebseffizienz des industriellen NEUROBAT-Prototypen während einer kompletten Heizsaison 2001-2002 zu analysieren. Diese Analyse bedingte die Installation eines Datenerfassungs-Systems. Hierbei sollten Fühler installiert werden, die unabhängig zur Regelung ebenfalls auf das Datenerfassungs-System aufgeschaltet werden. Die Fühler des Datenerfassungs-Systems umfassten Aussen-, Raum-, Vorlauf- und Rücklaufftemperaturfühler, sowie Wärmezähler und Sonnenfühler. Referenzmessungen einer vergleichbaren Heizzone (Nord-West) des kommerziellen Gebäudeleitsystems L&G sollten ebenfalls auf das Datenerfassungs-System aufgeschaltet werden. Die Daten der Referenzheizzone (Aussen-, Raum-, Vorlauf- und Rücklaufftemperaturfühler) bilden die Basis der Evaluation und Analyse der Funktionalität des NEUROBAT-Prototypen.

Leider sind während der Heizsaison kritische Funktionsstörungen bei dem Gebäudeleitsystem für Monitoringzwecke vorgekommen. Die Daten der Heizsaison 2001-2002 wurden nicht erfasst. Außerdem, durch Änderungen in der Investitionsstrategie des industriellen Partners, der das Gebäudesystem erstellt hatte, war die Fortsetzung der Zusammenarbeit nicht mehr möglich. Die Daten für die Heizsaison 2002-2003 wurden mit neu installierten Datenloggern erfasst. Das Projekt hat dadurch eine gewisse Verlängerung erfahren.

Die Datenevaluation sollte einerseits die Einfachheit der Inbetriebnahme und des Unterhalts des NEUROBAT-Heizungsreglers zeigen, andererseits die während der Phase I des NEUROBAT-Projektes ausgewiesene Energieeinsparung bestätigen (indikativ im Vergleich zu den Messungen der Referenzheizzone).

## 2 Projektziele

- Die Installation des NEUROBAT-Heizungsreglers (Installation der Sensoren und Aktuatoren, Adaptation der Software des Prototypen-Heizungsreglers, etc.) und des Datenerfassungs-System (für NEUROBAT Heizzone und Referenzheizkreis).
- Die Inbetriebnahme des NEUROBAT-Heizungsreglers entspricht einer Generalüberprüfung der Pilotinstallation.
- Die Heizdaten der Heizzonen Nord-Ost (NEUROBAT-Heizungsregler) und Nord-West (kommerzielles Gebäudeleitsystem L&G) sollen erfasst und für die Analyse aufbereitet werden.
- Die Funktionalität des NEUROBAT Reglers wird im Vergleich zu den Referenzmessungen analysiert und die Resultate zusammengefasst.

### 3 Testinstallation: CSEM Hauptgebäude JD1

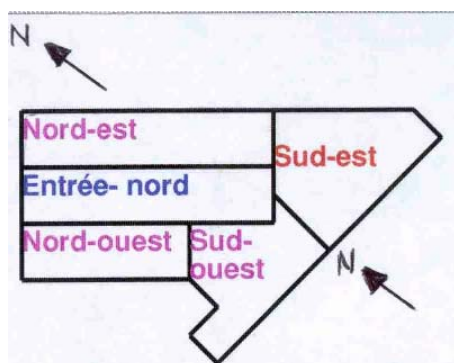
Die Heizenergie des Hauptgebäudes des CSEM wird seitens der städtischen Fernwärmezentrale "Neuchâtel Maladière" geliefert und beträgt jährlich 650 MWh. Bild 1 zeigt die Südansicht des besprochenen Testgebäudes. Das Gebäudevolumen beträgt  $40'700 \text{ m}^3$  (SIA).

Über einen Wärmetauscher werden fünf Wärmezonen angesteuert (Nord-Ost, Nord, Nord-West, Süd-Ost und Süd-West) und die Verteilung der Heizwärme wird mittels eines Gebäudeleitsystems der Firma L&G geregelt. Figur 1 zeigt die Aufteilung der Heizzonen des CSEM Hauptgebäudes.

Jede Wärmezone verfügt über einen unabhängigen Heizkreis (Messung der Vorlauf- und Rücklauf-temperatur) und die Heizenergie wird über das Mischventil L&G SKD62 geregelt.



Bild 1: Hauptgebäude CSEM JD1



Figur 1 : Heizzonen Hauptgebäude JD1



Bild 2: Heizinstallation CSEM Hauptgebäude JD1



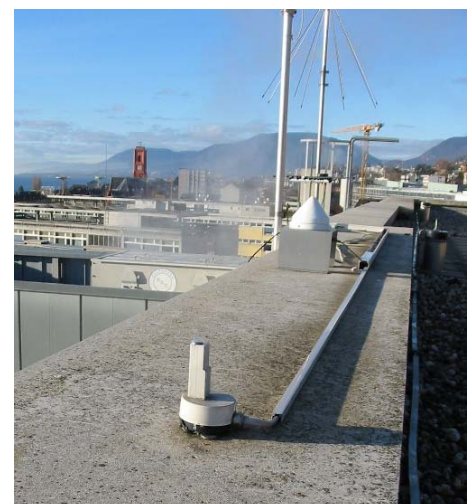
**Figur 1** zeigt die Skizze des Testgebäudes JD1. Der NEUROBAT Prototyp regelt die Heizzone Nord-Ost und das kommerzielle Gebäudeleitsystem L&G die Heizzone Nord-West als Referenzzone. **Figur 2** und **Figur 3** zeigen die Pläne des Erdgeschoss und des dritten Stockwerks.

Die Installation des NEUROBAT Heizungsreglers umfasste folgende Arbeiten:

- Erstellen des elektrischen Schemas und Installation des NEUROBAT Heizungsreglers, sowie des SAUTER Gebäudeleitsystems zu Monitoringzwecken.
- Die Spannungsversorgung des NEUROBAT Heizungsreglermoduls. Dieses Modul würde im CSEM-Heizungsraum installiert werden.
- Installation des Vorlauf- und Rücklaufftemperaturfühlers.
- Die Installation des Außentemperatursensors, des Raumtemperaturfühlers und des Sonnensensors (mit elektrischem Kabel bis zum Heizungsreglermodul).
- Die elektrische Verbindung vom Heizungsreglermodul zum Schaltschrank für das Schalten der Heizkreispumpe.
- Die Installation eines L&G Mischventils mit 3-Punkt Ausgang (Angaben und Material werden seitens SAUTER geliefert).
- Installation des Heizungsreglermoduls und des SAUTER Gebäudeleitsystems.
- Inbetriebnahme des NEUROBAT-Heizungsreglers (Tests der Sensoren und Aktuatoren).
- Das Pre-Monitoring des Heizungsreglers nach dessen Inbetriebnahme

Ort	Bezeichnung
Nord-Westfassade, beschattet	Außentemperatur
Raum 3N24	Innentemperatur
Heizinstallation	Vorlauftemperatur
Heizinstallation	Rücklauftemperatur
Heizinstallation	Wärmezähler
Dach	Sonnensensor

*Tabelle 1: Messsonden für den Neurobat-Regler*



*Bild 3, Bild 4: Änderungen auf der Heizinstallation*

*Bild 5: Sonnensensor*

Figur 2: CSEM Hauptgebäude JD1, EG

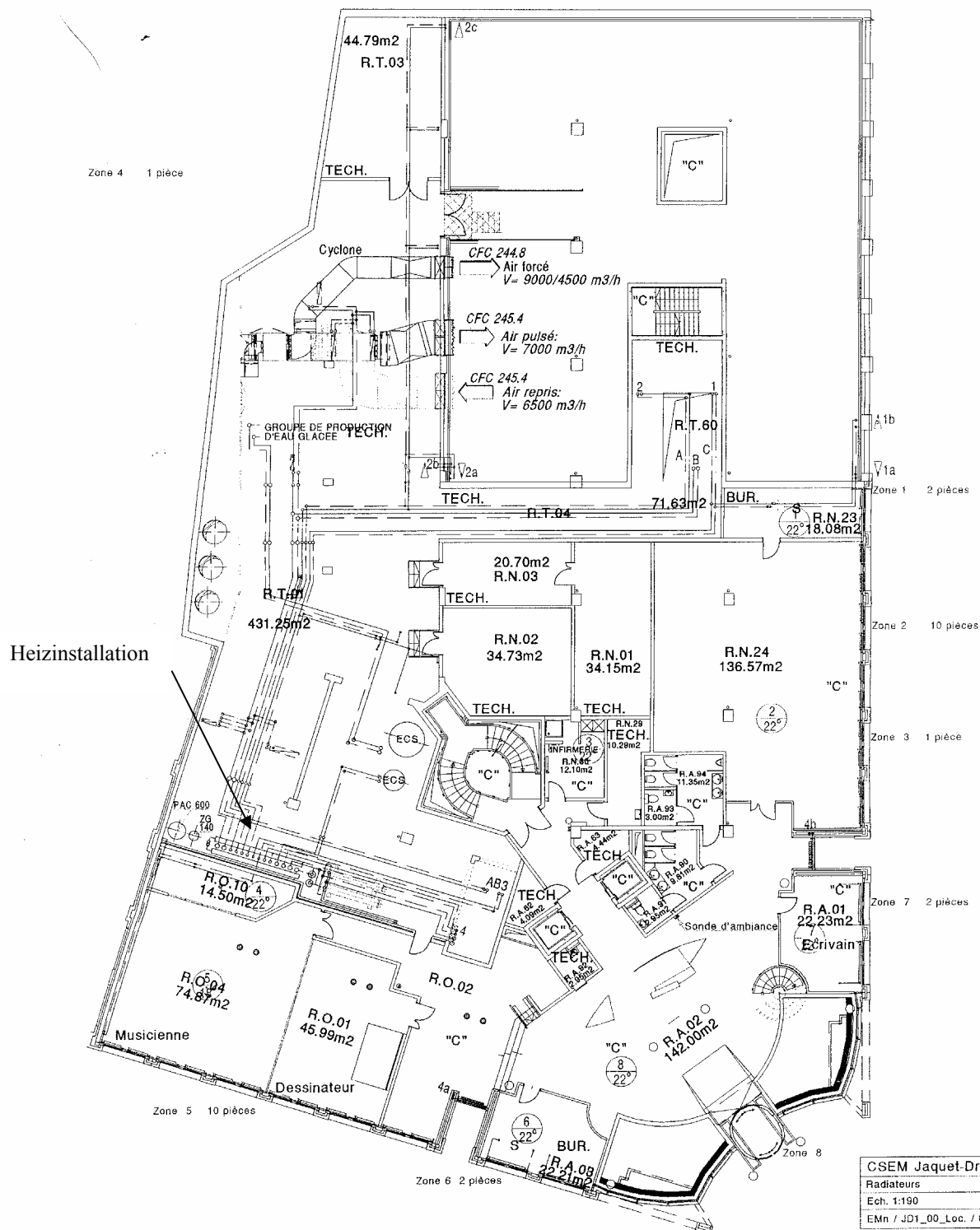






Bild 6: SAUTER Geeibäudeltsystems und NEUROBAT Heizungsregler

Ort	Bezeichnung
Nord-Westfassade, beschattet	Außentemperatur
Raum 3N04	Innentemperatur
Heizinstallation	Vorlauftemperatur
Heizinstallation	Rücklauftemperatur

Tabelle 2: Messsonden für die Referenzheizzone

Auf Grund kritischer Funktionsstörungen bei dem Gebäudeleitsystem für Monitoringzwecke wurden die Daten für die Heizsaison 2002-2003 mit neu installierten Datenloggern, Tinytag-Datenlogger, erfasst. Für die Außentemperatur wurde eine Low Resolution Luftsonde ( $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$ ) verwendet. Für die Raumtemperaturen wurden High Resolution Luftsonden ( $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ ) verwendet. Für die Heizkreistemperaturen wurden High Resolution Kontaktsonden ( $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ ) verwendet. Die Tastfrequenz der Messsonden beträgt 5 Minuten.

Tabelle 1 und Tabelle 2 listen die Messsonden für den NEUROBAT Regler resp. für die Referenzheizzone auf.

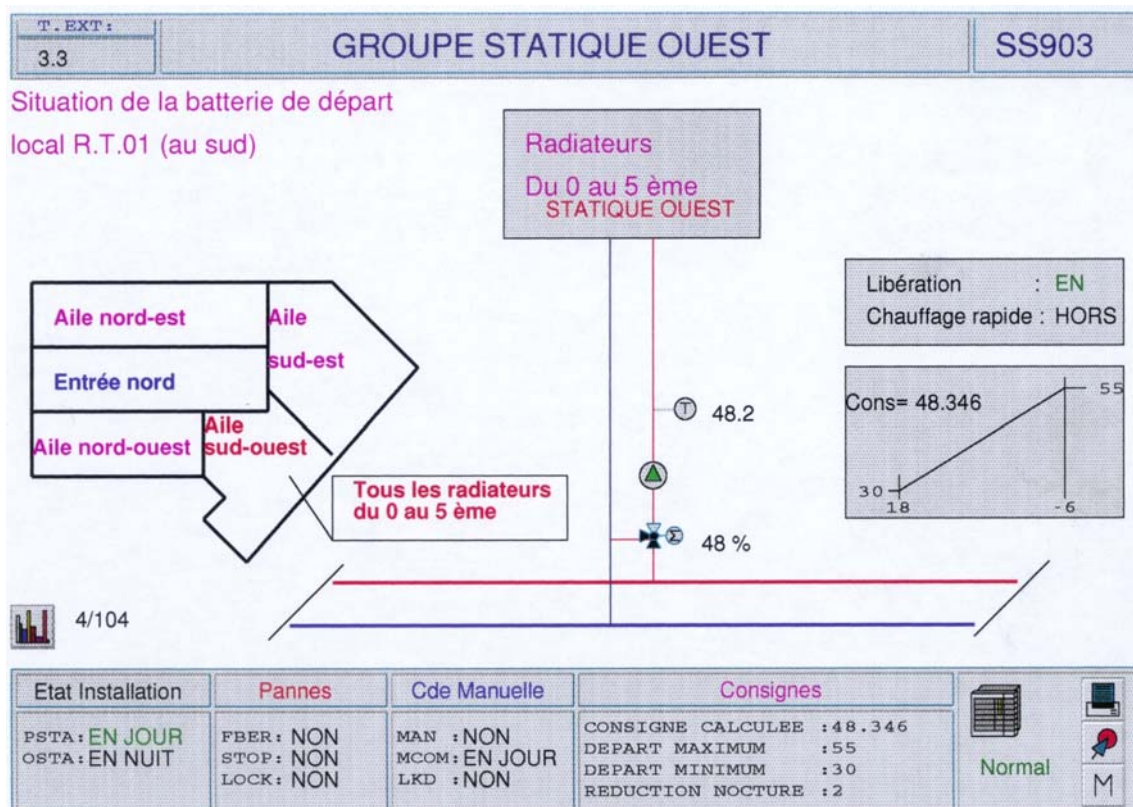
## 4 Regelkonzept

### 4.1 Kommerzielles Gebäudeleitsystem der Referenzheizzone

Heute eingesetzte Heizungsregler steuern die Vorlauftemperatur des Heizkreises auf Grund der gemessenen Außentemperatur ('open loop control' im Sinne eines Zentralheizungsreglers) oder einer Rückführung der Raumtemperatur ('closed-loop control' im Sinne eines Raumheizungsreglers). 95% davon basieren auf dem Konzept der Heizkurven. Die Popularität dieser angewandten Regelmethode beruht auf ihrer Einfachheit. Steigendes Umweltbewusstsein betreffend Produktion und Verwendung der Energieressourcen ist einer der entscheidenden Motivationsfaktoren für die Entwicklung von robusten und optimalen Regelmethode im Bereich der Heizungs- und Klimatechnik.

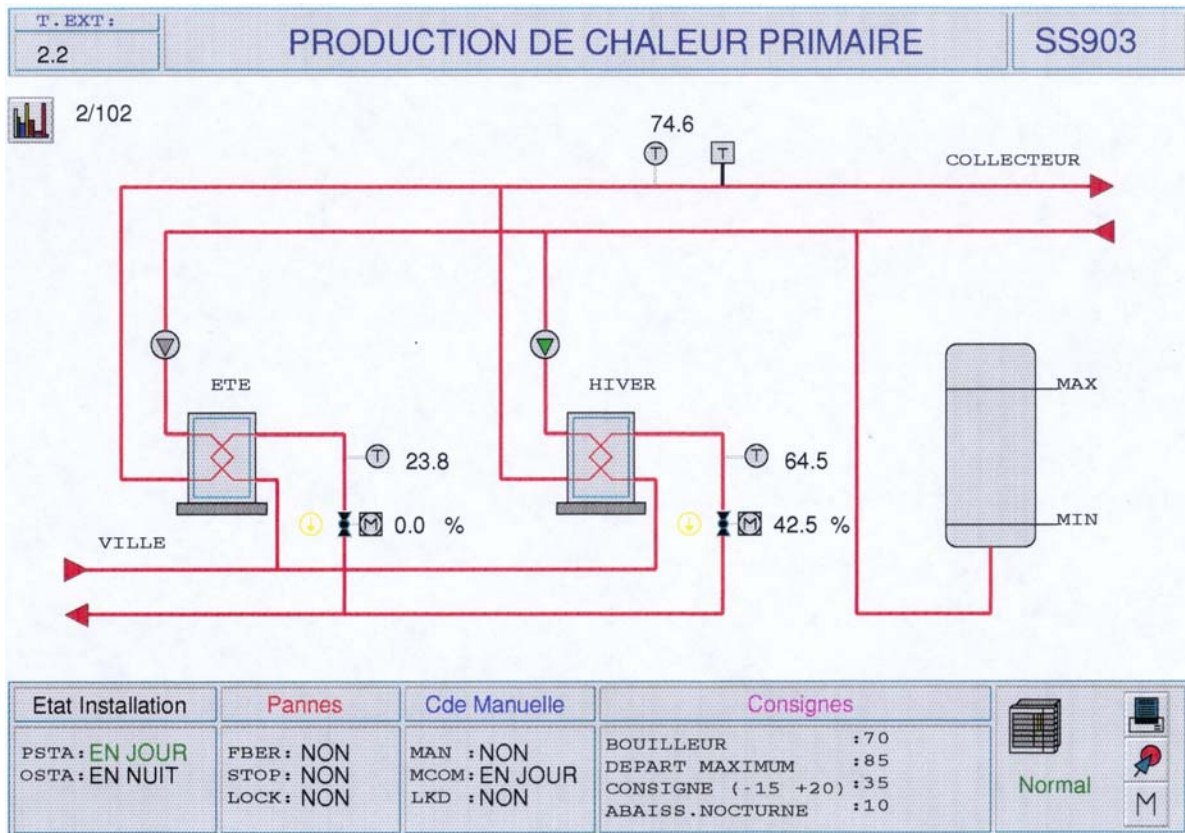
Moderne Heizungsregler wenden eine Kombination beider Methoden an und korrigieren die vordefinierten Heizkurven in Abhängigkeit der gemessenen Raumtemperatur und/oder der gemessenen Sonneneinstrahlung. Die verwendeten Regleralgorithmen verfügen zudem über optimierende Funktionen für das Aufstarten und Herunterfahren der Heizung. Trotzdem funktionieren modernste, heute eingesetzte kommerzielle Heizungsregler nicht optimal in Bezug auf das intermittierende Heizen und dem Management der vorhandenen Freiwärme, da die Regelstrategie auf einem thermisch stationären und unvollständigen Modell beruht. Modernste kommerzielle Heizungsregler erfordern zudem einen beträchtlichen Aufwand bei der Inbetriebnahme und während des Betriebs.

Das kommerzielle Gebäudeleitsystem L&G, das die Referenzheizzone (Nord-West) des CSEM regelt, basiert sich auf eine solche Kombination. Die Vorlauftemperatur des Heizkreises ist durch eine Heizkurve und die Außentemperatur definiert. In jedem Raum kontrollieren Thermostatventile auf den Heizkörpern die Wärmeabgabe. Die Regelstrategie beinhaltet auch eine Optimierung für das Aufstarten und Herunterfahren der Heizung während den Nächten und den Wochenenden.





Figur 4: Heizkreis der Heizzone Süd-West mit Heizkurve und Parametereinstellung



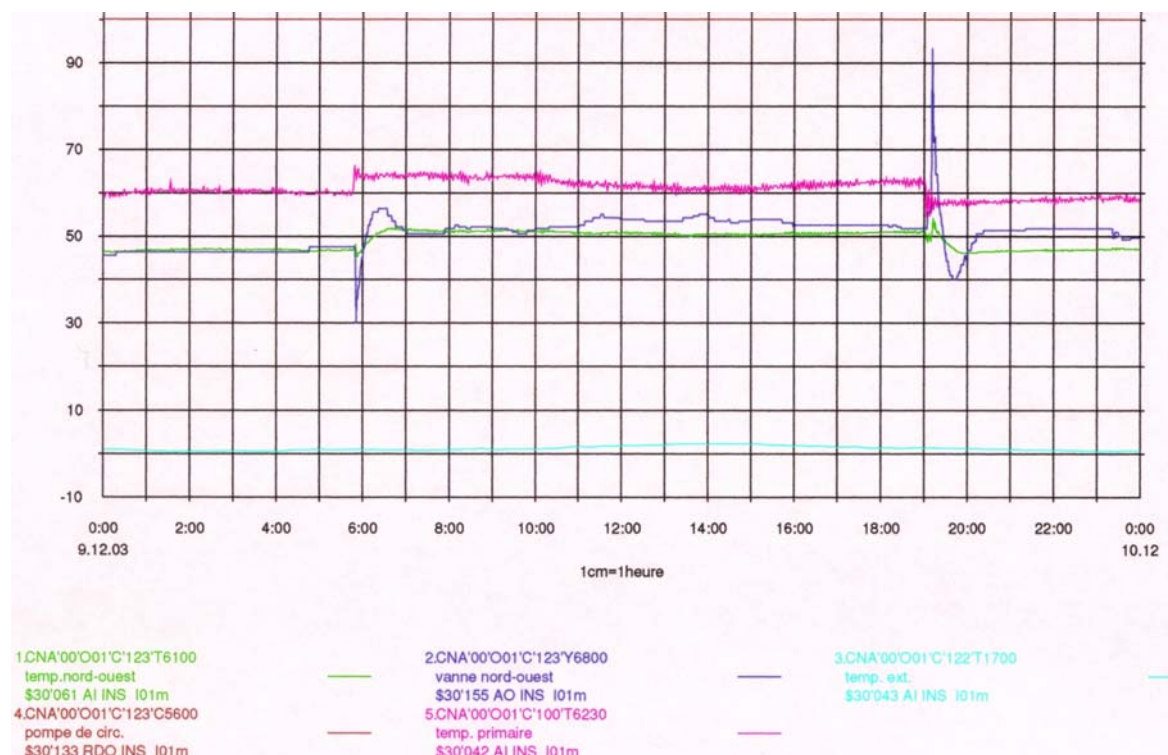
Figur 5 : Wärmeproduktion im CSEM Gebäude JD1

Die Wärmeproduktion, der Heizkreis und die Heizkurve sind in der Figur 4 und in der Figur 5 dargestellt. Die Heizkurve zeigt den Energieverbrauch während einer Heizsaison mittels einer geradlinigen Charakteristik. Dabei wird die Heizleistung in Abhängigkeit der Außentemperatur festgesetzt: bei ( $-6^{\circ}\text{C}$ ) Außentemperatur wird die Vorlauftemperatur auf ( $55^{\circ}\text{C}$ ) festgesetzt; bei ( $18^{\circ}\text{C}$ ) Außentemperatur auf ( $30^{\circ}\text{C}$ ).

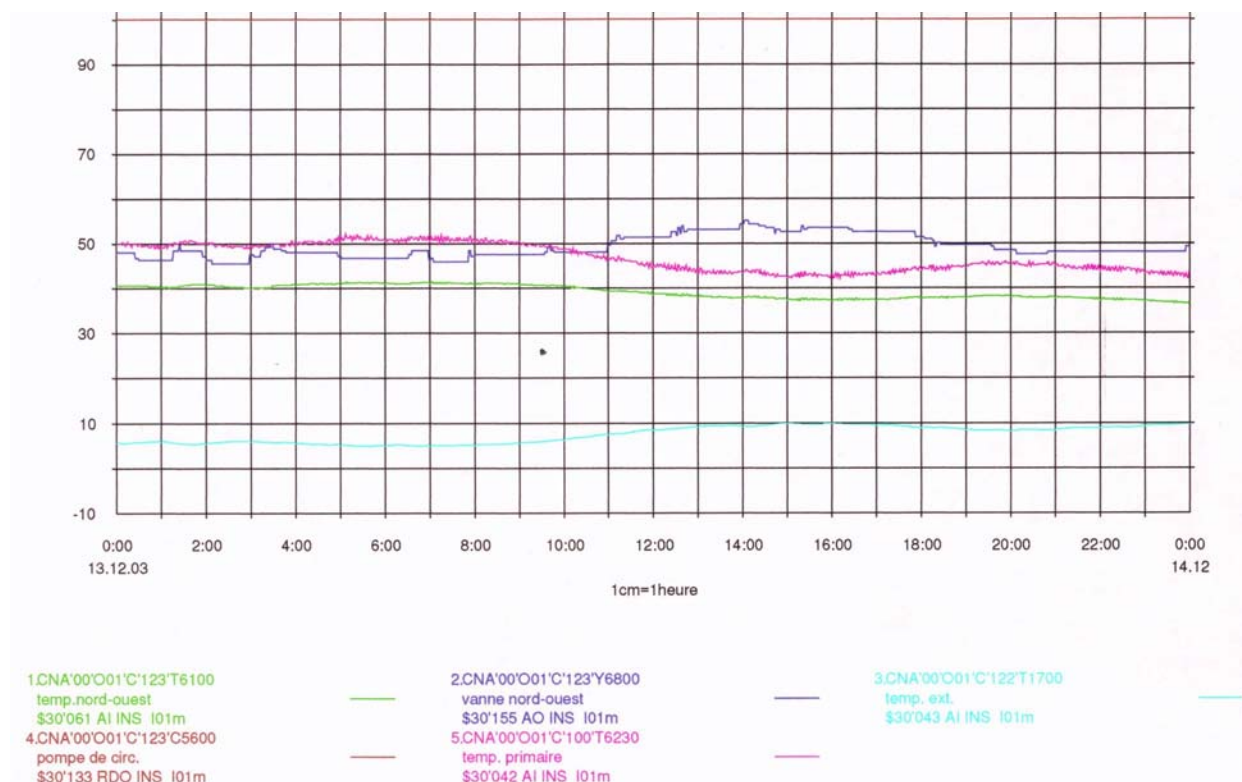
Die Aussen-, Primär- und Vorlauftemperatur des Heizkreises der Referenzzone sind in Figur 6 (Arbeitstag) und in Figur 7 (Wochenende) dargestellt.

Die dem Gebäude zugeführte Heizleistung entspricht dem mittleren Wert der Außentemperatur und nimmt zu, falls die Außentemperatur abnimmt (Figur 7).

Die langsameren Temperaturanstiege und -stürze als beim Testgebäude in Basel belegen, dass das CSEM Testgebäude einem „schwereren“ Gebäude entspricht, d.h. das thermische Verhalten reagiert mit einer größeren Zeitkonstante auf eine Energiezufuhr, respektive einem Energieunterbruch. Beim Testgebäude in Basel handelte es sich um ein Zweifamilien-Wohnhaus auf drei Etagen.



Figur 6: Außen-, Vorlauf-, Primärlauftemperaturen und Ventil für die Nord-West Referenzzone über 24 Stunden (Arbeitstag : Dienstag 9.12.2003)



Figur 7: Außen-, Vorlauf-, Primärlauftemperaturen und Ventil für die Nord-West Referenzzone über 24 Stunden (Wochenende : Samstag 13.12.2003)

## 4.2 Neurobat-Regler

Das vom Schweizerischen Elektronik- und Mikrotechnikzentrum (CSEM) im Auftrage des Bundesamts für Energie (BFE) entwickelte Heizungsregelsystem Neurobat ist prädiktive und basiert auf neuronalen Netzwerken.



*Bild 7 NEUROBAT-Heizungsregler-Prototype*

Basis eines optimalen Regelkonzeptes ist eine repräsentative mathematische Beschreibung des physikalischen Systems, in diesem Fall des thermischen Verhaltens des Gebäudes. System-Gleichungen von thermischen Systemen tendieren jedoch höchst nicht-linear zu sein und weisen bilinearen Terme auf, die durch künstliche neuronale Netzwerke (KNN) beschrieben werden können. KNN funktionieren im Sinne von «Black Box»-Modellen und benötigen keine a-priori-Kenntnisse des thermischen Verhaltens des Gebäudes oder der gebäudetechnischen Teilsysteme. Sie vermögen jedoch Schlüsselinformationen und nicht lineare Charakteristiken innerhalb eines multidimensionalen Informationsraum zu extrahieren. Ein weiterer Vorteil ist ihre Fähigkeit, auf überparametrisierten Systemen angewendet werden zu können, wobei Daten von untergeordneter Bedeutung vernachlässigt und die Eingänge mit wichtigen Systemeigenschaften gewichtet werden [4].

Eine weitere bedeutende Eigenschaft eines optimalen Regelkonzeptes ist seine zu mini- oder maximisierende Kostenfunktion (oder Leistungsindex). Optimal Regelkonzepte, die dynamische Prozesse berücksichtigen, bestehen meist aus einer integrierenden Kostenfunktion, da der Leistungsindex über ein Zeitintervall optimiert werden muss. Normalerweise bestehen Kostenfunktionen aus zwei Termen, wobei der erste Term die Leistungskomponenten innerhalb des Systems repräsentiert und der zweite dazu verwendet wird, die Systembedingungen zu beschreiben, bzw. die Systemvariablen möglichst nahe am Sollwert zu halten.

Die für den Neurobat-Heizungsregler verwendete Kostenfunktion berücksichtigt sowohl die Energiekosten, die dem Energieverbrauch entsprechen, als auch die sogenannten «Komfortkosten», falls die Raumtemperatur nicht dem Sollwert entspricht. Das Ziel des optimalen Regelkonzeptes ist es, die optimale Leistungskurve zu bestimmen, so dass mit einem minimalen Energieverbrauch ein optimaler thermischer Benutzerkomfort resultiert [5].

Damit ein optimales Management der vorhandenen Freiwärme gewährleistet werden kann, muss das thermische Verhalten des Gebäudes als ein passives Klimasystem angesehen werden, das versucht, mittels der für die Regelung der Raumtemperatur verwendeten Freiwärme den Energieverbrauch des Gebäudes zu reduzieren. Zwar reicht die Freiwärme nicht immer aus, um den gewünschten Benutzerkomfort innerhalb eines Gebäudes zu gewährleisten, doch kann sie vorteilhaft zur Energiespeicherung innerhalb der Mauern benutzt werden. Dies erfordert jedoch ein Regelsystem, das



in der Lage ist, das zukünftige thermische Verhalten des Gebäudes vorherzusagen. Das Regelsystem muss anhand der Vorhersage der Raumtemperaturen und des Klimas – v.a. der Sonneneinstrahlung und der Außentemperatur [6] – die Steuerparameter antizipieren.

Der Neurobat Heizungsregler basiert auf der Optimierung einer Kostenfunktion über einen vordefinierten Zeithorizont unter Verwendung von KNN.

**Figur 8** zeigt das Blockdiagramm der prädiktiven Optimierung der Kostenfunktion des Neurobat-Reglers. Wie bei fortgeschrittenen herkömmlichen Zentralheizungsregelsystemen stehen dem Neurobat-Regler Außen-, Raum-, Vorlauf- und Rücklauftemperatur sowie Sonneneinstrahlung als Sensorsignale zur Verfügung.

Nachfolgend werden die Regelmodule des aus einem untergeordneten Hilfsregelkreis und einem übergeordneten Hauptregelkreis bestehenden Neurobat-Heizungsreglers erläutert.

- Das Gebäudemodul bildet das Gebäudeverhalten ab, welches auf Grund der Prädiktion der Klimadaten, der aktuellen Raumtemperatur und der Heizleistung das zukünftige thermische Verhalten des Gebäudes vorhersagt.
- Das Klimamodul errechnet die «Wettervorhersage» mittels der aktuellen Messwerte der Außentemperatur und der Sonneneinstrahlung über einen vordefinierten festen Zeithorizont.
- Ein zusätzliches Modul bildet das Benutzerverhalten und die Komforteinstellungen ab und bildet die Schnittstelle zwischen Benutzereingabe und Regelalgorithmus.
- Das Modul der Leistungsoptimierung entspricht dem dynamischen Programmieralgorithmus. Es minimiert eine Kostenfunktion (Energieverbrauch, Benutzerkomfort) über einen festen Zeithorizont [5]. Der thermische Komfort wird durch den PMV-Faktor quantifiziert [8]. Die mathematische Gleichung der Kostenfunktion  $J$  zur Berechnung der optimalen Heizleistung lautet dabei

$$J(P_{\text{heat}}, T_{\text{in}}, T_{\text{setpoint}}) = C_{\text{Pheat}} \cdot P_{\text{heat}} + C_{\text{comf}} \cdot (\exp(\text{PMV}(T_{\text{in}}, T_{\text{setpoint}})^2) - 1), \text{ wobei:}$$

$P_{\text{heat}}$  = Heizleistung [W]

$\text{PMV}(T_{\text{in}}, T_{\text{setpoint}})$  = Predicted Mean Vote [-]

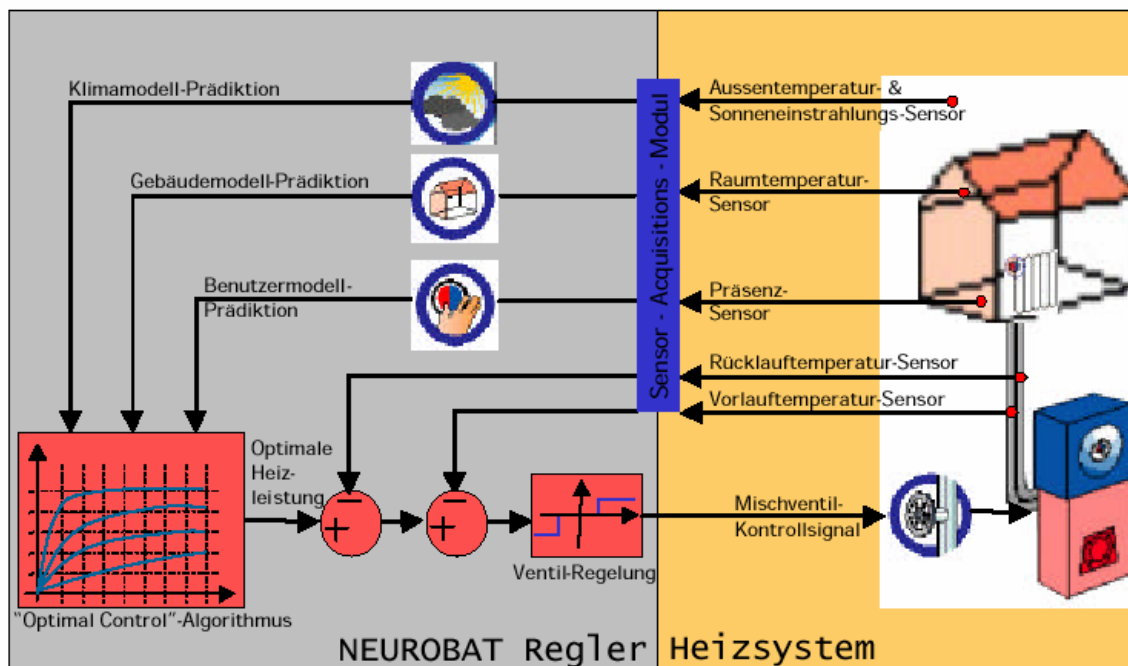
$T_{\text{in}}$  = Raumtemperatur [°C]

$T_{\text{setpoint}}$  = Sollwerttemperatur [°C]

$C_{\text{Pheat}}$  = Heizleistungskoeffizient

$C_{\text{comf}}$  = Komfortkoeffizient

- Das Modul der Ventilsteuerung gewährleistet die Schnittstelle mit herkömmlichen HLK-Anlagen. Die vom Neurobat-Regler errechnete, optimale und zu liefernde Heizleistung wird mittels der aktuellen Rücklauftemperatur in eine nominale Vorlauftemperatur umgerechnet.



Figur 8: Regelkonzept des Neurobat-Heizungsreglers

Die Innovation des Neurobat-Regelkonzeptes beruht nicht nur in der Reduktion des Energieverbrauches unter Anwendung von Neuro-Fuzzy-Technologien, sondern zeichnet sich durch eine markante Vereinfachung der Inbetriebnahmeprozedur aus. Diese umfasst neben der Initialisierung von lediglich vier Serviceparametern die Einstellung von nur zwei Benutzerparameter (Komfortempfinden, Zeitprogramm).

Während oder nach der Inbetriebnahme der HLK-Anlage seitens des Service-Personals oder der Benutzer sind keine weiteren Parameter-Einstellungsoptimierungen erforderlich. Die vorherigen ausgeführten Tests und Simulationen ergeben, dass sich der Neurobat-Regler nach einer Betriebsdauer von drei Wochen optimal an die Regelstrecke adaptiert, wobei er während dieser Adaptionphase eine Betriebseffizienz erzielt, die mit herkömmlichen Heizungsregelsystemen vergleichbar ist.

## 5 Ergebnisse : Analyse der Betriebsverhalten

### 5.1 Datenevaluations-Methoden

Zur Evaluation des NEUROBAT Heizungsreglers wurde seit dem Herbst 2001 in einer Wärmezone des CSEM Gebäudes in Neuchâtel ein Monitoringsystem installiert. 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 thermischen Komforts.

#### Evaluation des thermischen Komforts

Der thermische Komfort wird während der Präsenzzeiten der Benutzer in Relation zum gewünschten Benutzerkomfort evaluiert.

#### Energetische Effizienz

Die Energieverbräuche der Heizzone Nord-Ost (Neurobat-Regler) und der Referenzheizzone Nord-West lassen sich schwierig vergleichen. Da nämlich kein Wärmezähler zur Verfügung steht, kann der Energieverbrauch der Referenzheizzone Nord-West nicht genau bestimmt werden. Die erwartete, während der Phase I des NEUROBAT-Projektes ausgewiesene 10%-ige Energieeinsparung, kann auf diese Weise nicht demonstriert werden. Der gesamte Wärmebedarf des Gebäudes ist zwar bekannt, kann aber nicht auf die Nord-West Heizzone präzise zurückweisen, dass eine Energieeinsparung von 10% erkennbar ist. Der Vergleich des Energieverbrauches des gesamten CSEM Gebäudes vor und nach der Neurobat-Regler-Inbetriebnahme in einer der fünf Wärmezonen, lässt sich glücklicherweise mittels indirekten Methoden durchführen. Es wird angenommen, dass die internen Fremdwärmebeiträge während beider Perioden (99/01 und 01/03) vergleichbar sind.

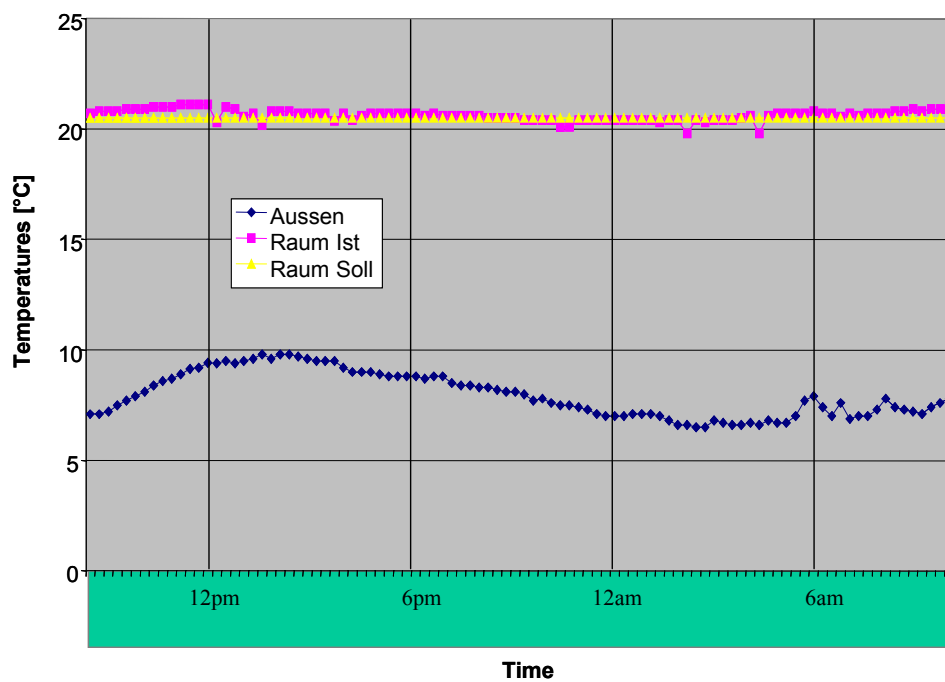
### 5.2 Datenevaluation des Neurobat-Reglers

Die intelligente Lernfähigkeit des Neurobat-Reglers ist durch das folgende Ereignis sehr gut illustriert:

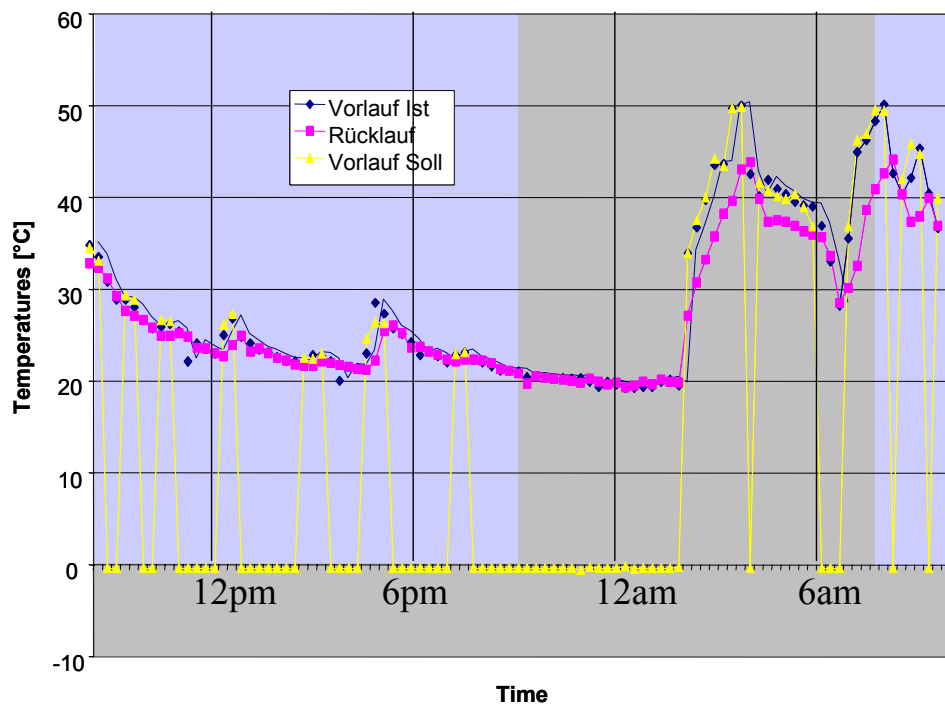
Im Raum, da sich die Innentemperaturmesssonde des Neurobat-Reglers befindet, hat ein Mitarbeiter während der Heizsaison unerwartet bei offenem Fenster gearbeitet. Beschwerden über den Neurobat-Regler wurden zum ersten (und einzigen) Mal von den Mitarbeitern der Nord-Ost Heizzone registriert. Der Raumtemperatursollwert des Neurobat-Reglers wurde weder mit Erfolg noch Folgen betreffend der Vorlauftemperatur mehrmals und erheblich erhöht. Schließlich wurde das offene Fenster bemerkt. Der Neurobat-Regler, im Gegenteil zu allen kommerziellen Heizungsreglern, hatte gelernt, dass es sich nicht lohnt, mit offenem Fenster den Raum zu heizen. Jeder kommerzielle Heizungsregler hätte mit maximaler Leistung geheizt.

Dieser Fall zeigt deutlich die Vorteile des Neurobat-Reglers betreffend energetischem Sparpotential.

In der Figur 9 sind Raum-, Aussen- und Sollwerttemperatur dargestellt. Figur 10 zeigt die gemessenen Vorlauf- und Rücklauftemperaturen sowie die berechnete Vorlauftemperatur als Referenz. Die Komfortperiode (6 Uhr bis 22 Uhr) ist durch die graue Schattierung markiert. Das Verhalten der Vorlauftemperatur unterstreicht den prädiktiven Charakter des Neurobat-Regelalgorithmus. Mittels eines antizipierenden und stetig steigenden Heizleistungsschubs vor Beginn der Benutzerpräsenzzeit kann der thermische Komfort gewährleistet werden, und mit dem Herunterfahren der Heizleistung zur Mittagszeit können Überheizwerte in der Nachmittagszeit vermieden werden, da die vorhandene Freiwärme für das Beheizen der Büros ohne Komfortverlust ausreicht.



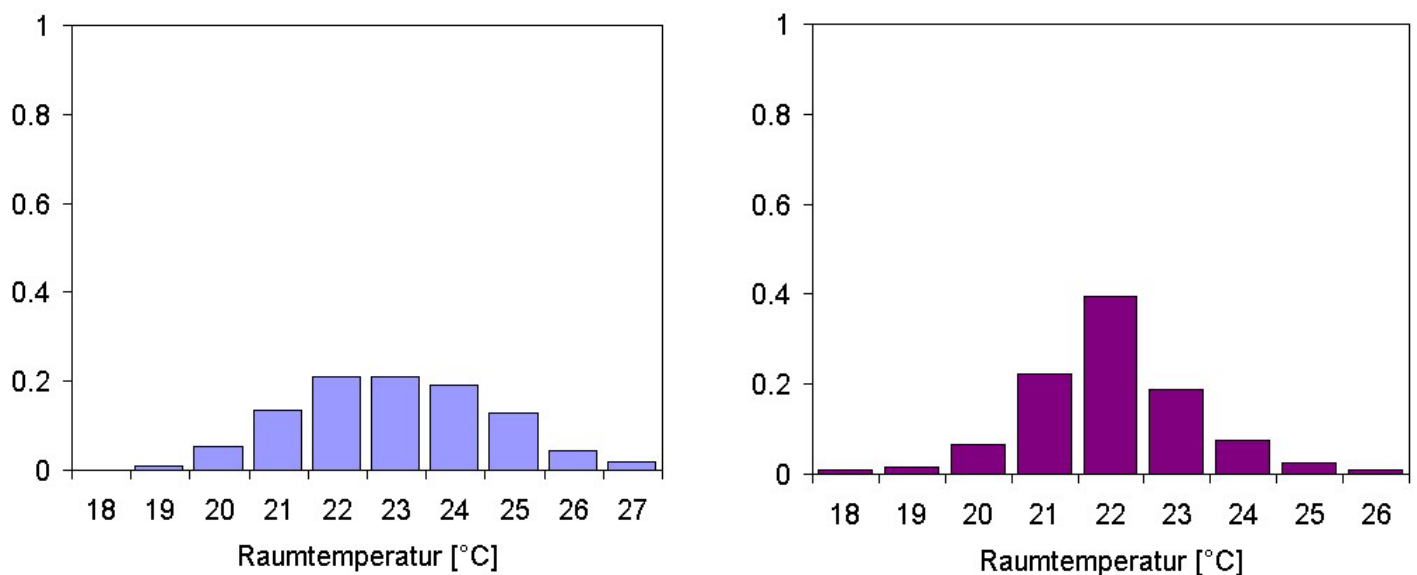
Figur 9 : Raum-, Aussen- und Sollwerttemperatur



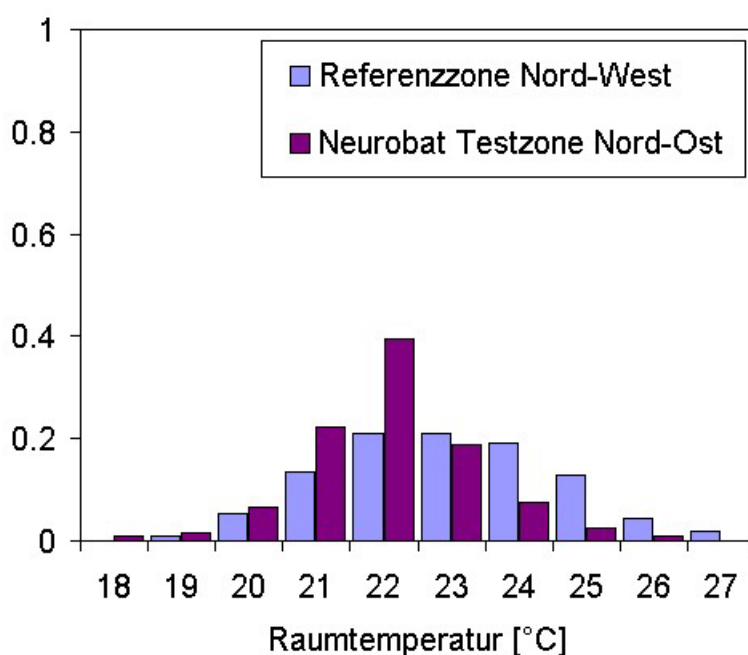
Figur 10 : gemessenen Vorlauf- und Rücklauftemperaturen sowie die berechnete Vorlauftemperatur als Referenz. Die Komfortperiode (6 Uhr bis 22 Uhr) ist durch die graue Schattierung markiert.

### 5.3 Betriebsvergleich bezüglich thermischen Komfort

In der Referenzzone Nord-West sind die Regelparameter des kommerziellen Heizungsreglers kontinuierlich durch einen Experten geändert, der die Funktionalitäten des Reglers und das thermische Verhalten des Gebäudes kennt. In der Praxis wird ein entsprechendes Niveau der Parameteranpassung auch für moderne, kommerzielle Heizungsregler nicht erreicht, jedoch sind nicht vernachlässigbare Energieeinsparungen und ein optimaler Komfort nur erreichbar, falls die Regelparameter automatisch und kontinuierlich angepasst würden. Dies entspricht daher einer idealen Vergleichsbasis für den Neurobat-Heizungsregler, der ohne Parametrisierung (Plug-and-Play-Prinzip) während der Heizsaison 2002/2003 getestet wurde.



Figur 11 Histogramm der Raumtemperaturen. Kommerzieller Heizungsregler (Graphen links), NEUROBAT Prototyp mit Raumsollwert von 22°C (Graphen rechts).

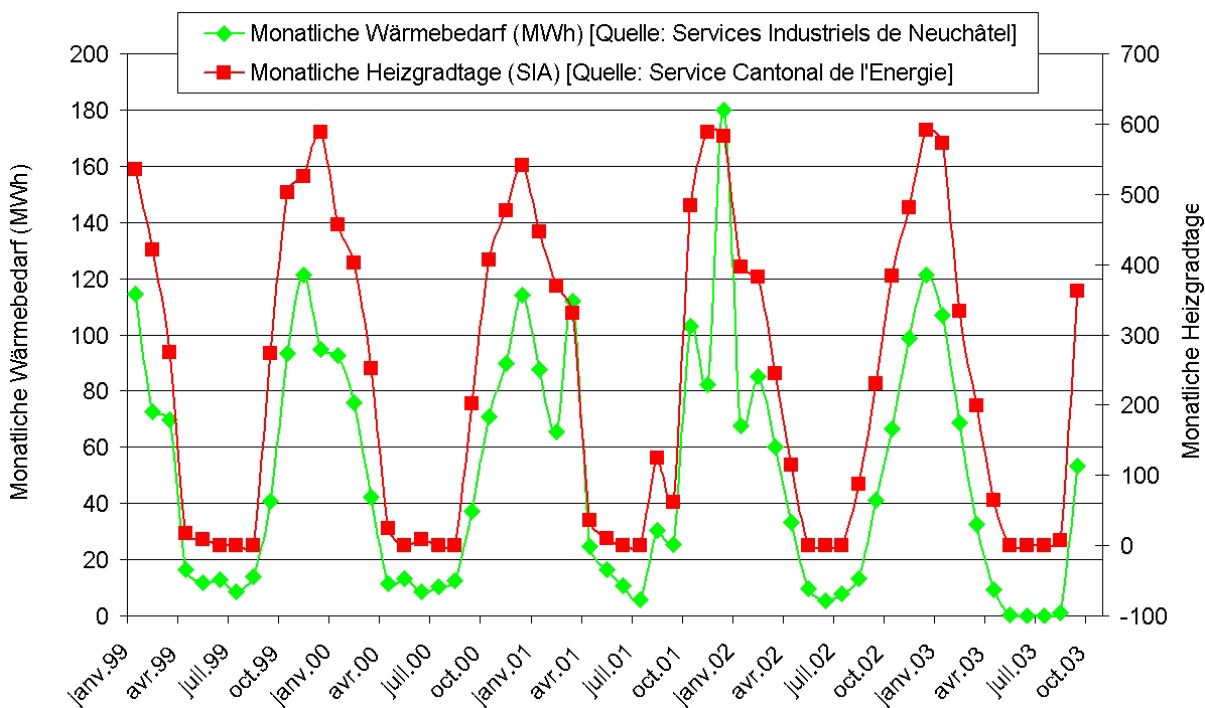


Figur 12 Vergleich des Histogramms der Raumtemperaturen

Die **Figur 12** illustriert die Quantifizierung des Komforts während der Heizperiode (2002-2003) im Vergleich. Das Diagramm zeigt die während der Heizsaison gemessene durchschnittliche Raumtemperatur (Sollwert: 22°C), wobei das Zeitprogramm der Heizungsregler einer Anwesenheit von 6 bis 22 Uhr an Wochentagen und einer Abwesenheit an Wochenenden (Bürozeiten-Zeitprogramm) entspricht. Der Neurobat-Heizungsregler zeigt eine Kumulierung der Raumtemperaturen um den Sollwert und – verglichen mit dem kommerziellen Heizungsregler – eine Reduktion der Überheizwerte. Der Vergleich der Komfortdaten in der **Figur 12** bestätigt ein verbessertes Management der passiven Energie (Sonnenenergie, Abwärme) des Neurobat-Reglers. Mittels der neuronalen Prädiktionsmodule ist der Regler in der Lage, den geforderten Komfort zu antizipieren und diesen mittels der Freiwärme energiesparend zu erhalten. Dies führt zu einer markanten Reduktion der Überheizwerte (ersichtlich mit einer Häufung der gemessenen Raumtemperaturen um den Sollwert für den Neurobat-Heizungsregler) einerseits und des Energieverbrauches andererseits.

## 5.4 Betriebsvergleich bezüglich Energetische Effizienz

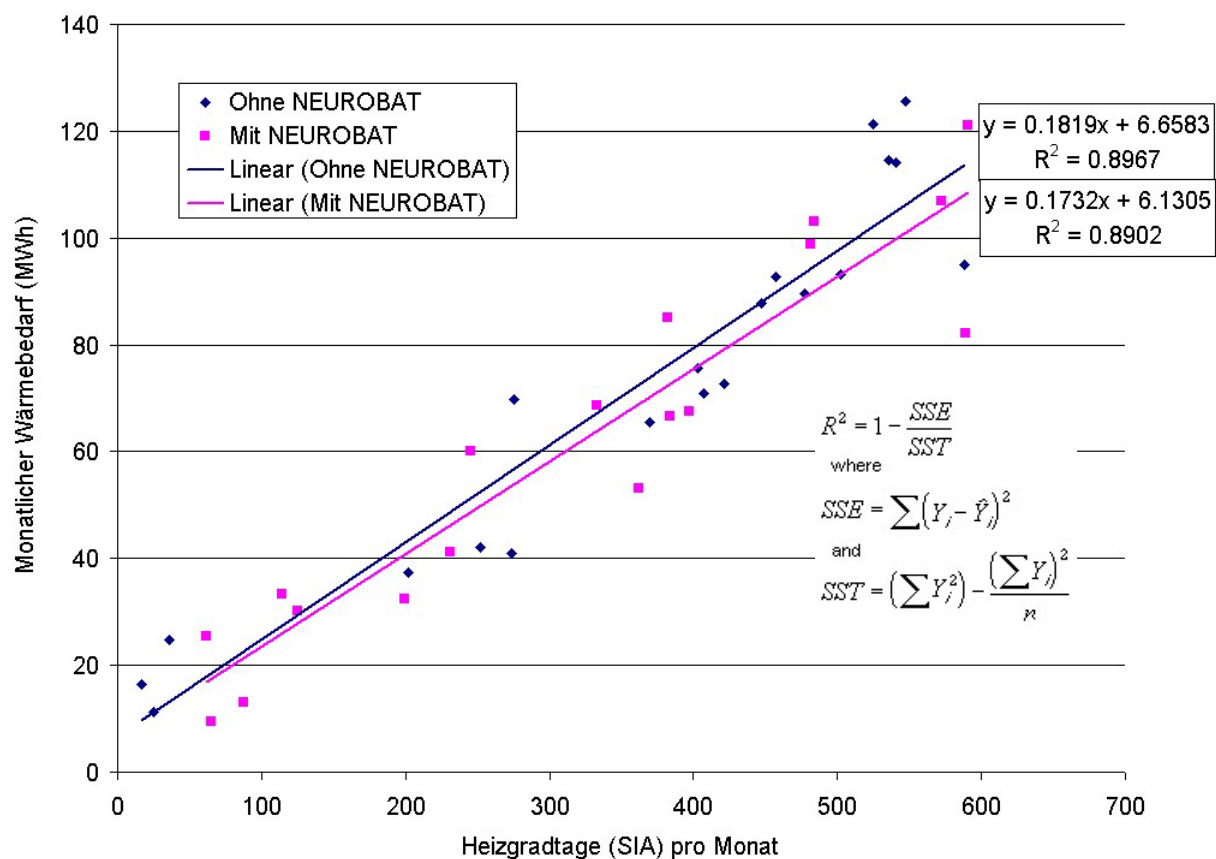
Die **Figur 13** bildet den Energieverbrauch des gesamten CSEM Gebäudes JD1 über 5 Jahre auf (vom Januar 1999 bis Oktober 2003). Die monatlichen Heizgradtage in Neuchâtel (Quelle: Service Cantonal de l'Energie) werden als Referenz für den Wärmebedarf dargestellt. Der Heizgradtag ist eine empirische Einheit, welche die tägliche Temperaturdifferenz (in Grad Celsius, Fahrenheit usw.) zwischen einer Benutzungstemperatur und der tagesmittleren Aussentemperatur – wenn diese unter die Bezugstemperatur sinkt – zum Ausdruck bringt. Heizgradtagzahlen werden zur Bestimmung des Wärmebedarfs von Gebäuden herangezogen.



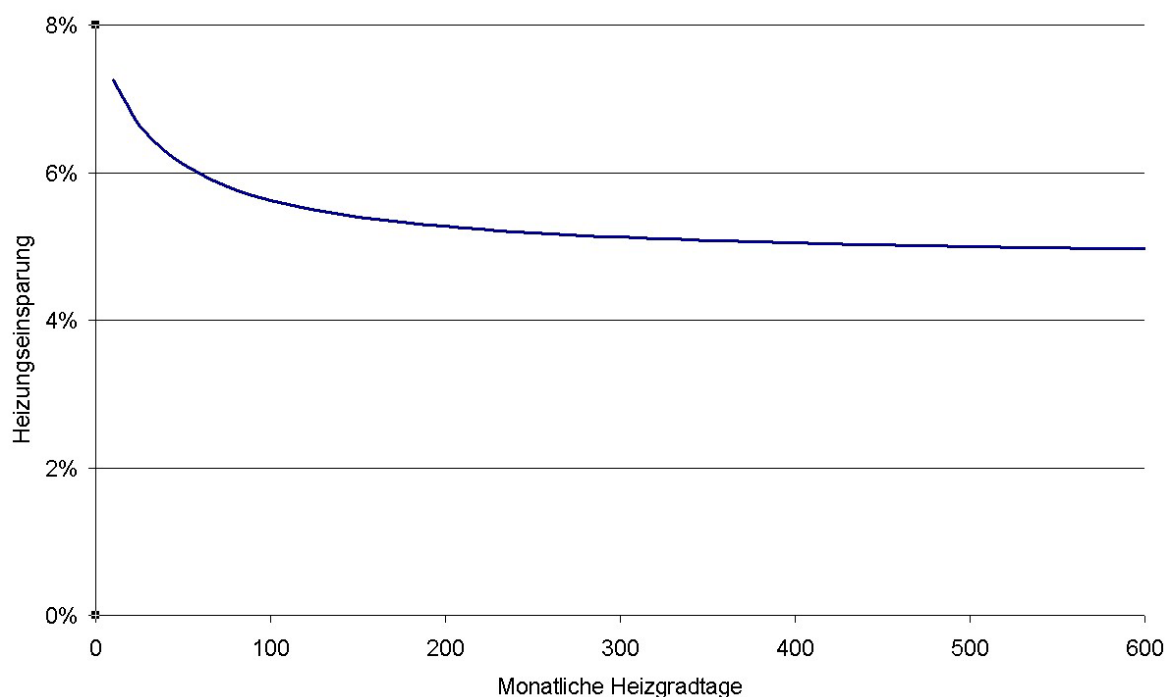
Figur 13 : Monatliche Heizgradtage in Neuchâtel und Wärmebedarf des gesamten CSEM JD1 Gebäudes über die letzten 5 Jahre.

Beide Energieverbräuche und monatlichen Heizgradtage sind in der **Figur 14** im Verhältnis abgebildet, wobei die Ausreisser vom Januar 2002 und April 2001 und die niedrigsten Daten nicht berücksichtigt worden sind. Die Daten wurden außerdem zeitlich aussortiert, um ohne und mit dem Neurobat-Heizungsregler unterscheiden zu können. Die lineare Regression zeigt deutlich eine Energieeinsparung nach der Inbetriebnahme des Neurobat-Heizungsreglers. Die guten  $R^2$  Werte beweisen die guten Anpassungen der zwei Regressionen auf die Daten.

Die Energieeinsparung als Funktion der monatlichen Heizgradtage ist in der Figur 15 dargestellt. Sie beträgt etwa 5%. Erkennbar ist, dass bei niedrigen Heizgradtagen der Neurobat-Regler Einfluss größer ist. Wie in der Neurobat-Studie bereits erklärt, zeigt sich das Sparpotential des Neurobat-Reglers noch wesentlich in den Zwischensaisons, die genau niedriger Heizgradtage entsprechen.



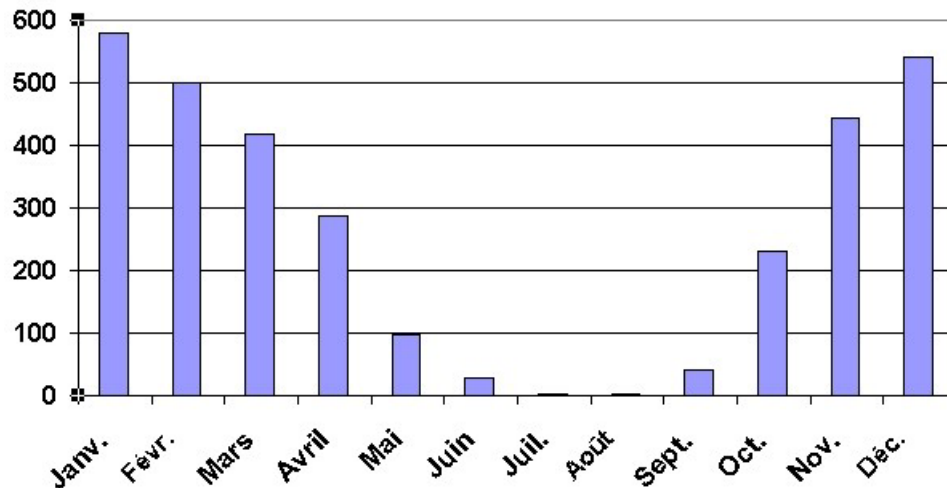
Figur 14 : Wärmebedarf des gesamten CSEM JD1 Gebäudes als Funktion der monatlichen Heizgradtage in Neuchâtel vor (1999-2001) und nach (2001-2003) des Einsatzes des Neurobat-Heizungsregler in der Nord-Ost Heizzone.



Figur 15 : Energieeinsparung als Funktion der monatlichen Heizgradtage

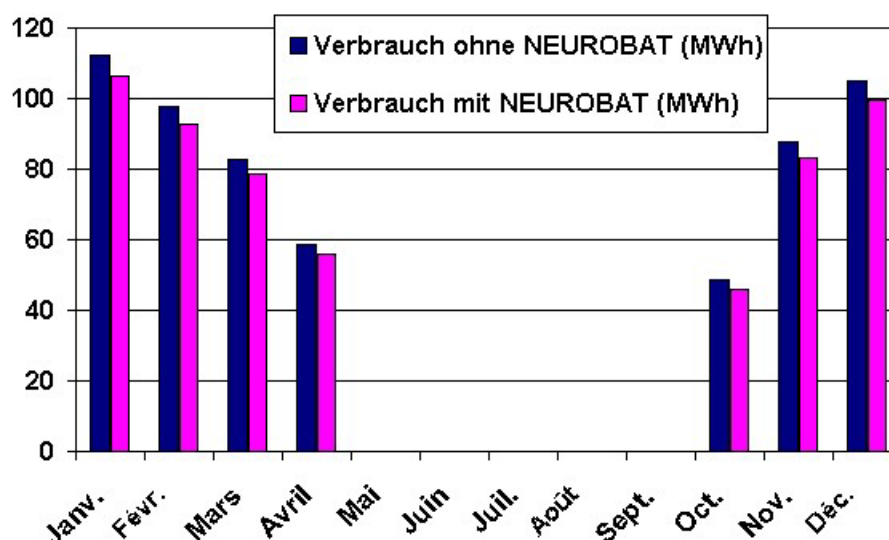


Aus den Daten der letzten 23 Jahre (Quelle: Service Cantonal de l'Energie) werden für Neuchâtel die durchschnittlichen Heizgradtage pro Monat berechnet. Die Werte sind in der **Figur 16** dargestellt.



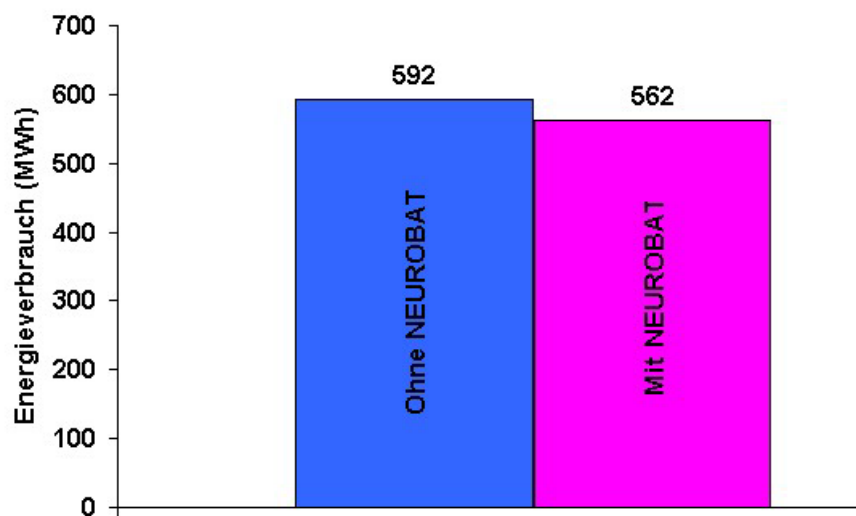
Figur 16 : Durchschnittliche Heizgradtage in Neuchâtel (1980-2003)

Aus den durchschnittlichen Heizgradtagewerten der Heizsaison (Oktober bis April) kann aus den linearen Modellen der **Figur 14** Energieverbräuche berechnet werden, die in der **Figur 17** dargestellt sind. Sie entsprechen dem Fall des CSEM Gebäudes JD1 in Neuchâtel, wo die Nord-Ost Wärmezone von dem Neurobat Heizungsregler gesteuert wird.



Figur 17 : Energieverbräuche aus den durchschnittlichen Heizgradtagewerten der Heizsaison und den linearen Modellen der Figur 14

Der Vergleich der Summe beider Verbräuche zeigt ein durchschnittliches Sparpotential, in dem Fall des CSEM Gebäudes JD1 in Neuchâtel, wo die Nord-Ost Wärmezone von dem Neurobat Heizungsregler gesteuert wird, von 5% (**Figur 18**).

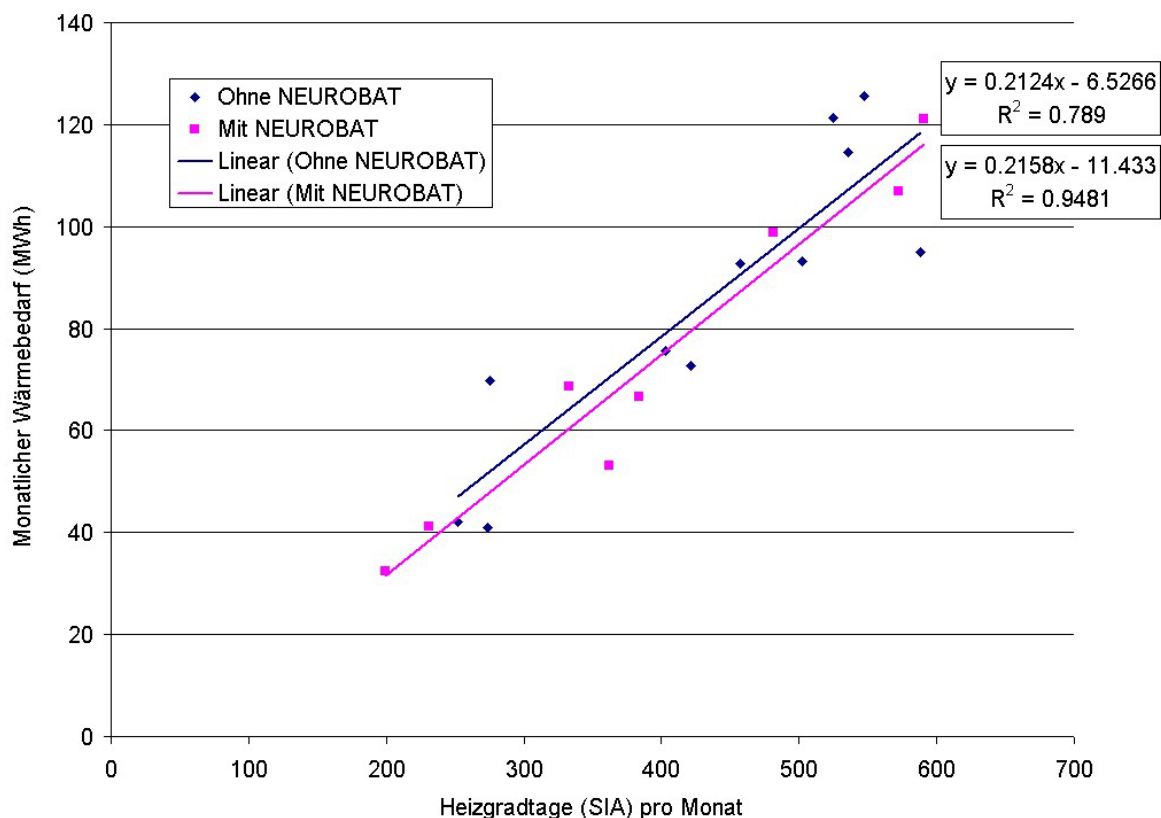


Figur 18 : Vergleich des Energieverbrauchs für eine durchschnittliche Heizsaison. Mittels Einsatz des Neurobat-Heizungsreglers in der Wärmezone Nord-Ost des CSEM Gebäude JD1 in Neuchâtel resultiert eine globale Energieeinsparung von 5%.

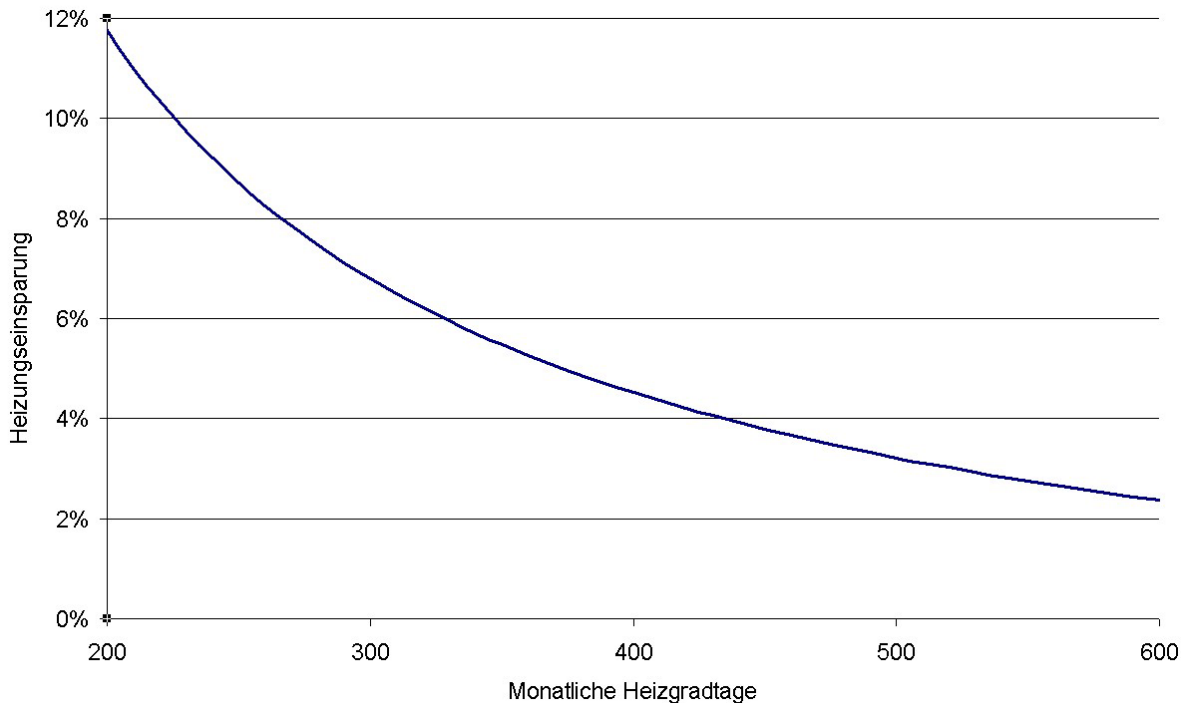
### Genauigkeitskonzern

Die Genauigkeit des gefundenen Wertes lässt sich schwierig bestimmen.

In einem zweiten Schritt werden nur die Heizsaisons 1999-2000 und 2002-2003 berücksichtigt. Die Heizsaisons 2000-2001 und 2001-2002 werden wegen der Ausreißer nicht berücksichtigt. Denkbar ist, dass ein Teil des Verbrauches eines Monats auf einem anderen fehlerhaft addiert worden ist. Der Vorteil ist hiermit mit vernünftigeren Messdaten zu arbeiten. Die Genauigkeit wird damit verbessert. Der Nachteil dabei ist, mit weniger Messdaten zu arbeiten, was aus der Sicht der Statistik die Genauigkeit verschlechtert.



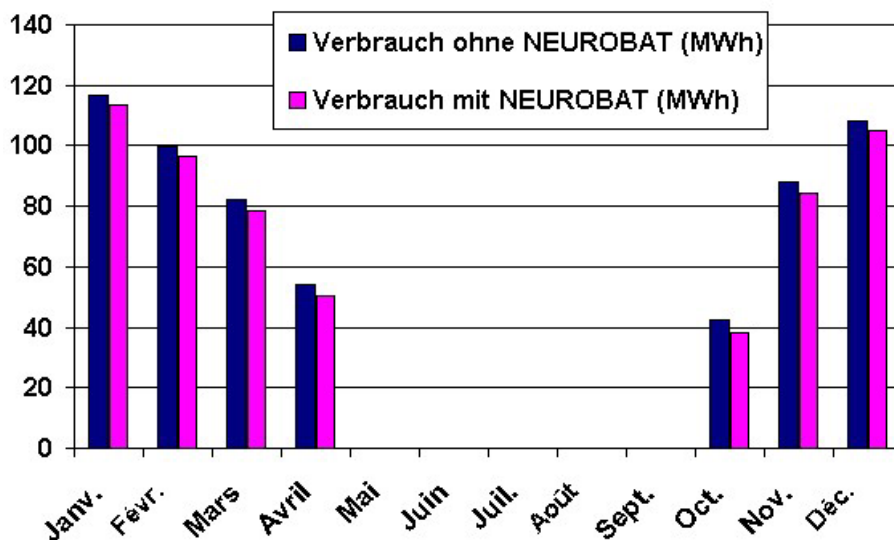
Figur 19 : Wärmebedarf des gesamten CSEM JD1 Gebäudes als Funktion der monatlichen Heizgradtage in Neuchâtel vor (1999-2000) und nach (2002-2003) dem Einsatz des Neurobat-Heizungsregler in der Nord-Ost Heizzone



Figur 20 : Energieeinsparung als Funktion der monatlichen Heizgradtage

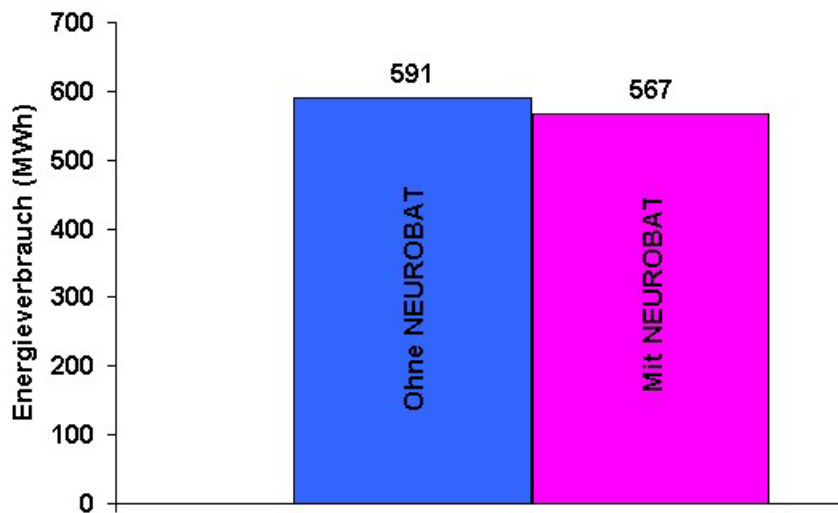
Der Energieverbrauch und die monatlichen Heizgradtage sind für diesen Fall in der **Figur 19** im Verhältnis abgebildet.

Die Energieeinsparung als Funktion der monatlichen Heizgradtage ist in der **Figur 20** dargestellt. Noch deutlicher ist hier, dass bei niedrigen Heizgradtagen, die der Zwischensaison entsprechen, das Neurobat-Regler Sparpotential größer ist.



Figur 21 : Energieverbrauch aus den durchschnittlichen Heizgradtagewerten der Heizsaison und den linearen Modellen der Figur 19

Aus den durchschnittlichen Heizgradtagewerten der Heizsaison (Oktober bis April) der **Figur 16** werden jetzt aus den linearen Modellen der **Figur 19** Energieverbräuche berechnet, die in der **Figur 21** dargestellt sind.



*Figur 22 : Vergleich des Energieverbrauchs für eine durchschnittliche Heizsaison. Mittels Einsatz des Neurobat-Heizungsreglers in der Wärmezone Nord-Ost des CSEM Gebäude JD1 in Neuchâtel resultiert eine globale Energieeinsparung von 4%. (Modell basiert nur noch auf die Heizsaisons 1999-2000 und 2002-2003)*

Der Vergleich der Summe beider Verbräuche zeigt ein durchschnittliches Sparpotential, in dem Fall des CSEM Gebäudes JD1 in Neuchâtel, wo die Nord-Ost Wärmezone von dem Neurobat Heizungsregler gesteuert wird, in diesem Fall 4% (**Figur 22**).

Dieser Wert korreliert mit dem vorherigen Sparpotential von 5%, berechnet mit mehr, obwohl eventuell leicht ungenauen Daten,

## 6 Schlussfolgerung und Ausblick

### 6.1 Schlussfolgerung

Die Pilotinstallation des Neurobat-Heizungsreglers Prototyps in der Wärmezone Nord-Ost des CSEM Gebäudes JD1 ist ein technischer Erfolg :

- Der größte Erfolg besteht darin, dass der Neurobat-Heizungsregler die Wärmezone Nord-Ost des CSEM Gebäudes JD1 seit zwei Jahren steuert. Er funktioniert störungsfrei und es ist nicht vorgesehen, zu dem kommerziellen Regler zurückzukommen.
- Der direkte Vergleich mit der Referenzzone Nord-West zeigt, dass der thermische Komfort durch den Neurobat-Regler verbessert wird.
- Der Vergleich mit der Referenzzone Nord-West betreffend des Energieverbrauchs ist auf direkte Weise nicht möglich. Die Studie des Energieverbrauchs für das ganze Gebäude, gewichtet mit den monatlichen Heizgradtagen, zeigt ein Energieeinsparungspotential von 4 oder 5% (für ein durchschnittliches Jahr in Neuchâtel) nach der Inbetriebnahme des Neurobat-Reglers in der Wärmezone Nord-Ost. Eine Abschätzung der Energieeinsparung für eine Wärmezone ist nicht möglich. Es kann kein quantitativer Schluss über die Anwendung eines Neurobat-Reglers für das ganze Gebäude gezogen werden. Trotzdem ist eine messbare Energieeinsparung zu erwarten.

Eine genauere Messmethode würde eine Kommutierung der Heizungsregelsysteme mittels eines eingebauten Schalters benötigen, um einen fairen Vergleich der Betriebsdaten der beiden Heizungsregelsysteme zu ermöglichen.

### 6.2 Ausblick

Für die Kontaktaufnahme zu industriellen Partnern hat diese Pilot-Installation beste Dienste geleistet denn Ziel ist die Kommerzialisierung des NEUROBAT-Konzeptes. Nach 3 Jahren, trotz zusätzlichen Investitionen seitens des CSEM, wurde das Ziel, das Regelkonzept zu kommerzialisieren, nicht erreicht. Erfolgsversprechende Kontakte mit fünf verschiedenen Industriefirmen sind schlussendlich alle an einer zögernden Investitionsbereitschaft gescheitert: das Konzept und die Resultate haben alle potentiellen Partner überzeugt, doch ist man generell nicht bereit, in energiesparende Technologien zu investieren, sondern setzt auf das Marktpotential der produktions-kostengünstigen "low-cost" Lösungen.

## Referenzen

- [1] 'NEUROBAT - Final Report', J. Krauss, M. Bauer, M. El-Khoury, N. Morel, BfE Schlussbericht No. 51'565, Neuchâtel, 23. März 1998.
  
- [2] 'NEUROBAT II - Schlussbericht', J. Krauss, M. Bauer, J. Bichsel, N. Morel, BfE Schlussbericht No. 29083, Neuchâtel, 27. September.2000