

Modellbasierte Methoden für die Fehlererkennung und Optimierung im Gebäudebetrieb

Endbericht

TAG – ChN/DJ – II-01



Bearbeiter:

Christian Neumann

Dirk Jacob

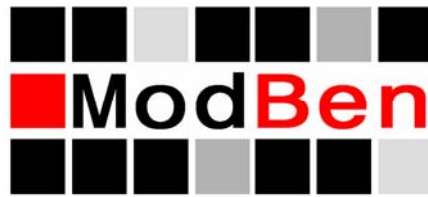
Sebastian Burhenne

Anthony Florita

Eberhard Burger

Fritz Schmidt

Freiburg Juli 11



ModBen
**Modellbasierte Methoden für die Fehlererkennung und
Optimierung im Gebäudebetrieb**

wurde durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) im
Rahmen des Programms EnOB - Energieoptimiertes Bauen gefördert

“EnOB – Energieoptimiertes Bauen”

“EnBOP – Energetische Betriebsoptimierung”

Förderkennzeichen: 0327410A-C



LISTE DER AUTOREN:

Fraunhofer ISE:

Christian Neumann
Dirk Jacob
Sebastian Burhenne
Nicolas Réhault
Susanne Komhard †
Sebastian Dietz

ennovatis

Fritz Schmidt

HSG Zander

Eberhardt Burger

University of Colorado Boulder

Gregor Henze
Anthony Florita

Inhalt

ZUSAMMENFASSUNG	1
1. EINLEITUNG	5
2. PRAXIS DES GEBÄUDEBETRIEBS	7
2.1. Übliche Praxis	7
2.2. Continuous Commissioning - Kontinuierliche Betriebsüberwachung	9
3. ZIELE UND STRUKTUR VON MODBEN	12
3.1. Ziele des Projekts	12
3.2. Arbeitsplan	13
3.3. Team	13
3.3.1. Kurzvorstellung Fraunhofer ISE (www.ise.fraunhofer.de)	13
3.3.2. Kurzvorstellung ennovatis (www.ennovatis.de)	14
3.3.3. Kurzvorstellung HSG Zander	14
4. MODELLBASIERTE METHODEN IM GEBIET FED UND OPTIMIERUNG	15
4.1. Unterscheidung FED und Optimierung	16
4.1.1. Fehlererkennung und -Diagnose (FED)	16
4.1.2. Optimierung	17
4.1.3. FED und Optimierung als Prozess	19
4.2. Modelle	20
4.2.1. Kalibrierung von Modellen	22
4.2.2. White-Box-Modelle	24
4.2.3. Black-Box Modelle	27
4.2.4. Gray-Box Modelle	35
4.2.5. Übersicht der Eigenschaften der Modelle	38
4.2.6. Werkzeuge zur Modellerstellung für Gebäude und Anlagen	39
5. FEHLERERKENNUNG UND -DIAGNOSE	42
5.1. Klassifizierung der Methoden	43
5.1.1. Fehlererkennung	43
5.1.2. Fehlerdiagnose	45
5.2. FED im Bereich Gebäudetechnik	46
5.2.1. Literaturrecherche	46
5.2.2. IEA ECBCS Annexe	48
5.2.3. Marktverfügbare FED Produkte	51

5.3.	Zusammenfassung	53
6.	OPTIMIERUNG	55
6.1.	Optimierungsmethoden	55
6.1.1.	General Pattern Search GPS	57
6.1.2.	Particle Swarm Algorithmus (PSA) Algorithmus	59
6.1.3.	Evolutionary Algorithmus (GA Genetic Algorithm)	60
6.1.4.	Simplex Algorithmus von Nelder Mead	63
6.1.5.	Newton Verfahren	63
6.1.6.	Weitere Optimierungsverfahren	65
6.1.7.	Zusammenfassung	65
6.2.	Arten der Anwendung von Optimierung	67
6.2.1.	Offline-Optimierung	68
6.2.2.	Online-Optimierungen	70
6.3.	Fazit	71
7.	ÜBERBLICK DER METHODIK IN MODBEN	73
7.1.	Allgemeine Systematik	73
7.2.	Mindestdatensatz	75
7.3.	Performance Metrics	76
7.3.1.	Allgemeine Definition	77
7.3.2.	Referenzwerte	78
7.4.	Messdatenerfassung	79
8.	ANSÄTZE UND WERKZEUGE IN MODBEN	80
8.1.	Demonstrationsgebäude	80
8.1.1.	DVZ Barnim	83
8.1.2.	ennovatis Großpösna	84
8.1.3.	EADS Ottobrunn	86
8.1.4.	Ludwig Erhard Haus Berlin	87
8.1.5.	Kraft Foods München	88
8.2.	Stufe 1 – Benchmarking	91
8.2.1.	Begründung für den Ansatz	91
8.2.2.	Beschreibung	91
8.2.3.	Implementierung	91
8.2.4.	Beispiel / Evaluation in den Demonstrationsgebäuden	92

8.3.	Stufe 2 - Datenerhebung / Ermittlung Zielwert	94
8.3.1.	Begründung für den Ansatz	94
8.3.2.	Beschreibung	94
8.3.3.	Implementierung	95
8.3.4.	Beispiel / Evaluation in den Demonstrationsgebäuden	97
8.4.	Stufe 3a - Das Datenhandling tool "datastorage"	100
8.4.1.	Begründung für den Ansatz	100
8.4.2.	Beschreibung	100
8.4.3.	Implementierung	101
8.4.4.	Beispiel / Evaluation in den Demonstrationsgebäuden	101
8.5.	Stufe 3a - Manuelle FED über intelligente Visualisierung	101
8.5.1.	Begründung für den Ansatz	101
8.5.2.	Beschreibung	102
8.5.3.	Visualisierung Verbrauch	106
8.5.4.	Visualisierung Heiz-/Kühlkreise	115
8.5.5.	Visualisierung Lüftungsanlagen	124
8.5.6.	Implementierung	132
8.5.7.	Beispiel / Evaluation in den Demonstrationsgebäuden	132
8.6.	FED mit Simulation bzw. Modellierung ausgewählter Subsysteme	136
8.6.1.	Begründung für den Ansatz	136
8.7.	Stufe 3a - FED auf Ebene Gesamtgebäude mit probabilistischen Methoden	142
8.7.1.	Begründung für den Ansatz	142
8.7.2.	Beschreibung	144
8.7.3.	Implementierung	147
8.7.4.	Beispiel / Evaluation in den Demonstrationsgebäuden	150
8.8.	Stufe 3b - Optimierung mit Simulation des Gesamtgebäudes	159
8.8.1.	Begründung für den Ansatz	159
8.8.2.	Beschreibung	159
8.8.3.	Implementierung	160
8.8.4.	Beispiel / Evaluation in den Demonstrationsgebäuden	163
8.9.	Stufe 4 - Ausreißerdetektion mit Black Box Modellen	169
8.9.1.	Begründung für den Ansatz	169
8.9.2.	Beschreibung	170

8.9.3.	Implementierung	173
8.9.4.	Beispiel / Evaluation in den Demonstrationsgebäuden	173
8.10.	Kontinuierliche Betriebsanalyse mit den Werkzeugen von ennovatis	174
8.10.1.	Begründung für den Ansatz	174
8.10.2.	Beschreibung (Überblick)	174
8.10.3.	Vom Energiebedarf zu Energiekosten.	174
8.10.4.	Vom Sensor zur Auswertung	176
8.10.5.	Das Datenmanagement	178
8.10.6.	Datenformat für Messungen und Simulation	178
8.10.7.	Visual Data Analyser VDA	181
8.10.9.	Beispiel / Evaluation in den Demonstrationsgebäuden	183
9.	ERGEBNISSE DER ANALYSE	189
9.1.	ennovatis, Großpösna	189
9.1.1.	Energie- und Wasserverbrauch	189
9.1.2.	Heizkreise	189
9.1.3.	Mögliche / Realisierte Verbesserungs- und Einsparpotenziale	190
9.2.	DVZ Barnim	190
9.2.1.	Energie- und Wasserverbrauch	190
9.2.2.	Heizkreise	190
9.2.3.	RLT-Anlagen	191
9.2.4.	Mögliche / Realisierte Verbesserungs- und Einsparpotenziale	191
9.3.	Ludwig-Erhard Haus, Berlin	191
9.3.1.	Energie- und Wasserverbrauch	192
9.3.2.	Mögliche / Realisierte Verbesserungs- und Einsparpotenziale	192
9.4.	EADS Gebäude 88, Ottobrunn	192
9.4.1.	Energie- und Wasserverbrauch	192
9.4.2.	Heizkreise	193
9.4.3.	Mögliche / Realisierte Verbesserungs- und Einsparpotenziale	193
9.5.	Kraft-Foods, München	193
9.5.1.	Energie- und Wasserverbrauch	193
9.5.2.	Heizkreise	194
9.5.3.	Kälteerzeugung	194
9.5.4.	RLT-Anlagen	195

9.5.5.	Drucklufferzeugung	196
9.5.6.	Mögliche / Realisierte Verbesserungs- und Einsparpotenziale	196
10.	KOSTEN-NUTZEN-BETRACHTUNGEN	197
11.	VERWERTUNG DER ERGEBNISSE	200
11.1.	Grundideen der Websuite	200
11.2.	Grundideen des Event Management Systems	201
11.3.	Der neue Smartbox Manager	201
11.4.	Adaptive Heizungsregelung	205
12.	FAZIT	208
12.1.	Generelle Ergebnisse	208
12.2.	Ergebnisse der einzelnen Stufen der Systematik	209
12.2.1.	Stufe 1 – Benchmarking	209
12.2.2.	Stufe 2 – Datenerhebung / Ermittlung Zielwert	210
12.2.3.	Stufe 3a– Fehlererkennung und Diagnose	211
12.2.4.	Stufe 3b – Optimierung	212
12.2.5.	Stufe 4 – Betriebsüberwachung	212
12.3.	Hemmnisse	213
12.3.1.	Generelle Hemmnisse	213
12.3.2.	Technische Hemmnisse	214
12.4.	Weiterer Forschungs- und Entwicklungsbedarf	215
	ANHANG	I
A	ABKÜRZUNGEN	II
B	LITERATUR	III
C	VERÖFFENTLICHUNGEN UND VORTRÄGE	VIII
D	FLIEßBILDER PROZESSSCHRITTE	X
E	DATENERFASSUNG UND –TRANSFER IN DEN DEMONSTRATIONSGEBÄUDEN	XVI
F	CHECKLISTE STUFE 1	XXI
G	CHECKLISTE STUFE 2	XXVII
H	FLIEßSCHEMA DES ALGORITHMUS ZUR AUTOMATISCHEN FEHLERDETEKTION	XXXV
I	EINHEITLICHE DATENPUNKTBEZEICHNUNG	XXXVII
J	OPTIMIERUNG AN HEIZUNGSANLAGEN DURCH FERNZUGRIFF AUF HEIZUNGSREGLER	XL
J.1	Anpassungen der Heizkennlinie	XL

J.1.1	Steigung und Niveau	XL
J.1.2	Raumsollwert Tag/Nacht anpassen	XLIV
J.1.3	4-Punkte Heizkennlinie definieren	XLV
J.1.4	Minimale und Maximale Vorlauftemperatur	XLVIII
J.2	AT Abschaltwert Nennbetrieb und Reduzierbetrieb	XLVIII
J.3	Sommerbetrieb	L
J.4	Trinkwasseraufbereitung	L
J.5	Thermische Desinfektion	LI
J.6	Temperaturabsenkung	LI

Zusammenfassung

Durch eine kontinuierliche Betriebsüberwachung von Gebäuden können Energieeinsparpotentiale im Bereich von 5% bis 20% - allein durch die korrekte Einstellung von Steuer- und Regelparametern - erreicht werden. Dabei handelt es sich meist um einfache Maßnahmen, wie z.B. die Anpassung von Zeitprogrammen, die korrekte Einstellung von Heiz- und Kühlkurven oder die Anpassung von Volumenströmen. Dennoch bleiben diese Einsparpotentiale oft unerschlossen, wenn die notwendigen Messdaten nicht verfügbar oder nicht aufbereitet sind.

Das Ziel von ModBen war es, Verfahren und Werkzeuge zu entwickeln, um diese Einsparpotentiale möglichst effektiv und kostengünstig zu ermitteln und dauerhaft zu erhalten.

Ausgangspunkt für die Entwicklungen in ModBen war eine allgemeine Top-Down-Methodik (siehe 7.1) für die Analyse des Gebäudebetriebs. Die Methode lehnt sich an die aus dem amerikanischen Sprachraum stammende Methode des "continuous commissioning" an. Inhaltlich kann diese am besten mit "kontinuierliche funktionale Qualitätskontrolle" übersetzt werden kann.

Es wurde ein 4-stufiger Ansatz entwickelt, der mit einer Grobanalyse beginnt (Benchmarking), an das sich - je nach Ergebnis - weitere, detailliertere Untersuchungen anschließen (siehe Abbildung 1).

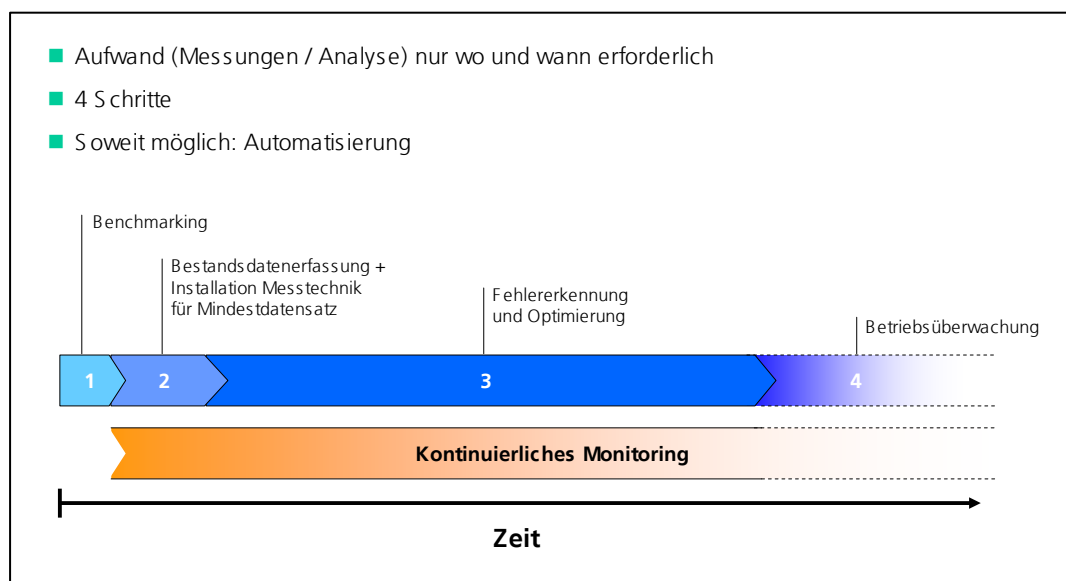


Abbildung 1 Schema der allgemeinen Methodik in ModBen

Das Hauptaugenmerk bei der Entwicklung lag auf den Schritten 3 und 4 des Verfahrens. Kern und Ausgangspunkt der Entwicklungen für diese Schritte war die Erfassung eines fest definierten Umfangs an Messdaten, der aus jedem Gebäude erhoben wurde. Auf Grundlage dieses Mindestdatensatzes wurden Methoden und Werkzeuge entwickelt und erprobt. Tabelle 1 gibt einen Überblick über die entwickelten Werkzeuge.

Tabelle 1 Übersicht der in ModBen untersuchten Ansätze

	Analyseschritte	Werkzeuge	Kapitel
1	Benchmarking	Checkliste 1	8.2
2	Bestandsdatenerfassung und Ermittlung Zielwert (Zertifizierung)	Checkliste 2 (Bestandsaufnahme)	8.3
		ennovatis EnEV+ (Zielwert, DIN V 18599)	8.3
3a	Fehlererkennung und –Diagnose	Manuelle Fehlererkennung (Datenvisualisierung)	8.4, 8.5
		Simulation ausgewählter Teilsysteme	8.6
		Simulation Gesamtsystem	8.7
3b	Optimierung	Simulation Gesamtsystem	8.8
4	Betriebsüberwachung	Automatische Ausreißerdetektion	8.9
		Anpassung der Werkzeuge der ennovatis	8.10

Einige der Werkzeuge wurden bereits während der Projektlaufzeit vom Industriepartner ennovatis in seine Produkte und Dienstleistungen integriert. Andere wiederum konnten nur bis zum Prototyp bzw. bis zum "Proof of Concept" entwickelt werden und benötigen weitere Entwicklungsarbeit. Einige Ansätze wurden auf Grund der Erfahrungen im Projekt verworfen.

Am Fraunhofer ISE wurde mit dem Daten- und Analysetool „datastorage“ eine modulare, wissenschaftliche Entwicklungsumgebung geschaffen, die für weitere Forschung und Entwicklung genutzt werden kann (siehe 8.4).

Zur Evaluation der Methoden und Werkzeuge standen 5 Demonstrationsgebäude zur Verfügung.

Die wichtigsten Ergebnisse von ModBen werden im Folgenden stichpunktartig benannt:

- Durch eine kontinuierliche Betriebsüberwachung in den Demonstrationsgebäuden wurden Energieeinsparpotentiale im Bereich von 5% bis 10% aufgezeigt.
Im Bezug auf die Investitionen, die zur Einrichtung der Datenerfassung und zur Erstanalyse notwendig waren, wurden statische Amortisationszeiten im Bereich von 1 – 3 Jahren erreicht.
- Das Verfahren ist für Gebäude geeignet, deren Energiekosten im Bereich 30.000 Euro/a oder darüber liegen.
- Trotz des geringen Umfangs des Mindestdatensatzes hat sich die Datenerfassung und -übertragung als eines der Haupthindernisse erwiesen und zwar unabhängig davon, ob eine Gebäudeautomation (GA) vorhanden war oder nicht. Die kontinuierliche Erfassung und gemeinsame Speicherung von sowohl Energieverbrauchsdaten als auch von Betriebsdaten mit hoher zeitlicher Auflösung ist noch keineswegs Stand der Technik.

Insbesondere die Erweiterung von GA-Systemen (hohe zeitliche Auflösung, Datenübertragung) hat sich als aufwendig und kostenintensiv erwiesen. Gebäudeautomationssysteme sind in der Regel nicht für die Betriebsanalyse vorbereitet. Eine existierende GA kann von Vorteil sein, wenn die notwendige Sensorik bereits existiert. Falls das nicht der Fall ist, hat sich eine Lösung über einen separaten Datenlogger als günstiger erwiesen.

- Die manuelle Fehlererkennung und -Diagnose mittels intelligenter Datenvisualisierung wurde bei der Erstanalyse der Gebäude intensiv und erfolgreich genutzt. Jedoch hat gerade diese Analysetechnik auch deutlich gemacht, wie notwendig die Automation der Analyse ist, da trotz der automatisierten Erzeugung der Visualisierung der manuelle Aufwand zur Interpretation erheblich ist und nicht für die Integration in die täglichen Abläufe bei der Betriebsführung geeignet ist.
- Als – aus heutiger Sicht - praxistauglich haben sich für diesen Zweck modellbasierte Methoden zur Fehlererkennung auf Basis von Black-Box-Modellen erwiesen (siehe 8.9). Diese erlauben prinzipiell eine einfache und automatisierte Erkennung von ungewöhnlichen Betriebszuständen.
- Bei Verwendung von modellbasierten Methoden zur Fehlererkennung und -diagnose sowie Optimierung, die mit White-Box- oder Gray-Box-Modellen arbeiten, wurde deutlich, dass diese große Potentiale zur Betriebsanalyse bieten, jedoch in Ihrer Anwendung – insbesondere was die Erstellung und Kalibrierung der Modelle betrifft - noch zu aufwendig für den praxisnahen Einsatz erscheinen.
- Ein weiterer wichtiger Aspekt ist, dass die Interoperabilität – im Sinne eines standardisierten und nahtlosen elektronischen Informationsaustauschs – im Gebäudebereich generell kritisch ist. Neben den Messdaten betrifft das insbesondere die Strukturdaten des Gebäudes, also z.B. Informationen zum Aufbau der Gebäudehülle oder zur Struktur der haustechnischen Anlagen.
- Auch die Energieeinsparverordnung mit Ihrer Pflicht zur Erstellung von Energieausweisen (EnEV) kann derzeit an dieser Situation wenig ändern, da für Bestandsgebäude nur selten ein Energiebedarfsausweis ausgestellt wird (da keine Pflicht) und somit keine Strukturdaten erhoben werden.
- Darüber hinaus musste festgestellt werden, dass die Berechnungsmethodik der EnEV (DIN V 18599) auf dem derzeitigen Entwicklungsstand nicht geeignet ist, Zielwerte für den Energieverbrauch eines Gebäudes abzuleiten. Gründe hierfür sind z.B. in der Beschränkung der abbildbaren Systeme zu suchen oder in den Annahmen bezüglich des Gebäudebetriebs (siehe 8.3).
- Neben den technischen Problemen traten eine Reihe von organisatorischen Problemen auf (wie z.B. unklare Zuständigkeiten oder Fragen des Datenschutzes), die den Ablauf behindert und verlangsamt haben. Es wurde deutlich, dass die Betriebsanalyse mehr ist als der rein technische Prozess der Datenaufzeichnung und -bewertung. Um erfolgreich zu sein, ist es notwendig die organisatorische und personelle Einbindung des Prozesses festzulegen.
- Es wurde erkannt, dass sich Nutzung sowie Besitz immer kurzfristiger ändern. Das bedeutet, dass Investitionen für Energieeinsparmaßnahmen in Bestandsgebäuden entsprechend kurze Refinanzierungszeiten aufweisen müssen. Hier konnte gezeigt werden, dass dies mit Betriebsoptimierungen

möglich ist, auch wenn dies wechselnde Nutzungsrandbedingungen erschweren.

Aus Sicht des Projektteams ergibt sich folgender weiterer Forschungs- und Entwicklungsbedarf:

- **Fehlererkennung und –Diagnose (FED) für typische und häufige Subsysteme**

Um FED in vielen Gebäuden anwenden zu können, ist es notwendig, sich auf typische und häufige Systeme bzw. Subsysteme zu konzentrieren (z.B. Heizkreise, RLT-Anlagen mit typischen Konfigurationen, etc.).

Mit dem Mindestdatensatz und den darauf aufsetzenden Methoden, wurden in ModBen einige Beispiele aufgezeigt. Um zu einer weiteren Standardisierung zu gelangen und eine breite Palette von typischen Subsystemen abbilden zu können, sind weitere Entwicklungsarbeiten sinnvoll.

- **Interoperabilität**

Viele Ansätze zur Betriebsoptimierung leiden nach wie vor darunter, dass eine vollständige, aktuelle und fehlerfreie Dokumentation von Gebäuden in den allermeisten Fällen nicht vorliegt. Damit ist der Aufwand für die Modellerstellung und die Kalibrierung meist zu hoch um die erwähnten Verfahren flächendeckend einsetzen zu können.

Die Hoffnung, dass die Vorgaben der EnEV bzw. der DIN V 18599 hier zu einer Vereinheitlichung beitragen können, hat sich leider nicht oder nur teilweise bestätigt.

Ähnliche Probleme bestehen beim Austausch von Messdaten. Einheitliche Standards für Formate von Zeitreihen, Datenpunktbezeichnungen und die Art der Datenprozessierung fehlen, sind aber für eine effiziente Betriebüberwachung notwendig.

Insgesamt ist es aus Sicht des Projektteams notwendig, weiter an Lösungen für einen möglichst reibungslosen und verlustfreien Datenaustausch an den Schnittstellen zwischen Gebäudeplanung, Ausführung, Gebäudeautomation und FED/Optimierung zu arbeiten.

- **Behandlung von Unsicherheiten in der Modellierung**

Bei der Modellierung bzw. Simulation von Gebäuden sind viele der notwendigen Eingaben unsicher. Typisches Beispiel ist das Nutzerverhalten (z.B. Anwesenheitszeiten, Belegungsdichte, Heiz- und Lüftungsverhalten).

Im Rahmen von ModBen wurden solche Unsicherheiten mit stochastischen und probabilistischen Methoden behandelt. Dieses Vorgehen unterscheidet sich grundlegend von klassischen Simulationsrechnungen und hat den Vorteil, dass vorhandene Unsicherheiten quantifiziert werden können.

Solche Simulationsmodelle werden – außer in der Forschung – praktisch noch nicht verwendet. Weitere Forschung und Entwicklung erscheint sinnvoll.

- **Organisatorische Aspekte: Einbindung in der Gebäudebetrieb**

Neben den technischen Aspekten spielen die organisatorischen Aspekte eine wichtige Rolle für den Erfolg der Betriebsanalyse von Gebäuden. Zuständigkeiten müssen geklärt sein, die notwendigen Prozesse müssen dokumentiert und nachverfolgt werden. Auch hier erscheint es sinnvoll über Vereinheitlichung nachzudenken und entsprechende Werkzeuge für die Nachverfolgung der Prozesse zu entwickeln.

1. Einleitung

Der Gebäudesektor ist verantwortlich für über 40% des europäischen Energieverbrauchs. Gleichzeitig liegt das Energie-Einsparpotenzial im Bereich der Betriebsführung, d.h. im Bereich nicht- bzw. gering investiver Maßnahmen, bei 5-30%. Dies gilt insbesondere für den Bestand an Nicht-Wohngebäuden.

Allerdings ist es heute im Bereich der technischen Anlagen für Gebäude gängige Praxis, dass keine kontinuierliche Überwachung im Sinne der Sicherstellung oder Erreichung eines energieeffizienten Betriebs stattfindet. Wartung beschränkt sich lediglich auf die Sicherstellungen der prinzipiellen Funktionalität (z.B. „warme“ bzw. „kühle“ Räume). Selbst bei Neubauten wird ein energieoptimierter Betrieb durch die Inbetriebnahme oftmals nicht erreicht. Häufig resultiert daraus ein Betrieb der gebäudetechnischen Anlagen weitab ihres energetisch / ökonomischen Optimums. Gleichzeitig fehlt dem Besitzer bzw. Betreiber der Anlagen oft das notwendige technische Know-How und/oder Kapital, um Verbesserungen zu erreichen.

Für die Identifikation der genannten Einsparpotenziale und zur Erreichung eines nachhaltigen – das heißt dauerhaft energieeffizienten – Gebäudebetriebs, sind neue Ansätze im Bereich des Energiemanagements notwendig, die auf kontinuierliche und weitgehend automatisierte Fehlererkennung, Fehlerdiagnose und Optimierung setzen.

Entsprechende Verfahren sind im Bereich kritischer Prozesse (z.B. Nukleartechnik, Luftfahrt, chemische Industrie) üblich, spielen aber im praktischen Gebäudebetrieb bislang keine Rolle [1], [2].

Das Projekt ModBen hat verschiedene Ansätze und Werkzeuge entwickelt und in realen Gebäuden getestet. Dieser Bericht fasst die Ergebnisse zusammen:

- **Kapitel 2** gibt eine kurze Beschreibung der heute in Deutschland üblichen Praxis des Gebäudebetriebs und stellt das aus dem amerikanischen Sprachraum kommende „Continuous Commissioning“ zur Verbesserung des Gebäudebetriebs vor.
- In **Kapitel 3** werden Ziele und Struktur von ModBen erläutert. Neben der Zielsetzung und dem Arbeitsplan werden auch die Team-Mitglieder vorgestellt.
- **Kapitel 4** beleuchtet den prinzipiellen Einsatz von Modellen bei der Fehlererkennung und -diagnose von sowie bei der Betriebsoptimierung. Weiterhin werden verschiedene Arten von Modellen und der Prozess der Kalibrierung erläutert.
- Die verschiedenen Methoden der Fehlererkennung und -diagnose werden in **Kapitel 5** beschrieben. Außerdem werden die Anwendung der Methoden im Bereich von Gebäuden und marktverfügbare Werkzeuge betrachtet.
- **Kapitel 6** beschreibt verschiedenen Optimierungsmethoden und deren Eignung für die Anwendung im Gebäudebetrieb.
- **Kapitel 7** gibt einen Überblick über die Methodik, die in ModBen entwickelt und angewandt wurde. Neben der Vorstellung der vier Schritte des Verfahrens werden auch der in ModBen verwendete Mindestdatensatz und das Konzept der Performance Metrics dargestellt.

- In **Kapitel 8** schließlich werden alle entwickelten Ansätze und Werkzeuge detailliert beschrieben. Die Unterkapitel liefern jeweils eine Begründung für den gewählten Ansatz, eine Beschreibung wie der Ansatz in ModBen angewandt wurde, die Art der Implementierung und ein Beispiel für die Anwendung. Außerdem werden in diesem Kapitel die Demogebäude vorgestellt.
- **Kapitel 9** fasst die erzielten Ergebnisse der Analyse für die 5 Demonstrationsgebäude zusammen.
- Eine Kosten-Nutzen-Betrachtung des entwickelten Verfahrens wird in **Kapitel 10** vorgestellt.
- **Kapitel 11** beschreibt die Verwertung der Ergebnisse aus Sicht des Projektpartners ennovatis. Insbesondere wird vorgestellt, in welcher Weise die Software Produkte des Partners erweitert wurden.
- Ein Fazit mit den wichtigsten Ergebnissen und Erkenntnissen findet sich in **Kapitel 12**. Hier werden außerdem Hinweise auf weiteren Forschungs- und Entwicklungsbedarf gegeben.

2. Praxis des Gebäudebetriebs

Unter „Gebäudebetrieb“ wird in diesem Bericht im Schwerpunkt das technische Management von gebäudetechnischen Anlagen zur Bereitstellung von behaglichem Raumklima verstanden. Die typische Zielsetzung für diesen Bereich lautet, „behagliches Raumklima“ bei minimalem Energieverbrauch und minimalen Kosten bereitzustellen.

Neben sachgemäßer Wartung und Instandhaltung als notwendigen Voraussetzungen, spielt die betriebsbegleitende Überwachung und Optimierung von Anlagen eine wichtige Rolle bei der Erreichung dieses Ziels¹.

Begrifflich wird die Dienstleistung des professionellen Gebäudebetriebs als Teil des Facility Managements häufig als technisches Anlagen- oder Gebäudemanagement bezeichnet. Wenn sie als Contracting-Modell angeboten wird, ist auch der Begriff Betriebsführungs-Contracting üblich².

Aus Sicht der Autoren dieses Berichts umfasst der technische Gebäudebetrieb folgende Leistungen:

- Inbetriebnahme von neuen bzw. erneuerten Anlagen
- Wartung und Instandhaltung des Anlagenbestands
- Energiemanagement / Energiemonitoring
- Anlagenmonitoring (funktionale Qualitätssicherung)
- Sicherstellung des gewünschten (und mit der vorhandenen Anlage erzielbaren) Komforts bzw. Raumklimas.
- Dokumentation von erbrachten Leistungen und erzielte Verbesserungen

2.1. Übliche Praxis

Gängige Praxis zur Sicherstellung oder Erreichung eines energieeffizienten Betriebs ist die Einführung eines Energiemonitorings bzw. Energiemanagements³. Zahlreiche Beispiele aus der Praxis zeigen, dass sich über dieses Instrument Einsparungen erzielen lassen.

Allerdings beschränkt sich Energiemanagement häufig auf die wöchentliche, monatliche oder gar jährliche Aufzeichnung und Auswertung von Energieverbräuchen, meist in Verbindung mit einem Benchmarking. Aus folgenden Gründen ist dieses Vorgehen zur Optimierung des Anlagenbetriebs wenig effizient:

- Energieverbräuche sind als Zielgröße und Indikatoren für das Energiemanagement unerlässlich. Als Mittel zur Analyse des Anlagenbetriebs sind sie allerdings nur bedingt geeignet, da sie nur die „Symptome“ eines mehr oder weniger optimalen Betriebs darstellen. Verbrauchswerte können

¹ Das zeigen z.B. die Ergebnisse des Forschungsprogramms „Energieoptimiertes Bauen“ EnOB des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie (www.enob.info)

² Vergleiche auch: DIN 8930 Teil 5, Kälteanlagen und Wärmepumpen, Begriffe und Formelzeichen Teil 5 Contracting

³ Z.B. nach DIN EN 16001

zur Fehlererkennung eingesetzt werden, jedoch sind sie selten für die Fehlerdiagnose, d.h. die Suche nach den Ursachen – z.B. bei erhöhtem Verbrauch – geeignet.

- Meist sind die Erfassungsintervalle des Energieverbrauchs im Bereich Wochen oder Monate. Dies erlaubt keine detaillierte Analyse des Betriebs und der Einsparpotenziale.
- Ein Benchmarking mit statistisch aufbereiteten Verbrauchsdaten aus dem Gebäudebestand ist aufgrund der sehr unterschiedlichen Nutzung und Ausstattung von Nichtwohngebäuden allenfalls für eine erste Grobanalyse statistisch gut repräsentierter Gebäudetypen geeignet.
- Darüber hinaus machen die oft zahlreichen und verschiedenen Nutzungszonen und u.U. eine häufige Umnutzungen oder auch Umbauten eine vollständige Erfassung des Energieverbrauchs aufgeteilt auf Nutzungsbereiche und Anlagen sehr teuer und in den meisten Fällen praktisch unmöglich.
- Das Energiemonitoring hat häufig keinerlei Verbindung – weder technisch noch organisatorisch – zur Gebäudeautomation (GA). Das macht eine Verbesserung des energetischen Gebäudebetriebs über Eingriffe in die GA schwierig.
- Das Energiemanagement lässt den Raumkomfort bzw. die thermische Behaglichkeit meist völlig außer Betracht, obwohl dieser die entscheidende Größe für den Energiebedarf eines Gebäudes ist.

Zusätzlich treten in der Praxis bei der Einführung eines professionellen technischen Anlagenbetriebs bzw. eines Energiemanagements regelmäßig folgende Probleme auf:

- **Informationslücken**
 Insbesondere bei Bestandsgebäuden ist die Dokumentation der Gebäudehülle, der Nutzung und der haustechnischen Anlagen oft unvollständig, fehlerhaft bzw. nicht aktuell oder schlicht nicht vorhanden.
 Weiterhin ist die messtechnische Ausstattung von Gebäuden häufig sehr gering. Meist beschränkt sich die Anzahl der Energiezähler auf das aus abrechnungstechnischer Sicht notwendige Maß. Die Qualität von Zählwerten aus internen Unterzählern wiederum, die keiner regelmäßigen Eichung unterzogen werden, ist oft mangelhaft.
- **Kosten**
 Aus technischer Sicht ist es möglich, den Anlagenbetrieb sehr genau zu überwachen und z.B. sehr detaillierte Gebäudemodelle zu erstellen und diese anhand umfangreicher Messdaten zu validieren, um somit Optimierungspotenziale und etwaige Fehler im Anlagenbetrieb zu untersuchen. Allerdings sind die Kosten eines solchen Vorgehens deutlich zu hoch, um marktgängig zu sein.
 In der Praxis kommen daher meist einfache Bewertungsmethoden wie Benchmarking oder Zeitreihenanalysen zum Einsatz.
 Kosten sind ein stark begrenzender Faktor sowohl bezüglich der Datenakquise, als auch bezüglich der verwendeten Analysewerkzeuge.

- **Organisation**

Energiemanagement, technischer Anlagenbetrieb inkl. GA und kaufmännisches Gebäudemanagement sind häufig getrennte Verantwortlichkeitsbereiche mit wenig Anknüpfungspunkten bzw. Austausch.

Die oben genannten Gründe führen dazu, dass evtl. trotz der Einführung eines Energiemanagements Einsparpotenziale unerkannt und ungenutzt bleiben.

2.2. Continuous Commissioning - Kontinuierliche Betriebsüberwachung

Um die oben genannten Probleme im Gebäudebetrieb zu vermeiden bedarf es einer kontinuierlichen Qualitätssicherung, die von den Anforderungen des Gebäudebesitzers bzw. Gebäudenutzers ausgeht und die auf ein Anlagen- und Energiemonitoring gestützt ist.

Der aus den USA kommende Begriff „Continuous Commissioning“ (CC, etwa: „kontinuierliche Inbetriebnahme“), umschreibt einen solchen Prozess. Das „Continuous Commissioning Guidebook“ [3] gibt folgende Definition:

“Continuous Commissioning is an ongoing process to resolve operating problems, improve comfort, optimize energy use and identify retrofits for existing commercial and institutional buildings and central plant facilities.”

Eine andere Definition des ICBCS Annex 40 [4] betont den Aspekt der Qualitätssicherung im Sinne der Einhaltung der Nutzeranforderungen:

“CC = Clarifying Owner’s Project Requirements (OPR) from viewpoints of environment, energy and facility usage, and auditing and verifying different judgments, actions and documentations in the Commissioning Process (CxP) in order to realize a performance of building system requested in the OPR through the life of the building.”

Typischerweise wird CC als mehrstufiger Prozess beschrieben. Das “Continuous Commissioning Guidebook” beschreibt die Phasen des CC folgendermaßen:

- Erarbeitung eines CC-Plans
 - Erarbeitung eines detaillierten Arbeitsplans (Beschreibung der Aufgaben und Ziele, Spezifikation des Monitorings, etc.)
 - Identifikation des Projektteams
 - Klärung der Aufgaben der Teammitglieder
- Entwicklung von Baselines des Anlagenbetriebs⁴.
 - Dokumentation der Komfortbedingungen und -Probleme
 - Dokumentation der Anlagen und des Anlagenbetriebs und etwaiger Probleme

⁴ Unter Baseline versteht man eine modellhafte und quantitative Beschreibung des Gebäudebetriebs vor der Umsetzung von Einsparmaßnahmen. Ein typisches Beispiel ist die Baseline für den Jahres-Heizenergiebedarf, die z.B. als Mittelwert des witterungs- und gegebenenfalls nutzungsbereinigten Verbrauchs der letzten 3-5 Jahre definiert wird.

- Dokumentation des Energieverbrauchs
- Einführung des Energie- und Anlagenmonitorings und Ableitung von Verbesserungsmaßnahmen
 - Identifikation der bestehenden Probleme im Anlagenbetrieb (Betriebszeiten, Sollwerte, etc.)
 - Erarbeitung von Verbesserungsmaßnahmen, Lösungen für bestehende Probleme (nicht- und gering-investive Maßnahmen)
 - Identifikation von kosteneffizienten investiven Verbesserungsmaßnahmen (Austausch von Anlagen, etc.)
- Umsetzung der Verbesserungsmaßnahmen
 - Zustimmung des Gebäudebetreibers einholen
 - Umsetzung von Maßnahmen für die Bereiche Komfort, Energie und Anlagenbetrieb
 - Dokumentation der erreichten Verbesserungen (Komfort, Anlagenbetrieb, Energieeinsparung)
- Verstetigung des Prozesses
 - Kontinuierliche Betriebsüberwachung
 - Aufrechterhaltung des optimierten Betriebs

Neben der prinzipiellen Prozessstruktur selbst, stehen für einzelne Teilprozesse detaillierte Handlungsanweisungen zur Verfügung. So werden in den USA von verschiedenen Organisationen Sammlungen von so genannten Functional Performance Tests für die messtechnische Prüfung einzelner Anlagen und Systeme bereit gestellt. Ein umfassendes Beispiel ist der Functional Testing Guide der Portland Energy Saving Inc. (www.peci.org oder www.peci.org/ftguide). Diese Sammlungen sind als Referenz hilfreich, können jedoch aufgrund ihrer Ausrichtung auf dem US-Amerikanischen Markt nicht einfach übernommen werden. Für andere Bereiche wie z.B. die Betriebsüberwachung stehen solche detaillierten Beschreibungen nicht zur Verfügung.

Methoden für die kontinuierliche Betriebsüberwachung befinden sich zurzeit – bezogen auf Europa bzw. Deutschland – erst in der Entwicklung. In der Praxis sind systematische und vor allem automatisierte Verfahren, die über eine Kontrolle von Grenzwerten (z.B. Druckdifferenz von Filtern zur Überwachung der Verschmutzung) hinausgehen kaum zu finden. Allenfalls für einzelne Komponenten sind „intelligente Regelungen“ verfügbar, die dann vom Hersteller mitgeliefert werden.

Folgende Überlegungen sollen noch einmal verdeutlichen, dass es für eine effiziente und effektive Fehlererkennung, -diagnose und Optimierung des Anlagenbetriebs mehr bedarf als eines Energiemonitorings:

- Der Energieverbrauch von Gebäuden wird maßgeblich getrieben von den Betriebszeiten der Anlagen, der Höhe der beförderten Medienströmen (z.B. Luft oder Wasser) und den globalen Regelungsstrategien (z.B. Einstellungen der Heiz-/Kühlkurven).

- Neben dem Endenergieverbrauch (evtl. dem Verbrauch der größten Erzeuger und Gebäude / Zonen) ist für die Analyse des Energieverbrauchs daher eine Aufzeichnung und Auswertung dieser Einflussgröße von entscheidender Bedeutung. Die Datenerfassung sollte hierbei mit hoher zeitlicher Auflösung geschehen, da nur so die zeitlichen Profile und Abhängigkeiten vollständig und korrekt erfasst werden können.
- Beim Vorhandensein einer Gebäudeleittechnik sind diese Signale meist schon verfügbar, was auch den organisatorischen und finanziellen Aufwand eines solchen Vorgehens gegenüber einer vollständigen Erfassung aller Teilenergieströme deutlich verringert. Damit wird auch teilweise, der in vielen Gebäuden bestehenden Problematik von zahlreichen und häufigen Umbauten und Umnutzungen, Rechnung getragen.
- Automatisierung der Diagnose sowie die Verknüpfung der Bereiche Technik, Organisation (Arbeitsteilung, Abläufe) und Finanzierung stellt einen wichtigen Schritt in Richtung der Integration der Betriebsoptimierung in den täglichen Betrieb dar.

3. Ziele und Struktur von ModBen

3.1. Ziele des Projekts

Ziel des Projekts ModBen war es, praxistaugliche Werkzeuge für die Analyse und Optimierung des energetischen Gebäudebetriebs und dessen zeitnahe Überwachung zu entwickeln.

Im Rahmen des Projekts sollten verschiedene Verfahren zur Betriebsanalyse entwickelt und an 5 Demonstrationsgebäuden erprobt werden. Sie sollten einerseits die Randbedingungen der Praxis - wie geringe Datengrundlage und Kostenbeschränkungen - berücksichtigen und andererseits in der Lage sein, mögliche Einsparpotenziale zu identifizieren sowie den optimierten Betrieb zu überwachen. Dabei sollte ein möglichst hoher Automatisierungsgrad erzielt werden.

Weiterhin sollten eine Reihe unterschiedlicher Ansätze in Bezug auf die verwendeten Modelle - von einfach bis detailliert bzw. von Black Box bis White Box - untersucht werden.

Soweit möglich und sinnvoll, sollte die Systematik sich auf die DIN V 18599 beziehen, die Grundlage der Energieeinsparverordnung (EnEV) und damit der Ausstellung von Energieausweisen für Gebäude ist.

3.2. Arbeitsplan

Der Arbeitsplan des Projekts sah folgende Arbeitspakete vor:

Tabelle 2 Übersicht Arbeitspakete und Haupt-Verantwortlichkeiten

	Arbeitspakete	Verantwortlicher Partner		
		Fraunhofer ISE	Ennovatis	HSG Zander
1	Auswahl und detaillierte Datenaufnahme von mind. 5 Referenzobjekten			
2	Entwicklung einer Analysestruktur in Anlehnung an die DIN 18599 V			
3	Entwicklung einer Basisversion des Verfahrens für verschiedene Modellansätze und Modellierungstiefen			
4	Entwicklung von Algorithmen zur Betriebsoptimierung und Betriebsüberwachung			
5	Implementierung des Verfahrens			
6	Kontinuierliche Betriebsüberwachung der Referenzobjekte und Validierung des Verfahrens			
7	Koordination / Zentrale Aufgaben			

Der Arbeitsplan wurde vollständig erfüllt. Jedoch muss festgestellt werden, dass aufgrund der Vielzahl der getesteten Ansätze (siehe 8) im Ergebnis kein geschlossenes Verfahren entstanden ist, sondern mehrere Werkzeuge, die als Basis für eine weitere u.U. auch unabhängige Entwicklung betrachtet werden können.

3.3. Team

Das Projektteam bestand aus dem Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme als Forschungspartner und Koordinator, der Firma ennovatis, die Soft- und Hardware für das Energiemonitoring anbietet sowie der Firma HSG Zander, die mit Ihrer Facility Management Sparte zahlreiche Kunden betreut.

3.3.1. Kurzvorstellung Fraunhofer ISE (www.ise.fraunhofer.de)

Die Forschung des Fraunhofer-Instituts für Solare Energiesysteme ISE schafft technische Voraussetzungen für eine effiziente und umweltfreundliche Energieversorgung. Dazu entwickelt das Institut Materialien, Komponenten, Systeme und Verfahren auf den Gebieten: Solarthermie, Solares Bauen, Solarzellen, elektrische Energieversorgung, chemische Energiewandlung und Speicherung sowie rationelle Energienutzung. Die Arbeit des Instituts reicht von der Erforschung der naturwissenschaftlich-technischen Grundlagen der Solarenergienutzung über die

Entwicklung von Produktionstechniken und Prototypen bis hin zur Ausführung von Demonstrationsanlagen.

Das Fraunhofer ISE mit derzeit über 1.000 Mitarbeitern beschäftigt sich seit 25 Jahren mit der Konzeption von Energieeffizienten Gebäuden sowie mit dem Monitoring von Raumklima und Anlagentechnik.

3.3.2. Kurzvorstellung ennovatis (www.ennovatis.de)

Die ennovatis GmbH ist der führende Anbieter von durchgängigen Energiemanagement-Systemen in Deutschland. Als Systemhaus entwickelt und produziert das innovative Unternehmen Software- und Hardwaresysteme für die Verbesserung der Energieeffizienz in Gebäuden. Als Partner der Facility Management-Industrie ist die ennovatis GmbH ein kompetenter Dienstleister bis hin zu Einführung und Betrieb seiner Energiemanagement-Systeme.

3.3.3. Kurzvorstellung HSG Zander

Als einer der führenden Anbieter integrierter FM Dienstleistungen übernimmt die HSG Zander GmbH länder- und regionenübergreifend, komplett oder modular, die technische, infrastrukturelle und kaufmännische Bewirtschaftung der Immobilien der Kunden und gewährleistet einheitliche Standards und Qualität für das gesamte Portfolio. Europaweit bewirtschaften wir mit über 4000 Mitarbeitern Immobilien mit einer Gesamtfläche von über 11 Mio. m² von Kunden aus den unterschiedlichsten Branchen - modular, komplett und kundennah. Mit 15 Niederlassungen in Deutschland, 22 Tochtergesellschaften in Europa sowie ausgewählten Joint-Venture-Partnerschaften bietet die HSG Zander GmbH in ganz Europa flächendeckend und standort- bzw. länderübergreifend ein einheitliches Leistungsangebot.

4. Modellbasierte Methoden im Gebiet FED und Optimierung

In diesem Kapitel werden Fehlererkennung und Diagnose (FED) und Optimierung definiert und gegeneinander abgegrenzt. Weiterhin wird beschrieben, welche Modelle prinzipiell zur Anwendung kommen können.

Fehlerbeseitigung und Optimierung stellen im Sinne von ModBen nicht- oder gering-investive Änderungen bzw. Anpassungen des Gebäudebetriebs hauptsächlich auf der Ebene der Steuerung und Regelung dar. Maßnahmen wie der Austausch oder die umfangreiche Sanierung der Gebäudehülle oder der Anlagentechnik, die ebenfalls große Energieeinsparpotenziale besitzen, standen nicht im Fokus des Projekts.

Fehlererkennung und Optimierung technischer Systeme im obigen Sinne setzen voraus, dass das „normale“ (d.h. fehlerfreie) bzw. das optimale Verhalten des Systems bekannt ist und mit dem aktuellen Betrieb verglichen werden kann.

Abbildung 2 zeigt eine vereinfachte Darstellung des Prozesses der Fehlererkennung und Optimierung. Im Allgemeinen werden Daten aus dem System erfasst, aufbereitet und geeigneten Vergleichswerten gegenübergestellt, die den „normalen“ oder optimalen Betrieb wiedergeben. Ein einfaches Beispiel hierfür ist z.B. der spezifische Vorjahres-Stromverbrauch eines Gebäudes in kWh je m² Nutzfläche, der mit dem Verbrauch des aktuellen Jahres verglichen wird, um mögliche Veränderungen festzustellen. Bei signifikanten Abweichungen erfolgen eine Ursachenermittlung und gegebenenfalls eine Korrektur im System. Um dauerhaft einen fehlerfreien bzw. optimalen Betrieb sicher zu stellen, muss dieser Prozess kontinuierlich oder zumindest in regelmäßigen Intervallen durchlaufen werden.

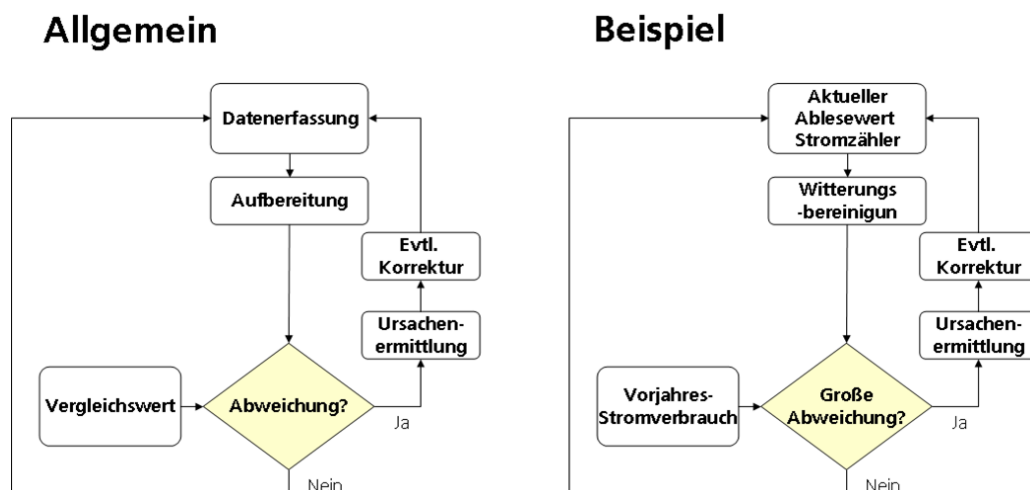


Abbildung 2 Vereinfachtes Schema Fehlererkennung / Optimierung von technischen Systemen allgemein und für ein einfaches Beispiel

Als Modelle werden im Rahmen dieses Berichts mathematische Abbildungen eines realen Systems bezeichnet, die in der Lage sind quantitative Aussagen über das Verhalten des Systems zu liefern. Als Beispiel hierfür kann die DIN 18599 dienen, die ein Modell für den Energiebedarf von Gebäuden und für die Effizienz von dessen Bereitstellung darstellt.

Modelle sind für die Fehlererkennung und Optimierung bei technischen Systemen von außerordentlichem Interesse, da sie systemspezifische Vergleichswerte für „normales“ Verhalten oder die erforderlichen Systemparameter für „optimales“ Verhalten des Systems liefern können. Die folgenden Abschnitte gehen näher auf die Einsatzgebiete und Ausprägungen von Modellen im Gebäudebereich ein.

4.1. Unterscheidung FED und Optimierung

Um die möglichen Einsatzgebiete von Modellen näher untersuchen zu können, müssen zunächst die Teilprozesse Fehlererkennung und Optimierung weiter differenziert werden. Die Fehlererkennung und -diagnose wird im englischsprachigen Raum als „Fault Detection and Diagnosis“ bezeichnet (FDD) und wird in diesem Bericht als FED abgekürzt.

4.1.1. Fehlererkennung und –Diagnose (FED)

Fehler sind Zustände oder Ereignisse im Gebäudebetrieb, die ein gleichzeitiges Erreichen von behaglichem Raumklima und dessen energieeffizienter Bereitstellung grundsätzlich verhindern. Ein einfaches Beispiel hierfür ist ein aufgrund mangelnder Wartung verstopfter Filter, der durch seinen erhöhten Druckverlust je nach vorhandener Regelung des dazugehörigen Ventilators entweder zu Versorgungsproblemen (zu geringer Volumenstrom bei Konstantdruckregelung) oder zu erhöhtem Energieverbrauch (erhöhter Druckverlust bei konstantem Volumenstrom) führt.

Fehler werden somit als ungewollte Verschlechterungen des planmäßigen Betriebs definiert.

Fehler können ihre Ursache sowohl in mangelhafter Planung oder Ausführung, falscher Bedienung oder fehlender Wartung haben. Typische Fehler im Gebäudebetrieb sind z.B.:

- Betriebszeiten
Antriebe wie Pumpen und Ventilatoren werden ganztägig und am Wochenende betrieben, ohne dass eine Anforderung besteht und oftmals auch, ohne dass dies dem Bedienpersonal bewusst ist.
- Gleichzeitiges Heizen und Kühlen
Heiz- und Kühlsystem versorgen aufgrund falscher Sollwerte zeitgleich die selbe Zone / den selben Raum und erhöhen somit den Energieverbrauch
- Fehlerhafte Regelung
Die Regelung des Systems weist trotz korrekter Spezifikation Fehler in der Programmierung auf oder erreicht aufgrund falsch positionierter oder falsch aufgelegter Sensoren oder Aktoren nicht den angestrebten Komfort oder die geplante Energieeffizienz.
- Deaktivierte / „verstellte“ Regelungen
Steuerungen und Regelungen werden beim Auftreten von Problemen häufig außer Betrieb genommen oder grob verstellt, um andere Mängel des Systems zu kompensieren.
- Fehlende Kalibrierung
Sensoren, die der Steuerung und Regelung von Anlagen dienen, liefern aufgrund falscher oder fehlender Kalibrierung ungültige Werte und beeinflussen damit Raumklima und/oder Energieverbrauch negativ

- Fehlende Wartung
Komponenten sind aufgrund fehlender Wartung in ihrer Funktion und/oder Effizienz eingeschränkt.
- Fehlender hydraulischer Abgleich
Rohrleitungs- und Kanalsysteme sind hydraulisch oftmals nicht abgeglichen, insbesondere nach Umbauten oder Nutzungsänderungen. Dies führt in der Regel zu erhöhtem Energieverbrauch und/oder verringertem Komfort.
- Unter- / Überdimensionierung
Viele haustechnische Systeme sind über-, manche unterdimensioniert. Dies führt in der Regel zu einem ineffizienten Betrieb (dessen Beseitigung in der Regel jedoch auch investive Maßnahmen erfordert, die nicht der Fokus von ModBen waren).

FED zielt auf eine frühzeitige, systematische und - soweit möglich - automatisierte Erkennung und Diagnose von Fehlern ab, bevor zusätzlicher Schaden oder ein Versagen des Systems auftritt. Dies wird erreicht durch eine Kombination von kontinuierlichem Monitoring und Auswertung der Signale im Hinblick auf Fehler. Sowohl für einzelne Komponenten sowie für Gesamtgebäude wurden hierfür im wissenschaftlichen Bereich bereits zahlreiche Methoden entwickelt und getestet [5], [6], [7]. In Abschnitt 5 werden diese näher betrachtet.

4.1.2. Optimierung

Optimierung im Sinne dieses Berichts benötigt ein funktionsfähiges und regelbares System und setzt daher nach der Beseitigung grundsätzlicher Fehler an. Im Rahmen der Optimierung wird die Energieeffizienz des Systems und / oder das Raumklima unter Berücksichtigung der aktuell vorliegenden Randbedingungen verbessert. Die Randbedingungen beinhalten z.B. Wetter, Komfortanforderungen oder Anwesenheit zu berücksichtigen.

In Abgrenzung zur FED kann die Optimierung somit als gezielte Verbesserungen des planmäßigen Betriebs bzw. seine Anpassung an die aktuellen Randbedingungen beschrieben werden.

Typische Ansätze zur Optimierung des Betriebs von Gebäuden sind u. a.:

- Optimierung der Betriebszeiten von Anlagen
Unter Berücksichtigung der aktuellen und evtl. zukünftigen (prädiktive Regler) Anforderungen können die Betriebszeiten von Anlagen, wie Heizung und Kühlung, oft deutlich reduziert werden. Insbesondere unter Ausnutzung der trägen Massen eines Gebäudes können sich hier interessante Optionen zur Energie- und Kosteneinsparung ergeben.
- Optimierung der Sollwerte
In engem Zusammenhang mit dem erstgenannten Punkt steht die Anpassung von Sollwerten, z.B. von Vorlauftemperaturen der Heizung oder Kühlung. Angepasste Laufzeiten von Anlagen erfordern in der Regel eine „intelligente“ Regelung der Anlagensollwerte, damit kein Komfortverlust auftritt. Weiterhin werden z.B. Verteilverluste in Anlagen, Nutzungsgrade von Energieerzeugern oder die Effizienz von Ventilatoren maßgeblich von den eingestellten Sollwerten (Temperaturen, Volumen-, Massenströme) beeinflusst.
- Auswahl des besten Erzeugers
Bei Anlagen mit mehreren Erzeugereinheiten (z.B. mehrere Kälteerzeuger) werden

diese oft nicht so betrieben, dass jeweils der Erzeuger mit dem aktuell höchsten Nutzungsgrad gewählt wird. In Abhängigkeit der Randbedingungen (z.B. Wetter, Komfort, Anwesenheit) können hier mit einer entsprechenden Regelung hohe Einsparpotenziale erzielt werden.

Bei der Implementierung von Optimierungen können weiterhin zwei grundsätzlich verschiedene Fälle unterschieden werden:

- Externe oder Offline-Optimierung
In diesem Fall wird der Gebäudebetrieb bzw. die Anlage extern optimiert, bzw. das Gebäude wird hierfür „offline“ simuliert. Dabei werden bestimmte Nutzungsprofile und geeignete Wetterdatensatz angenommen. Die optimierten Regelparameter werden dann (zunächst manuell) in die GA übernommen.
Ziel ist die Ermittlung allgemeiner Regelstrategien für die Anlagen des Gebäudes, um z.B. den jährlichen Energieverbrauch oder die jährlichen Energiekosten zu minimieren.
- Interne oder Online-Optimierung
Prädiktive oder lernende Regler zielen auf eine Optimierung, die die aktuelle bzw. zukünftige Situation im Gebäude, z.B. die aktuellen Randbedingung bezüglich Wetter, Raumklima oder Belegung berücksichtigt.
Dadurch kann der reale Betrieb theoretisch in jeder Stunde optimal gefahren werden.
Praktisch erfordert diese Art der Optimierung derzeit jedoch einen hohen technischen Aufwand, da sie als Teil der Gebäudeautomation eine enge Kopplung mit den Sensoren und Aktoren der Anlagen erfordert.

Für die Betriebsoptimierung sind im wissenschaftlichen Bereich zahlreiche Ansätze entwickelt und getestet worden [8].

In der Praxis wird der Anlagenbetrieb häufig händisch optimiert. Auch bei dieser manuellen Optimierung durch ausprobieren („trial and error“) wird gelegentlich auf Modelle zurückgegriffen [9].

4.1.3. FED und Optimierung als Prozess

Wie sich aus den beiden vorangegangenen Abschnitten ergibt, ist die FED notwendige Voraussetzung zur Erreichung eines fehlerfreien Betriebs und daher der Optimierung vorgelagert. Somit ergibt sich ein zweistufiger Prozess, der schematisch in Abbildung 3 dargestellt ist.

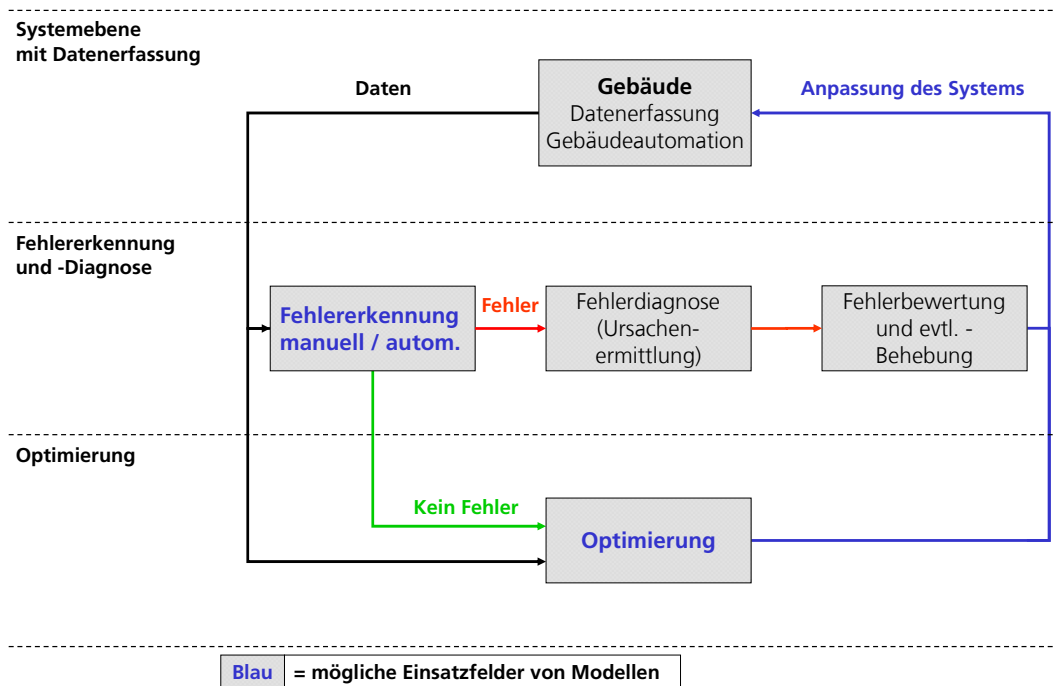


Abbildung 3 Prozessstruktur bei Fehlererkennung und Optimierung im Gebäudebetrieb

Der Prozess startet ausgehend von einer Datenerfassung, die im Idealfall Bestandteil der Gebäudeautomation ist und Informationen aus dem Gebäude in Form von Messdaten, Sollwerten oder Statusinformationen liefert.

Daran schließt sich auf der ersten Stufe zunächst die Fehlererkennung und –Diagnose an. Die Fehlererkennung kann sowohl manuell (z.B. durch das Bedienpersonal) oder automatisiert geschehen. Bei Detektion eines Fehlers im Betrieb ist zunächst eine Fehlerdiagnose im Sinne einer Ursachenermittlung durchzuführen. Auch dieser Prozess kann sowohl manuell als auch automatisiert geschehen. Wird der Fehler als kritisch bewertet, erfolgt anschließend die Fehlerbeseitigung. Ob ein Fehler als kritisch einzustufen ist, hängt von den jeweils gegebenen Randbedingungen bezüglich Energie, Kosten und Raumklima bzw. von deren Gewichtung durch den Gebäudebetreiber oder –Besitzer ab.

Wenn alle kritischen Fehler beseitigt sind, kann die Optimierung erfolgen, um Vorgaben für Sollwerte des Anlagenbetriebs zu erzeugen. Vor der Einspeisung dieser Sollwerte in die Gebäudeautomation sollte eine Plausibilitätsprüfung erfolgen, um zu überprüfen ob alle Anforderungen berücksichtigt wurden und um zu hinterfragen ob alle gestellten Anforderungen vernünftig sind.

Entscheidend für einen energieeffizienten Betrieb über die gesamte Lebensdauer eines Gebäudes ist, dass dieser Prozess kontinuierlich bzw. regelmäßig durchlaufen wird, um auf evtl. Änderungen zu reagieren. Diese Änderungen können gewollt sein

(z.B. Sanierung des Gebäudes, Umbau eines Gebäudeteils) als auch ungewollt (z.B. Degradation eines Energieerzeugers aufgrund eines Fehlers).

4.2. Modelle

Unter Modellen sollen hier Abbildungen von Systemen verstanden werden, mit denen Aussagen über das Verhalten unter bestimmten Randbedingungen gemacht werden können. Bei einem geeigneten Modell wird die Komplexität möglichst stark reduziert, ohne die geforderten wesentlichen Abbildungseigenschaften zu verlieren, um die Modellerstellung, Validierung zu vereinfachen und eine möglichst hohe Rechengeschwindigkeit zu erreichen. Modelle können auf verschiedenen Ebenen betrachtet werden. Die realen Systeme werden in mathematischen Formeln als physikalisches bzw. in Abbildung 4 konzeptionelles Modell abgebildet. Diese mathematische Formulierung muss in der Regel mit numerischen Methoden implementiert werden.

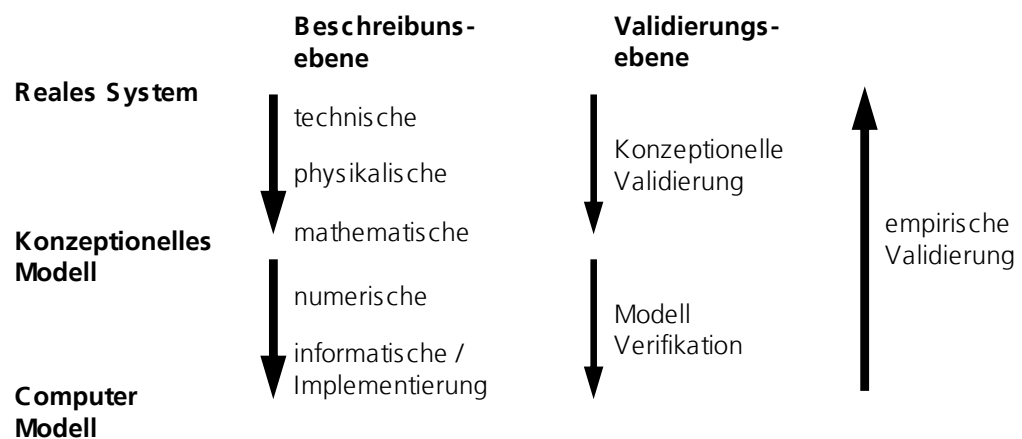


Abbildung 4 Modell- und Validierungsebenen [10]

Um verschiedene Arten von Modellen und Ihre Verwendung besser beschreiben zu können, soll hier zunächst kurz der allgemeine Aufbau von Modellen erläutert werden.

Im Kern besteht ein Modell aus einer mathematischen Vorschrift für die Verknüpfung von Eingangsgrößen, Ausgangsgrößen und Parametern, die hier als Modellstruktur bezeichnet wird. Die Randlage der Ein- und Ausgangsgrößen sowie der Parameter in Abbildung 5 weist darauf hin, dass diese Größen „von außen“ zugänglich bzw. beeinflussbar sind. Eingangsgrößen und Parameter werden vom Analysten oder von anderen Modellen oder Prozessen vorgegeben. Die Ausgangsdaten stehen wiederum für andere Modelle oder zur Auswertung durch den Analysten zur Verfügung. Die Modellstruktur hingegen bleibt im Allgemeinen unverändert.

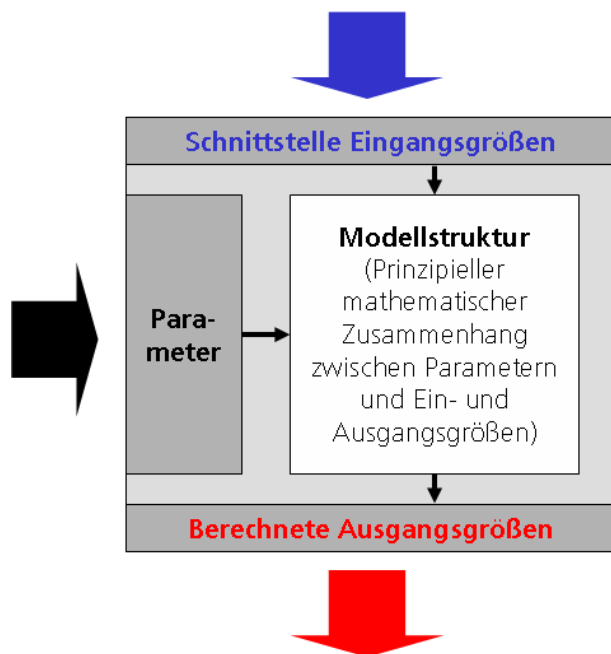


Abbildung 5 Allgemeiner Aufbau eines Modells

Ein wichtiger Aspekt dieser Repräsentation von Modellen ist, dass sie auch für Untermodelle verwendet werden kann, d.h. für Modelle, die Bestandteil der Modellstruktur größerer Modelle sind.

Abhängig von der Art bzw. der physikalischen Bedeutsamkeit der Parameter soll folgende (für Modelle übliche) Unterscheidung getroffen werden:

- **White-Box Modell**
Physikalisches Modell mit ausschließlich physikalisch bedeutsamen Parametern (innere Struktur des Modells wird abgebildet)
- **Black-Box Modell**
Nicht-physikalisches Modell (z.B. statistisch / stochastisch) ohne physikalisch bedeutsame Parameter (innere Struktur wird nicht abgebildet)
- **Gray-Box Modell**
Mischform aus White- und Black-Box Modellen

Gerade für energetisch besonders hochwertige Gebäude sollten bei der Modellierung stochastische Effekte berücksichtigt werden. An Abbildung 6 ist erkennbar, dass bei der gleichen absoluten Unsicherheit (was in vielen Fällen zunächst keine vollkommen abwegige Annahme darstellt) die relative Unsicherheit bei neuen hochwertigen Gebäuden um einen Faktor 10 höher sein kann als bei alten Gebäuden. Unter solchen Umständen kann der stochastische Einfluss bei der Modellierung nicht mehr vernachlässigt werden.

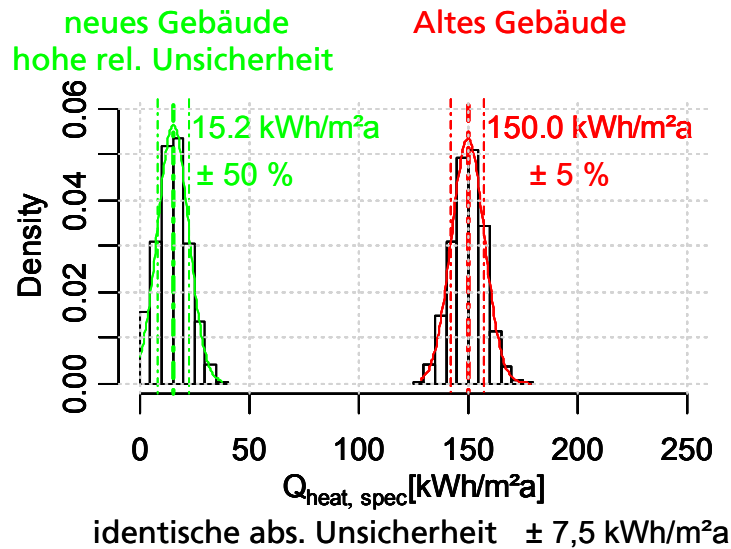


Abbildung 6 Vergleich des Einflusses von Unsicherheiten bei neuen und alten bzw. energetisch hochwertigen und weniger hochwertigen Gebäuden

Werden solche Unsicherheiten in der Modellierung berücksichtigt, so müssen die reellwertigen Parameter und Eingangsgrößen aus Abbildung 5 durch Wahrscheinlichkeitsdichteverteilungen ersetzt werden. Wie in Abbildung 7 angedeutet, ist das Ergebnis dieser Modellierung dann auch eine Wahrscheinlichkeitsverteilung. Die Berechnungsmethoden der Modelle müssen dafür entsprechend angepasst werden. Für den Gebäudebereich ist hier der einfachste und momentan auch der einzige praktikable Weg Monte-Carlo Simulationen mit den normalen Gebäudemodellen durchzuführen.

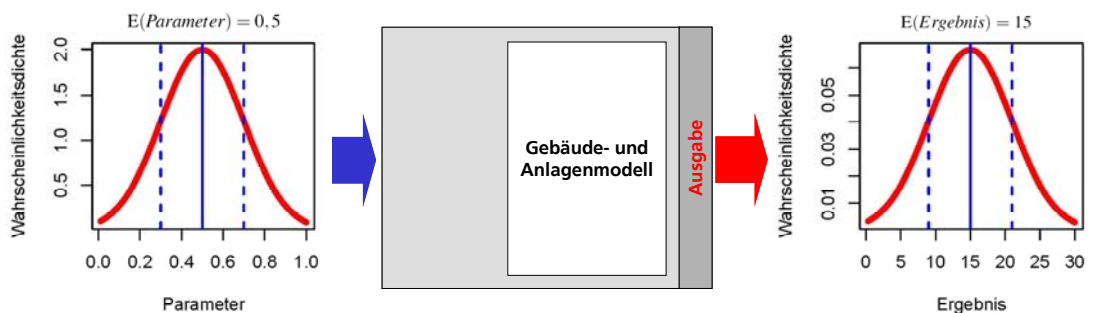


Abbildung 7 Allgemeiner Aufbau eines stochastischen Gebäudemodells

Bevor die einzelnen Modellarten näher erläutert werden, wird im nächsten Abschnitt die Kalibrierung von Modellen beschrieben.

4.2.1. Kalibrierung von Modellen

Modelle können prinzipiell gebäude- bzw. anlagenspezifische Vergleichswerte für den „normalen“ bzw. optimalen Betrieb bereitstellen und sind daher von besonderem Interesse für die Fehlererkennung und Optimierung.

In der Regel ist es dafür notwendig, dass die Parameter des Modells an das reale System angepasst werden. Dieser Vorgang wird „Kalibrierung des Modells“ genannt (vergleiche z.B. [11]).

Bei der Modellerstellung können bezüglich der Art der Spezifikation der Parameter prinzipiell zwei Methoden unterschieden werden, die im englischen Sprachraum als forward bzw. inverse modeling bezeichnet werden [12].

- **forward modeling**

Mit dem Begriff „forward modeling“ wird eine Methode der Modellerstellung bezeichnet, die von der Annahme ausgeht, dass alle notwendigen Modellparameter a priori hinreichend genau bekannt sind, um ein realistisches Abbild des realen Systems zu erstellen. Diese Annahme ist für die meisten Modelle von realen Systemen nur für einen Teil der Parameter zutreffend. Daher beschränkt sich der Einsatz dieser Art der Modellerstellung meist auf die Planungsphase von neuen Systemen, für die keine Messwerte zur „Anpassung“ des Modells zur Verfügung stehen. Die Bezeichnung „forward“ („vorwärts“) soll dies zum Ausdruck bringen (keine „Rückkopplung“ von Messwerten).

Beim forward modeling wird meist mit Modellen gearbeitet, die auf physikalischen Grundprinzipien beruhen und daher Parameter wie z.B. Stoffkennwerte enthalten, die hinreichend genau bekannt sind.

- **inverse modeling**

Beim inverse modeling werden im Gegensatz zum forward modeling ein Teil oder sogar alle Parameter mit Hilfe von Messdaten der Ein- und Ausgangsgrößen des Systems geschätzt. Diese Schätzung kann manuell oder automatisiert erfolgen und hat zum Ziel, die berechneten Ausgangsgrößen des Modells möglichst gut mit den gemessenen Werten des Systems in Übereinstimmung zu bringen. Dieser Vorgang wird auch als „Kalibrierung des Modells“ bezeichnet.

In der Regel eignen sich nur einfache Modelle für eine vollständige Bestimmung der Parameter über inverse Verfahren. Dies trifft insbesondere auf Modelle zu, bei denen eine automatisierte Parameterschätzung zum Einsatz kommen soll. Hier wird häufig mit so genannten „Black-Box“-Modellen gearbeitet, die keine physikalisch bedeutsamen Parameter besitzen (siehe Abschnitt 4.2.3).

In der Praxis (bzw. in wissenschaftlichen Untersuchungen) findet man häufig eine Mischung der beiden genannten Methoden vor. Viele Modelle enthalten sowohl Parameter, die aufgrund der Systemkenntnis des Analytikers hinreichend genau bestimmt werden können (forward), als auch solche, die nur mit Hilfe von Messdaten bestimmt werden können (inverse). Ein typisches Beispiel für Parameter, die bei Gebäuden mit forward modeling bestimmt werden, stellen Wärmeleitfähigkeiten von Bauteilen wie Außenwänden oder Dach dar. Ein Beispiel für Parameter, die mit inverse modeling geschätzt werden können, ist die effektive Gebäudemasse.

Für Modelle, die zur Fehlererkennung und Optimierung eingesetzt werden sollen, ist eine Kalibrierung unerlässlich, um verlässliche Aussagen über das Verhalten des realen Systems treffen zu können. Insofern wird im Bereich Fehlererkennung und Optimierung immer (zumindest für Teilbereiche des Modells) mit inverse modeling

gearbeitet. Allerdings kann sich der Grad der Automatisierung der Kalibrierung bzw. der Parameterschätzung je nach Modell und verfügbaren Messdaten erheblich unterscheiden.

Abbildung 10 zeigt eine schematische Darstellung der Kalibrierung eines Modells. Zur Kalibrierung wird ein so genannter Trainingsdatensatz verwendet, der gemessene Ein- und Ausgangsgrößen des realen Systems über einen bestimmten Zeitraum enthält. Die Parameter des Modells müssen nun so angepasst werden, dass das Modell den Zusammenhang zwischen Ein- und Ausgangsgrößen des Trainingsdatensatzes mit genügender Genauigkeit wiedergibt.

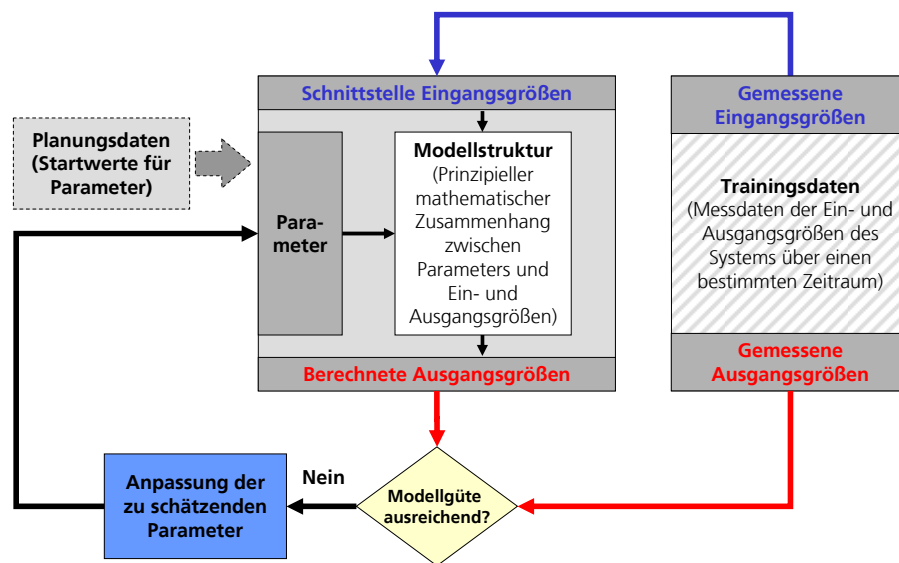


Abbildung 8 Schematische Darstellung der Kalibrierung eines Modells

In der Regel ist die Kalibrierung ein iterativer Prozess, bei dem zunächst mit Hilfe der Modellstruktur, der gemessenen Eingangsgrößen und der bekannten bzw. geschätzten Parameter die Ausgangsgrößen des Systems berechnet werden. Die berechneten Ausgangsgrößen des Modells werden mit denen des Trainingsdatensatzes verglichen. Bei signifikanten Abweichungen müssen die Parameter „angepasst“ und die Systemantwort damit neu berechnet werden. Ist die Abweichung genügend klein und damit die Modellgüte ausreichend, kann der Prozess abgebrochen werden. U.U. ist auch eine Anpassung der Modellstruktur notwendig, die in der Regel nicht automatisch erfolgen kann. Damit steht das kalibrierte Modell für die Fehlererkennung und Optimierung zur Verfügung.

In Abhängigkeit von der Art des Modells, der Art und Anzahl der Parameter und der vorhandenen Messdaten kann die Anpassung der Parameter automatisiert oder manuell erfolgen (siehe folgende Abschnitte).

Zu beachten ist, dass die Kalibrierung kein einmaliger Vorgang ist, sondern u. U. wiederholt werden muss, sobald sich im System signifikante Änderungen ereignen.

4.2.2. White-Box-Modelle

White-Box Models sind Modelle, die auf einer physikalischen Beschreibung der Systeme beruhen und deren Parameter eine physikalische Bedeutung haben. Solche

Modelle werden deshalb im englischen Sprachraum auch „first principal models“ genannt. Zu ihrer Erstellung werden u. a. die Quellen der klassischen ingenieurmäßigen Ansätze genutzt.

Der Detaillierungsgrad von White-Box Modellen kann trotz des physikalischen Ansatzes sehr unterschiedlich sein. Wenn alle gebäudetypischen Phänomene einzeln modelliert werden, sind rasch mehrere hundert Parameter zur Beschreibung notwendig. Mit steigender Ortsauflösung in den Modellen beginnend vom einfachen statischen Ein-Zonen-Modell zu Modellen, die Raumluftrömungen und Tageslichtverteilungen in einzelnen Räumen modellieren, beinhalten die Modelle einige wenige bis hin zu mehreren Millionen Gleichungen. Entsprechend unterschiedlich sind Modellierungs- und Lösungsaufwand sowie Nutzung und Nutzbarkeit.

White-Box Modellen können durch die Gleichungen auf denen sie basieren weiter unterschieden werden in (z.B.):

- statische, dynamische Modelle,
- lineare, nichtlineare Modelle,
- (mehrmals) differenzierbare, stetige, nicht stetige Modelle.

Bei statischen Modellen hängt der output nicht vom zeitlichen Verlauf ab. Bei dynamischen Modellen ist der output dagegen z.B. aufgrund der Berücksichtigung von Speichereffekten vom zeitlichen Verlauf (der inputs) abhängig.

Dynamische Modelle beinhalten in der Regel Differentialgleichungen (DGL). Je nach Art der DGL kann damit weiter unterschieden werden: gewöhnliche, partielle, lineare und nichtlineare DGL.

Tabelle 3 Beispiele für verschiedene Modell- bzw. Gleichungsarten

Art	Beispiel	Anwendung
Statische lineare Gleichungen	$C \cdot \frac{dT}{dt} = U \cdot (T - T_a)$ $\dot{q}_{21} = U \cdot (T_2 - T_1)$ Transmission durch Bauteil	Berechnungen nach WSchVO
Statische nichtlineare Gleichungen	$\dot{q}_{21} = \varepsilon \cdot c \cdot f \cdot (T_2^4 - T_1^4)$ Infrarotaustausch	Gebäudesimulation (Strahlungsaustausch Raumumschließungsflächen)
Dynamische lineare Gleichung lineare gewöhnliche DGL	$C \cdot \frac{dT}{dt} = U \cdot (T - T_a)$ Wärmespeicherung	passive / aktive Energiespeicher
Dynamische lineare Gleichung Partielle lineare DGL	$\frac{\partial}{\partial t} u(x, t) = a \frac{\partial^2}{\partial t^2} u(x, t)$ Wärmeleitungsgleichung	dynamischer Wärmefluss in Bauteilen
Dynamische nicht lineare Gleichung Partielle nichtlineare DGL	$\rho \frac{\partial}{\partial t} \mathbf{u} + \rho (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} =$ $= -\nabla p + \eta \Delta \mathbf{u} + (\lambda + \eta) \nabla (\nabla \cdot \mathbf{u}) + \mathbf{f}$ Navier-Stokes-Gleichungen	Strömungssimulation
Nicht stetige Gleichungen	Schaltelemente / if-Klauseln,	Steuerungen in Gebäudesimulationsprogrammen

Je nach Gleichungssystem, das dem jeweiligen White-Box Modelle zu Grunde liegt, werden verschiedene numerische Methoden zu deren Lösung bzw. zur Generierung der Modellvorhersage verwendet. Teilweise werden auch verschiedene numerische bzw. analytische Methoden für verschiedene Untermodelle verwendet, um die Leistungsfähigkeit der Modelle zu optimieren.

Die Gleichungssysteme, die im Gebäudebereich bei dynamischen Betrachtungen entstehen, können in der Regel nicht mit analytischen Methoden gelöst werden. Dabei muss beachtet werden, dass die Numerik, d.h. die Wahl des Lösungsverfahrens und der numerischen Parameter (z.B. Lösungstoleranzen, Schrittweiten, Iterationsmaximum, Rechengenauigkeit) einen Einfluss auf die Ergebnisse hat. Z.B. bei instabilen oder chaotischen Systemen. Bei solchen Modellen kann die Abhängigkeit von der Numerik die Ergebnisse dominieren.

Durch die numerischen Parameter wird die Genauigkeit und Rechengeschwindigkeit gesteuert. Die Berechnungsergebnisse können durch fehlerhafte numerische Parameter verfälscht werden.

Da die Ermittlung der Zielfunktion bei Optimierungen im Gebäudebereich teilweise sehr aufwendig ist, wird in [8] gezeigt, dass durch eine variabel angepasste Rechengenauigkeit, die Konvergenzgeschwindigkeit der Optimierung gesteigert

werden kann. Dafür muss die Rechengenauigkeit des gesamten Modells vom Optimierungsalgorithmus gesteuert werden können und es ist sehr wichtig, dass die Zielfunktion stetig und differenzierbar ist. Dadurch wird ein chaotisches Verhalten ausgeschlossen. Diese Anforderungen (steuerbare Rechengenauigkeit, stetig, differenzierbare Zielfunktion) werden von vielen Gebäudesimulationsprogrammen nicht erfüllt, deshalb wurde ein Gebäudesimulationsprogramm entwickelt, das diesen Anforderungen genügt. Bestimmte Steuerungselemente (wie z.B. Ein-/Aus-Schalter, Schaltfunktionen mit Hysterese) bewirken, dass auch reale Gebäude diese Anforderungen (stetig differenzierbare Zielfunktion) nicht erfüllen.

Der Modellierungsaufwand für White-Box Modelle muss nicht höher sein als für andere Modelle. Er hängt vor allem vom gewählten Detaillierungsgrad des Modells ab. Es kann sehr einfache White-Box Modelle geben, die trotzdem alle wesentlichen Elemente eines Systems korrekt abbilden.

Eine Voraussetzung für White-Box-Modelle ist, dass die zugrunde liegenden technischen, physikalischen und mathematischen Beschreibungen bekannt sein müssen und darüber hinaus eine numerische Lösung implementierbar sein muss.

Bei White-Box Modelle ist in der Regel a priori bekannt, in welchen Grenzen Extrapolationen möglich sind. Für White-Box Modellen können in der Regel sogar klassische Fehlerrechnungsmethoden angewendet werden, um die Vorhersagegenauigkeit der Modelle zu ermitteln. Für ein kalibriertes White-Box-Model ist daher der Gültigkeitsbereich und damit das Extrapolationsverhalten im Rahmen der Fehlergenauigkeit bekannt.

Die Parameter von White-Box-Modellen sind unterschiedlich genau bekannt. Teilweise liegen sehr genaue Messwerte vor (z.B. Wärmeleitfähigkeiten bestimmter Materialien) und teilweise handelt es sich lediglich um grobe Schätzwerte, da eine genaue Messung mit einem sehr hohen Aufwand verbunden ist (z.B. Fensteröffnungen und Luftwechselraten bei natürlicher Lüftung). Bei der Kalibrierung von White-Box Modellen ist es sinnvoll die weniger genau bekannten Parameter anzupassen. Wobei in der Regel plausible Nebenbedingungen für diese Parameter festgelegt werden (richtige Größenordnung). Falls das Modell damit nicht kalibriert werden kann, deutet das darauf hin, dass die Modellstruktur hinterfragt werden muss.

In der Literatur wird darauf hingewiesen, dass eine zu hohe Anzahl von Parametern eine erhebliche Fehlerquelle darstellen kann [13], [14].

4.2.3. Black-Box Modelle

Black-Box Modelle zeichnen sich dadurch aus, dass sie keine physikalisch bedeutsamen Parameter besitzen. Die Modellstruktur spiegelt in der Regel die Struktur des realen Systems nicht wieder. Sie ist genereller Art und stellt lediglich ein „Vehikel“ dar um ein Modell zu erhalten, das in der Lage ist die Zusammenhänge zwischen Eingangs- und Ausgangsgrößen des realen Systems richtig bzw. mit genügender Genauigkeit abzubilden. Die Parameter werden zu diesem Zweck meist automatisch angepasst [15].

Diese automatische Anpassung der Parameter (Kalibrierung) stellt den größten Vorteil gegenüber White-Box Modellen dar. Der Erstellungsaufwand und die benötigte Rechnerleistung ist für Black-Box-Modelle im Vergleich als geringer einzustufen. Allerdings wird dies dadurch erkauft, dass die Modelle wenig bis keine Einsichten in die „innere Struktur“ des realen Systems erlauben. Die Analysefähigkeiten von Black-Box-Modellen sind dadurch eingeschränkt.

Daher werden Black-Box-Modelle hauptsächlich zur Fehlererkennung eingesetzt, nicht jedoch zur Optimierung, da sie die dazu notwendige Parametervariation aufgrund ihrer Struktur nicht erlauben. Weiterhin ist die Fähigkeit der Extrapolation über den Bereich der Trainingsdaten hinaus häufig nicht oder nur eingeschränkt möglich. Der Vorteil von Black-Box-Modellen liegt in der schnellen und automatisierten Identifikation bekannter „Muster“.

Bezüglich der Modellstruktur von Black-Box-Modellen können – wie auch bei White-Box Modellen - statische und dynamische sowie lineare und nichtlineare Modelle unterschieden werden. In Abhängigkeit der Modellstruktur stehen verschiedene Methoden zur Schätzung der Parameter (Kalibrierung) zur Verfügung. Tabelle 4 gibt einen Überblick über die verschiedenen Ansätze.

Tabelle 4 Übersicht Black-Box Modelle

Art des Modells	Modellstruktur	Parameterschätzung	Beispiel
statische			
Linear	lineare Funktion	lineare Regression (Least-Square-Verfahren)	Energiesignatur auf Basis von Wochenwerten
Nichtlinear	Polynome	lineare Regression (Least-Square-Verfahren)	Pumpenkennlinie
	Beliebige nichtlineare Funktion	Iterative Verfahren, z.B. Levenberg Marquardt	
Dynamische			
Linear	Transferfunktionen-Modelle (ARMA, ARMAX, etc.)	lineare Regression (Least-Square-Verfahren), iterative Verfahren	Wärmestrom durch eine ebene Wand
Nichtlinear	Polynome (z.B. Wiener / Hammerstein Modell, Volterra Modell)	lineare Regression (Least-Square-Verfahren)	Lineares System mit statischen Nichtlinearitäten am Ein- oder Ausgang (z.B. Regelglied mit Sättigungsverhalten)
	Neuronale Netze (sigmoid, wavelet, radial basis networks)	damped Gauss-Newton, Back-propagation	beliebige nichtlineare Systeme

Statische, lineare Modelle

Modelle von statischen Prozessen sind zeit-unabhängig. Sie beschreiben den Zusammenhang von Eingangs- und Ausgangsgrößen für stationäre Zustände. Lineare Black-Box Modelle für statische Prozesse stellen sich somit als einfache lineare Gleichungen dar:

$$y = a_0 + a_1u_1 + a_2u_2 + \dots + a_nu_n$$

mit:

y Ausgangsgröße

u_1 - u_n Eingangsgrößen

a_0 - a_n Parameter

Die Parameter dieser Modelle können mit Hilfe von linearer multipler Regression (Methode der kleinsten Fehlerquadrate oder Least Squares (LS)) einfach und schnell geschätzt werden.

Ein Beispiel für Modelle dieser Art ist z.B. die Energiesignatur eines Gebäudes. Diese stellt einen linearen Zusammenhang zwischen dem Energieverbrauch und verschiedenen Einflussgrößen wie z.B. Außentemperatur, Strahlung und Betriebszeiten dar. Siehe z.B. [16].

Statische, nicht-lineare Modelle

Nicht-lineare, statische Black-Box Modelle stellen einen nicht-linearen Zusammenhang zwischen Ein- und Ausgangsgrößen her. Häufig werden Polynome als Modellstruktur verwendet. Ein einfaches Beispiel mit nur einer Ein- und Ausgangsgröße ist z.B.:

$$y = a_0 + a_1u + a_2u^2 + \dots + a_nu^n$$

Sowohl dieses Modell wie auch viele andere nicht-lineare Modelle sind in ihren Parametern linear oder können entsprechend umgeformt werden (z.B. durch Logarithmierung). Die Parameterschätzung kann deshalb mit der LS-Methode erfolgen.

Kann das Modell nicht so umgeformt werden, dass es in den Parametern linear ist, können zur Parameterschätzung iterative Verfahren wie das Gauß-Newton-Verfahren oder verwandte Verfahren, wie das Levenberg-Marquart-Verfahren eingesetzt werden. Diese sind allerdings numerisch aufwendiger und die Konvergenz der Verfahren ist u. U. nicht gesichert.

Beispiele für ein nicht-lineares, statisches Modell sind Kennlinien-Modelle, etwa von Pumpen.

Sollen die Parameter von statischen Modellen mit Hilfe von Messwerten aus realen Systemen geschätzt werden, so muss darauf geachtet werden, dass die Messdaten statische Zustände repräsentieren. Aus diesem Grund wird vor der eigentlichen Parameterschätzung häufig ein so genannter steady state filter verwendet, um statische Zustände aus den Messdaten zu extrahieren (Einen einfachen steady state filter stellt z.B. die Bildung von Mittelwerten über längere Zeitabschnitte dar).

Dynamische, lineare Modelle

Charakteristisch für dynamische Systeme ist, dass das Verhalten von Ein- und Ausgangsgrößen zeitabhängig sind. Für dynamische lineare Systeme existiert eine ganze Familie von Black-Box Modellen, die als Transferfunktionen-Modelle bezeichnet werden und für die eine umfassende Theorie besteht [15].

Charakteristisch für die Struktur dieser Modelle ist, dass die aktuelle Ausgangsgröße mit Hilfe von linearen Funktionen zeitlich vorgelagerter Ein- und Ausgangsgrößen berechnet wird.

Das einfachste Modell dieser Art ist das finite impulse response model (FIR), das den Zusammenhang der aktuellen Ausgangsgröße zur aktuellen und zeitlich vorgelagerten Eingangsgrößen herstellt:

$$\begin{aligned} y(t) &= B(q) u(t) + e(t) \\ &= b_1 u(t-1) + \dots + b_n u(t-n) + e(t) \end{aligned}$$

mit:

$u(t)$ gemessene Eingangsgrößen

$y(t)$ gemessene Ausgangsgrößen

$e(t)$ Störgröße (normalverteilt)

$b_1 - b_n$ Parameter

q sog. Back shift operator: $q^{-1}u(t) = u(t-1)$; $B(q) = 1 + b_1 q^{-1} + \dots + b_n q^{-n}$

Die in der Praxis verwendeten Black-Box Modelle von linearen, dynamischen Systemen sind alle Abwandlungen dieses Modells. Für den allgemeinen Fall ergibt sich folgender Zusammenhang:

$$A(q)y(t) = \frac{B(q)}{F(q)}u(t) + \frac{C(q)}{D(q)}e(t)$$

Die 5 Matrizen bzw. Polynome A, B, C, D und F stellen dabei die Übertragungsfunktionen dar. In praktischen Anwendungen werden eine oder mehrere dieser Funktionen gleich 1 gesetzt, wodurch sich verschiedene Modellstrukturen ergeben. Die üblichsten sind in Tabelle 5 aufgelistet, zeigt die Struktur eines ARX-Modells.

Tabelle 5 einige übliche lineare Black-Box Modelle für dynamische Systeme

Verwendete Polynom	Kurzform der Modellstruktur	Bemerkung
B	FIR	Finite Impulse Response
AB	ARX	AutoRegressive with eXtra input
ABC	ARMAX	AutoRegressive with Moving Average and eXtra input
AC	ARMA	AutoRegressive with Moving Average
BF	OE	Output Error
BFGD	BJ	Box-Jenkins

Die Bezeichnung „autoregressive“ bezieht sich dabei auf die Einbeziehung von vorangegangenen Messwerten der Ausgangsgröße in das Modell, während sich „moving average“ auf die Behandlung der Störgröße bezieht.

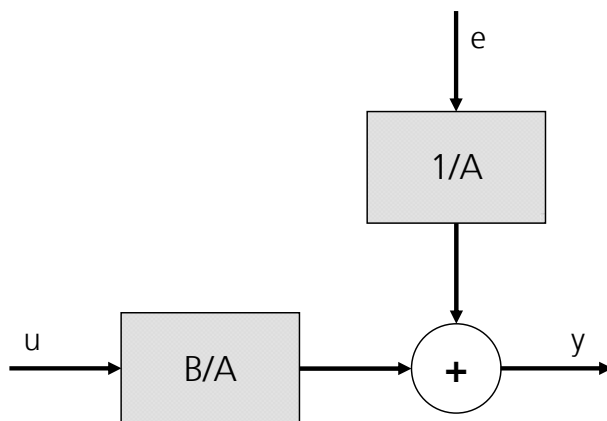


Abbildung 9 Struktur eines ARX-Modells

Im Allgemeinen wird zur Parameterschätzung für Modelle dieser Art einfache und erprobte Methoden verwendet (lineare Regression - Methode der kleinsten Fehlerquadrate; englisch: least squares (LS)). Dabei wird angenommen, dass die Störgröße eine normalverteilte Variable mit Mittelwert = 0 ist.

Falls die Modellstruktur so gewählt wurde, dass das reale System damit abgebildet werden kann, können Transferfunktionen-Modelle einfach identifiziert werden und sind darüber hinaus numerisch unaufwendig. Es lassen sich damit auch „online“ Modelle erstellen, die während des Betriebs eines Systems ständig aktualisiert werden (Rekursive Modelle, adaptive Modelle).

Allerdings bleiben diese Modelle auf lineare, zeitinvariante Systeme beschränkt. Da der reale Gebäudebetrieb jedoch meist zeitvariant und nicht-linear ist, ist der Nutzen dieser Modelle eingeschränkt. Eine übliche Anwendung ist die Modellierung des Wärmedurchgangs durch Ebene Wände.

In gewissem Umfang lassen sich Zeitvarianz (z.B. mit Rekursiven Modellen oder Gewichtsfunktionen für „ältere“ Eingangsgrößen) oder Nichtlinearitäten (z.B. Einbeziehung von statischen Nichtlinearitäten der Ein- oder Ausgangsgrößen bei ansonsten linearen Modellen, Wiener- bzw. Hammerstein Modelle) so behandeln, dass das Problem auf ein lineares Modell zurückgeführt werden kann [15].

Dynamisch – nicht-lineare Modelle

Nichtlineare Modelle bieten deutlich mehr Freiheiten bezüglich der Modellstruktur, was sie einerseits interessant für die Abbildung von realen Systemen macht, andererseits sind sie aber auch numerisch aufwendiger. Neben der Auswahl der Variablen (Messdaten) bzw. Regressoren für das Modell, ist der wichtigste Schritt die Auswahl einer Modellstruktur, die jede beliebige nichtlineare Abbildung des Variablenraums auf die Ausgangsgröße beinhalten kann.

Klassische Methoden zur Identifikation von nichtlinearen, dynamischen Systemen basieren weitgehend auf polynomischen Modellen. Diese haben den Vorteil in ihren Parametern linear zu sein, womit die Parameterschätzung einfach mit Hilfe von linearer Regression erfolgen kann⁵. Allerdings werden andere Formen von nichtlinearen Modellen wie z.B. neuronale Netze derzeit intensiver diskutiert, die nachfolgend kurz beschrieben werden.

Bei der Wahl der Modellstruktur wird häufig auf Reihenentwicklungen zurückgegriffen, die auf einer nichtlinearen Basisfunktion basieren. Somit kann die allgemeine Modellstruktur von nichtlinearen Black-Box Modellen wie folgt beschrieben werden [15]:

$$\hat{y}(t | \theta) = \sum_{k=1}^n \alpha_k g_k(\varphi)$$

mit:

\hat{y} Prädiktor für die Ausgangsgröße des Systems als Funktion der Zeit und der Modellparameter

θ Model parameter, $\theta = [\alpha_1, \dots, \alpha_n, \beta_1, \dots, \beta_n, \gamma_1, \dots, \gamma_n]^T$
(β, γ see text below)

φ Vector with regressors (current and seasonally pre-set measuring values for the input and output and functions thereof)

$\varphi = [\varphi_1, \dots, \varphi_d]^T$; d= number of regressors (dimension of regressor space)

α_k Parameter

⁵ Im Prinzip können beliebige Funktionen für die Variablen gewählt werden, solange das Modell linear in den Parametern ist. Dies wird häufig verwendet um so genannte semi-physikalische Modelle zu erstellen. Bei diesen werden die Funktionen der Variablen (die gemessenen Daten) anhand von prinzipiellen physikalischen / technischen Zusammenhängen gewählt. Diese Modelle können jedoch nicht mehr als reine Black Box Modelle bezeichnet werden.

- g_k "Transfer function" (function for depicting the range of regressors on the output size)
- n Number of parameters (length of the series expansion)

Für die Basisfunktion der Reihenentwicklung werden folgende Annahmen getroffen:

- Alle g_k werden von einer „Mutter-Basisfunktion“ abgeleitet, die mit $\kappa(x)$ bezeichnet wird (bei neuronalen Netzen wird diese auch als Aktivitätsfunktion bezeichnet).
- $\kappa(x)$ ist eine Funktion des skalaren Variable x
- Typischerweise sind die g_k skalierte und verschobene Versionen von κ . Für den skalaren Fall ($d=1$; nur ein Regressor) ergibt sich so:

$$g_k(\omega) = g_k(\omega, \beta_k, \gamma_k) = \kappa(\beta_k (\omega - \gamma_k))$$

mit:

β_k Parameter Gewichtung

γ_k Parameter Translation

Abbildung 10 zeigt einige häufig verwendete nichtlineare Funktionen für die Mutter-Basisfunktion

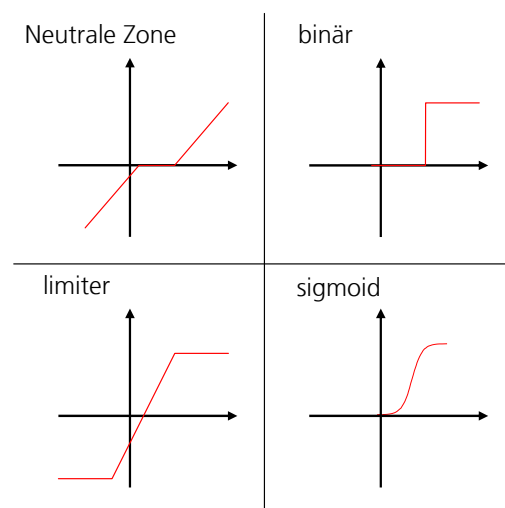


Abbildung 10 Häufig verwendete Funktionen für die Mutter-Basisfunktion

Für den Fall, dass die Dimension des Regressor-Vektors größer als 1 ist ($d>1$), ist g_k eine Funktion mehrerer Variabler. In den meisten Fällen wird diese aus der skalaren Version von κ in einfacher Weise konstruiert. Diese Konstruktionen werden bei Neuronalen Netzen auch als Propagierungsfunktion bezeichnet. Typische Beispiele sind:

- „Skalare Konstruktion“
Der Funktionswert wird mit dem skalaren Produkt der Vektoren von Gewichtungsparemtern und Regressoren berechnet
 $g_k(\omega) = g_k(\omega, \beta_k, \gamma_k) = \kappa((\beta_k)^T \omega + \gamma_k)$
- „Radiale Konstruktion“
Der Funktionswert wird mit dem Abstand der Vektoren von Gewichtungsparemtern und Regressoren berechnet
 $g_k(\omega) = g_k(\omega, \beta_k, \gamma_k) = \kappa((\omega - \gamma_k)^T \beta_k (\omega - \gamma_k))$

Das somit entstandene Modell für $g_k(\omega, \nu)$ lässt sich mit den besprochenen Größen wie folgt beschreiben:

$$g(\varphi, \theta) = \sum_{k=1}^n \alpha_k \kappa(\beta_k (\varphi - \gamma_k))$$

Die Reihenentwicklung wird vollständig bestimmt durch:

- Die skalare Funktion κ der skalaren Variable x .
- Die Methode wie κ angepasst wird, um den mehrdimensionalen Vektor ω als Argument behandeln zu können.

Je nach Ausprägung dieser beiden Eigenschaften ergeben sich verschiedene Modelle. Einige bekannte Modelle sind z.B.:

- Neuronale Netze mit sigmoider Basisfunktion
Diese Modelle ergeben sich aus einer Skalaren Konstruktion (Propagierungsfunktion) mit sigmoider Mutter-Basisfunktion (Aktivitätsfunktion).
Die einzelnen Summanden der Reihenentwicklung werden hier als Neuronen bezeichnet. Die Reihenentwicklung (n Neuronen) selbst stellt ein so genanntes Layer dar. Die Netzstruktur ergibt sich bei diesen Modellen dadurch, dass die Ausgabewerte von Neuronen eines Layers in ein weiteres Layer übergeben werden (eine weitere Reihentwicklung).
- Wavelet Netzwerke oder Neuronale Netze mit Radialer Basisfunktion
In beiden Typen wird Gauss-Funktion als Mutter-Basisfunktion mit einer Radialen Konstruktion kombiniert.

Zur Schätzung der Parameter werden in diesem Fall gedämpfte Gauss-Newton Verfahren oder der so genannte Backpropagation-Algorithmus verwendet [17].

Aufgrund der vielfältigen Möglichkeiten der Erstellung nichtlinearer Modelle ergeben sich zahlreiche Untergruppe zu den genannten Typen wie neuronalen Netzen und Wavelet-Netzen, die hier nicht ausführlich besprochen werden sollen. Gemessen an der Anzahl der Veröffentlichungen, die die Erstellung und Anwendung der oben genannten Modelle behandeln, ist ein starkes Interesse an diesen Ansätzen auszumachen (Eine Online Recherche beim Verlag Wiley Interscience in den Bereichen Engineering und Mathematics and Statistics liefert über 230 Artikel, die sich mit der Erstellung und Anwendung neuronaler Netze befassen).

Die Vorteile von nichtlinearen Black-Box Modellen, wie sie etwa neuronale Netze darstellen, liegt auf der Hand: Mit ihnen können prinzipiell beliebige reale, nichtlineare, dynamische Systeme abgebildet werden, bei gleichzeitig überschaubarem numerischen Aufwand.

Allerdings sind auch einige deutliche Nachteile zu nennen, die eng mit dem Black-Box Charakter verbunden sind, d.h.: Zur Parameterschätzung benötigen diese Modelle große Datenmengen, während gleichzeitig eine Extrapolation über den Bereich der Trainingsdaten nicht gegeben ist. Da die Parameter nicht physikalisch sind, eignen sie sich nicht zur Optimierung.

Zum Abschluss soll noch erwähnt werden, dass auch für oszillierende Prozess-Signale Modelle existieren, die Black-Box Charakter haben, wie z.B. die Fourier-Analysen. Diesen wird im FED und Optimierungsprozess bei Gebäuden jedoch eine weniger bedeutende Rolle beigemessen.

4.2.4. Gray-Box Modelle

Als Gray-Box Modelle werden Misch- bzw. Übergangsformen von White-Box und Black-Box Modellen bezeichnet. Allerdings existieren in der Literatur verschiedene Definitionen, wobei die folgende am häufigsten anzutreffen ist:

- Definition 1 (Art der Parameter):
Gray-Box Modelle zeichnen sich dadurch aus, dass sie sowohl physikalisch bedeutsame als auch physikalisch nicht-bedeutsame Parameter besitzen [13], [18].
- Definition 2 (Bestimmung der Parameter):
Gray-Box Modelle zeichnen sich dadurch aus, dass ihr Parameter ganz oder teilweise auf Grundlage von Messdaten des realen Systems ermittelt werden [14], [1].

Definition 2 definiert keine Art von Modell, sondern vielmehr die Art der Bestimmung der Parameter eines Modells. Diese entspricht wiederum der Definition des inverse modelings aus Abschnitt 4.2.1. Da im Bereich Fehlererkennung und Optimierung Modelle jedoch grundsätzlich in einem inversen Verfahren verwendet werden, bietet Definition 2 kein geeignetes Unterscheidungsmerkmal. Für diesen Bericht wird daher Definition 1 gewählt.

Weiterhin soll noch erwähnt werden, dass in der Literatur häufig auch der Begriff Hybridmodell auftaucht, der jedoch nicht einheitlich verwendet wird und zur Bezeichnung von Mischungen von Modellen oder auch Verfahren aller Art dient.

Gray-Box Modelle können für einzelne Komponenten entwickelt werden oder aber sie ergeben sich aus der Kombination von White-Box und Black-Box Modellen zu einem größeren Gesamtsystem.

Weiterhin können White-Box Modelle durch Black-Box Modelle ergänzt werden, um Phänomene, die nicht mit dem physikalischen Modell abgebildet werden, zu berücksichtigen [19].

Die Black-Box Anteile an den Gray-Box Modellen werden in der Physik und den Ingenieurwissenschaften auch als empirische Modelle bezeichnet und haben in diesen Bereichen teilweise eine lange Tradition. In der Vergangenheit wurden dafür

statistische Methoden verwendet, die durch neuere Entwicklungen wie z.B. neuronale Netze ergänzt wurden.

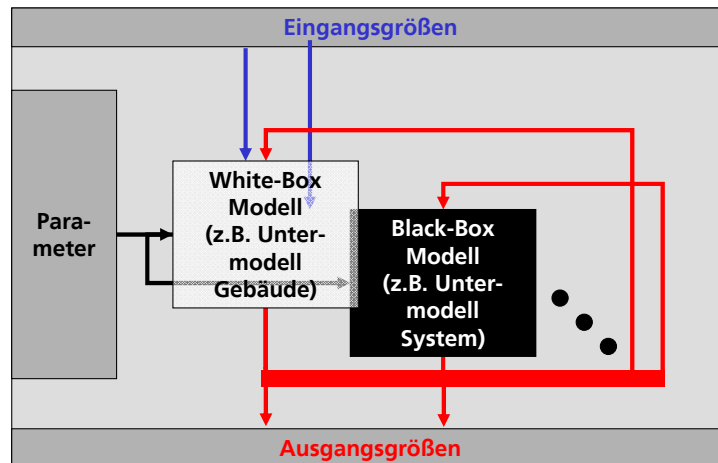


Abbildung 11 Gray-Box Modell im Sinne, dass Untermodelle mit gemischtem Charakter in einem Modell für verschiedene Teile verbunden sind

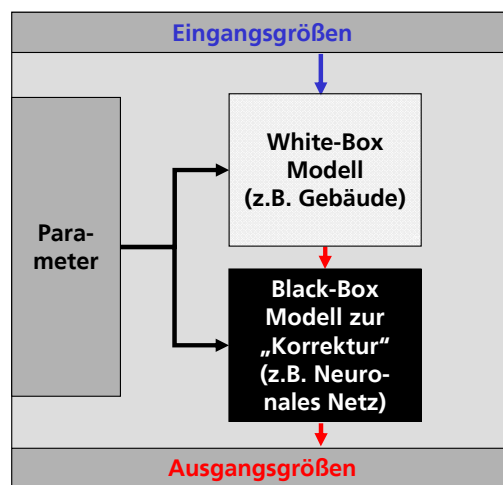


Abbildung 12 Gray-Box Modell im Sinne, dass einem White Model durch ein Black Model zur Fehlerkorrektur (höherer Ordnung) ergänzt wird.

In der Literatur finden sich auch Beispiele von Gray-Box Modellen, die durch Kalibrierung von Black-Box Modellen mit Hilfe von White-Box Modellen gewonnen werden [14]. Dabei werden z.B. lineare, polynomische oder harmonische Funktionen an die Simulationsergebnisse angepasst. Dadurch können sowohl die Anzahl der Parameter als auch der Rechenaufwand drastisch reduziert werden. Die Parameter der angepassten Funktionen haben dann keine physikalische Bedeutung mehr, sind aber aus physikalischen Modellen gewonnen worden (siehe Abbildung 13). Je nach Problemstellung und Wahl der Basisfunktionen, können dabei die guten Extrapolationseigenschaften der white models erhalten bleiben.

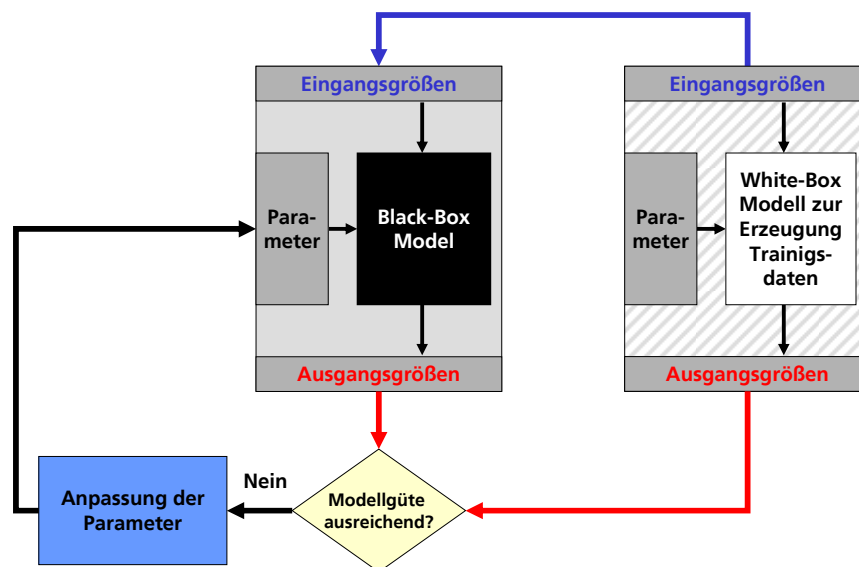


Abbildung 13 Gray-Box Modell im Sinne, dass ein White Model verwendet wird, um ein Black Model zu kalibrieren.

4.2.5. Übersicht der Eigenschaften der Modelle

In den vorangegangenen Kapiteln wurden verschiedene Modellansätze zur Abbildung technischer Systeme vorgestellt. In diesem Abschnitt sollen noch einmal die wichtigsten Eigenschaften bezüglich Modellerstellung, Kalibrierung und Anwendung bei der Fehlererkennung und Optimierung zusammengefasst werden. Tabelle 6 gibt einen Überblick.

Tabelle 6 Zusammenfassung der Vor- und Nachteile verschiedener Modellarten

	White-Box	Gray-Box	Black-Box
Einsicht in die physikalischen Prozesse	+	o	-
Anzahl Parameter → Fehlerquelle	-	o	+
Erstellungsaufwand (Formulierung des Modells)	+ -	+ o	+
Rechengeschwindigkeit	+ o	+ o	+
Erforderliche Trainingsdaten	+	o -	-
Aufwand Kalibrierung	+ -	+ -	+
Extrapolation	+	o	-
Übertragbarkeit auf andere Systeme	+	+ -	- *
Für FDD geeignet	+	+	+
Für Optimierung geeignet	+	o	-

* nur mit neuen Trainingsdaten

Grundsätzlich stehen sich White-Box und Black-Box Modelle gegenüber. Während White-Box Modelle sehr guten Analysefähigkeiten besitzen jedoch häufig einen erhöhten Aufwand bei der Erstellung und Kalibrierung verlangen, verhält es sich bei Black-Box Modellen anders herum. Allerdings müssen White-Box Modelle (bei einfacher Modellstruktur und evtl. geringerer Vorhersagegenauigkeit) nicht notwendigerweise schwerer zu entwickeln sein als Black-Box Modelle.

Für das Systemverständnis sind White-Box Modelle zunächst sehr sinnvoll. Daher liegt es nahe, nach einem Weg zu suchen, der es erlaubt mit einfachsten Annahmen ein White-Box Modell zu erstellen und dieses später weiter zu detaillieren oder mit einem angepassten Black-Box Modell zu ergänzen [13].

Andererseits eignen sich Black-Box Modelle gut, um vorhandene Muster (z.B. Verbrauchsprofile bei Gebäuden) schnell und unaufwendig zu identifizieren und Ausreißer vom „normalen“ Muster zu erkennen. Die identifizierten Muster können außerdem als Eingangsgrößen für andere, detailliertere Modelle dienen. Insbesondere bei komplexen Prozessen, deren „innere Struktur“ evtl. nicht oder nicht genau bekannt ist, können sich Black-Box Modelle als hilfreich erweisen.

4.2.6. Werkzeuge zur Modellerstellung für Gebäude und Anlagen

Eine umfassende Übersicht zu Berechnungswerkzeugen im Bereich Gebäude findet sich auf der Internetseite des US-amerikanischen Departments of Energy (DOE, Building Technologies Program)⁶. Dort finden sich über 200 Softwaretools für verschiedene Anwendungen.

Bei Werkzeugen zur Modellerstellung können verschiedene Kategorien unterschieden werden. Neben Simulationsumgebungen, die speziell auf die Gebäudesimulation ausgerichtet sind, existieren allgemeine Simulationswerkzeuge und allgemeine Numerik-Werkzeuge. Die einzelnen Kategorien werden im Folgenden kurz besprochen.

Spezialisierte Simulationsumgebungen

In der Regel handelt es sich hierbei um eine Kombination von Komponentenbibliothek und Löser. Typische Vertreter dieser traditionellen Gebäudesimulationsprogramme sind z.B. DOE2⁷, ESP-r⁸ oder TAS⁹.

Viele dieser Simulationsprogramme arbeiten mit Modelle mit mittlerem bis hohem Detaillierungsgrad, d.h. es handelt sich um Mehrzonenmodelle mit Algorithmen für den Wärmetransport in mehrschichtigen Bauteilen, Lüftung, solare und innere Gewinne, haustechnische Systeme und die Regelung. Allerdings ist festzustellen, dass die haustechnischen Systeme oftmals nicht denselben Detaillierungsgrad und Umfang aufweisen wie das Gebäudemodell.

In vielen Fällen ist die Möglichkeit erwünscht, den Zeitraum eines Jahres mit einer zeitlichen Auflösung von einer Stunde oder weniger zu simulieren. Dafür ist ein beachtlicher Rechenaufwand notwendig. Das hat dazu geführt, dass zu Beginn der Entwicklung numerische Aspekte eine sehr bedeutende Rolle gespielt haben und die Simulationsprogramme (Modelle) ganz speziell für hohe Rechengeschwindigkeiten optimiert wurden. Hohe Modellierungsflexibilität oder eine besonders klare und nachvollziehbare Umsetzung der physikalischen Prinzipien spielte keine Rolle. Dies hat den Nachteil, dass die Implementierung von Änderungen und Ergänzungen schwierig und aufwändig ist.

Aufgrund der gestiegenen Rechenleistungen der Computer sind heute die Kosten für den Rechenzeitbedarf in vielen Projekten/Fällen sehr viel geringer als der Aufwand zum Erstellen der Simulationsmodelle und zum Integrieren neuer Modelle. D.h. heute stehen eher eine hohe Modellierungsflexibilität oder eine besonders klare und nachvollziehbare Umsetzung der physikalischen Prinzipien im Vordergrund. Ein Modellierungsansatz dafür ist der so genannte Gleichungsbasierte Ansatz („equation based approach“). Dabei werden die physikalischen Gleichungen als Bestandteil des Simulationsmodells mit an das Simulationsprogramm übergeben. Dadurch können sie z.B. im Detaillierungsgrad und bzgl. der Verknüpfungen an das jeweilige Problem angepasst werden [20]. Der Nachteil der gleichungsbasierten Ansätze ist der höhere Rechenaufwand.

⁶ http://www.eere.energy.gov/buildings/tools_directory

⁷ <http://simulationresearch.lbl.gov>

⁸ <http://www.esru.strath.ac.uk>

⁹ <http://ourworld.compuserve.com/homepages/eds1>

Auf wissenschaftlichen Konferenzen zum Gebäudebereich (Bauphysik, IAQ indoor air quality, HVAC, Kühlung, Gebäudesimulation) werden sehr zahlreiche neue mathematisch/ physikalische Modelle (in Form von Gleichungen) präsentiert [20], [21]. Der Vorteil von gleichungsbasierten Simulationsansätzen besteht darin, dass solche neuen Modelle direkt in Simulationen integriert werden können. Dadurch wird auch der Personenkreis, der sich an der Weiterentwicklung der Simulationswerkzeuge beteiligen kann, wesentlich ausgeweitet. Es sind für die Integration neuer physikalischer Modelle keine speziellen numerischen Kenntnisse notwendig.

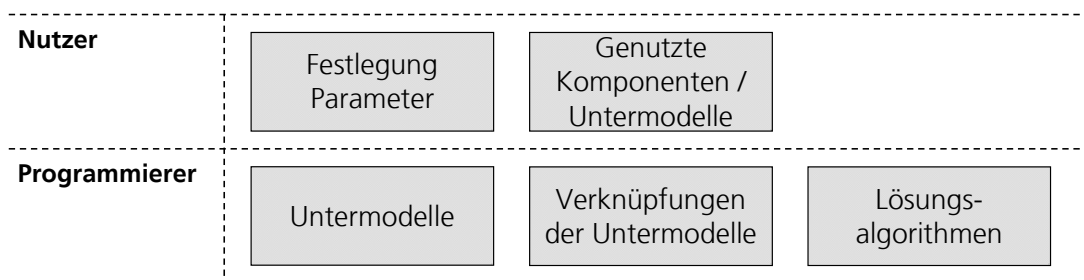


Abbildung 14 Aufgabenverteilung bei traditionellen Methoden

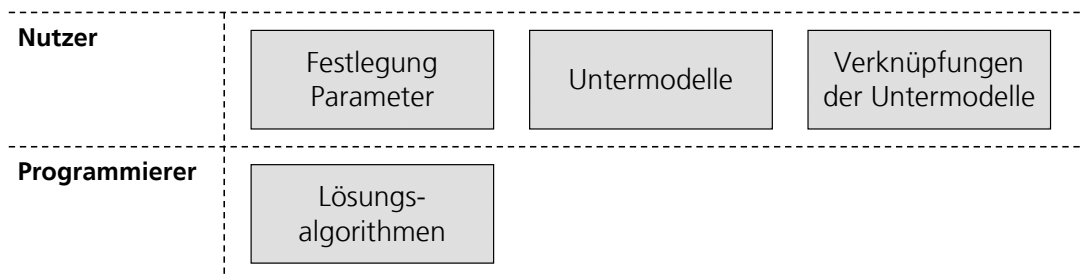


Abbildung 15 Verteilung der Aufgaben bei gleichungsbasierten Methoden

Bei dem Programm TRNSYS¹⁰, das ab 1973 für Simulation von Solaranlagen entwickelt wurde, wurden einige Elemente von gleichungsbasierten Modellen verwirklicht. Die freie Verknüpfung von Untermodellen und die Integration von algebraischen Gleichungen sind damit möglich. Wobei hier die Modellierung mit Gleichungen nicht im Vordergrund stand sondern lediglich als ergänzende Möglichkeit vorgesehen war.

Der einzige Vertreter eines speziell für Gebäude- und Anlagensimulation entworfenen, gleichungsbasierten Simulationswerkzeug stellt z. Zt. das Programm IDA-ICE¹¹ dar.

¹⁰ <http://sel.me.wisc.edu/trnsys>

¹¹ IDA-ICE 3.0, www.equa.se, 2007

Allgemeine Simulationswerkzeuge

Diese Werkzeuge erlauben prinzipiell die Abbildung beliebiger Systeme. Typische Vertreter dieser Gruppe stellen Matlab/Simulink¹², Dymola/Modelica¹³, Mathmodelica¹⁴, IDA-SE oder auch EES¹⁵ dar. Diese Werkzeuge entsprechen prinzipiell dem Typ „gleichungsbasiert“ und werden mit Erfolg im Gebäude und insbesondere im Gebäuderegulierungsbereich eingesetzt [22].

Während Matlab / Simulink immer noch einen Quasi-Industriestandard darstellt (insbesondere im Bereich Regelung), hat vor allem Dymola / Modelica in den letzten Jahren an Bedeutung gewonnen

Gleichungsbasierte Werkzeuge lassen die Integration traditioneller Bausteine oft zu, so dass in kritischen Fällen die Rechenleistung gesteigert werden kann.

Allgemeine Numerik-Werkzeuge

Vor allem im Bereich der Black-Box Modelle bzw. für die Kalibrierung von Modellen und die Optimierung von Systemen sind weitere numerische Werkzeuge notwendig, die die entsprechenden Algorithmen zur Verfügung stellen.

Es handelt sich dabei hauptsächlich um verschiedene Minimierungs-Algorithmen (linear, nichtlinear) und spezielle statistische Verfahren (z.B. robuste lineare Regression). Diese Werkzeuge werden somit im Allgemeinen nicht zur Simulation von dynamischen Systemen, sondern für die Datenanalyse, die Kalibrierung von Modellen und die Optimierung eingesetzt. Beispiele sind etwa Matlab¹⁶, R¹⁷, scipy¹⁸, GenOpt¹⁹ oder octave²⁰.

¹² <http://www.mathworks.de>

¹³ <http://www.dynasim.se> bzw. <http://www.modelica.org>

¹⁴ <http://www.mathcore.com>

¹⁵ <http://www.fchart.com>

¹⁶ <http://www.mathworks.de>

¹⁷ <http://www.r-project.org>

¹⁸ <http://www.scipy.org>

¹⁹ <http://gundog.lbl.gov/GO>

²⁰ <http://www.octave.org>

5. Fehlererkennung und -Diagnose

Modellbasierte Fehlererkennung für technische Systeme spielt etwa seit Mitte der 1970er im wissenschaftlich-technischen Bereich eine zunehmend bedeutendere Rolle. Ausgangspunkte der Entwicklung waren die Raum- und Luftfahrt sowie die chemische Industrie [17], [23-25]

Automatisierte Fehlererkennung und –Diagnose im Gebäudebetrieb ist eine relativ junge Disziplin. Erst seit etwas mehr als 10 Jahren werden - hauptsächlich im wissenschaftlichen Bereich - verschiedene Ansätze erprobt. Einen guten Überblick liefert [1], [2].

Hierbei ist zu beachten, dass Fehlererkennung und –Diagnose zwei voneinander getrennte Prozesse darstellen (siehe auch Abbildung 3). Während Fehlererkennung auf die Detektion von Abweichungen vom „normalen“ Verhalten des Systems abzielt, wird bei der Fehlerdiagnose nach den Ursachen der festgestellten Abweichung gefragt. Um von den beobachteten Symptomen auf die zu Grunde liegenden Fehler schließen zu können, muss allerdings bekannt sein, wie sich bestimmte Fehler im Betrieb auf die beobachteten bzw. gemessenen Signale auswirken. Die Fehlerdiagnose erfordert daher mehr Informationen, als allein durch ein Modell bereitgestellt werden können. Auch wenn das Modell in der Lage ist fehlerhaftes Verhalten abzubilden (ein Modell des Fehlers zu erstellen), muss im einfachsten Fall eine Zuordnung von Symptom und Fehler erfolgen. Modelle werden daher vor allem im Bereich der Fehlererkennung eingesetzt.

FED in Gebäude kann auf verschiedenen Ebenen ansetzen. Zum einen können der korrekte Betrieb und die Effizienz von einzelnen Komponenten wie Kältemaschinen oder Lufterhitzern überwacht werden. Zum anderen kann FED auf der Ebene von Systemen (z.B. Heizungssystem mit allem Komponenten wie Erzeuger, Speicher, Verteilung, etc.) oder auch auf Ebene des Gesamtgebäudes implementiert werden. Je nach Anwendungsebene ergeben sich unterschiedliche Herangehensweisen.

Im Idealfall würden sich die Anwendungsebenen ergänzen, so dass sowohl eine Überwachung einzelner Komponenten als auch eine übergeordnete Gesamt-Effizienz und Komfort-Überwachung erfolgt. Von diesem Stand ist die aktuelle Situation jedoch weit entfernt.

Die meisten Methoden zur FED wurden bislang für einzelne Komponenten entwickelt, bei denen Konstruktion und thermodynamisches Verhalten bekannt sind (siehe [2]). Anhand von einzelnen bekannten Fehlern (z.B. Kühlmittelverlust bei Kältemaschinen) werden spezielle FED-Methoden erstellt. Diese genaue Systemkenntnis ist typisch für FED auf Komponentenebene und unterscheidet sie prinzipiell von der auf System- oder Gebäudeebene.

Auf System oder Gebäudeebene sind Systemstruktur und Einflussgrößen oft nicht vollständig bekannt (man denke etwa an den Einfluss des Nutzerverhaltens auf den Energieverbrauch eines Gebäudes). Eine genaue Abbildung des Systems oder einzelner Fehler ist nur eingeschränkt möglich. Oft wird daher mit Visualisierungstechniken oder statistischen Methoden (Modellen) gearbeitet, die eine Fehlererkennung im Sinne einer Ausreißerdetektion erlauben. Die Fehlerdiagnose erfolgt bei zunehmender Komplexität des Systems oft manuell durch den Analytisten.

Aus Sicht der Praxis ist es insbesondere interessant, von Signalen auf der oberen Ebene des Gesamtgebäudes auf Fehler in darunter liegenden Ebenen zu schließen, da

somit der Umfang der notwendigen messtechnischen Ausrüstung reduziert werden kann.

5.1. Klassifizierung der Methoden

5.1.1. Fehlererkennung

(Isermann 2006) gibt einen umfassenden Überblick über die existierenden Methoden zur Fehlererkennung und -Diagnose für technische Systeme im Allgemeinen und schlägt eine Klassifizierung vor. Andere Klassifizierungen für Methoden zur Fehlererkennung finden sich bei [1] oder [25]. Jedoch werden hier Methoden zur Fehlererkennung und -Diagnose nicht eindeutig getrennt, was die Klassifizierung von Isermann für diesen Bericht geeigneter erscheinen lässt. Seine Klassifizierung der verschiedenen Methoden soll hier vorgestellt werden, um danach Beispiele von Anwendungen im Bereich der Gebäudetechnik vorzustellen.

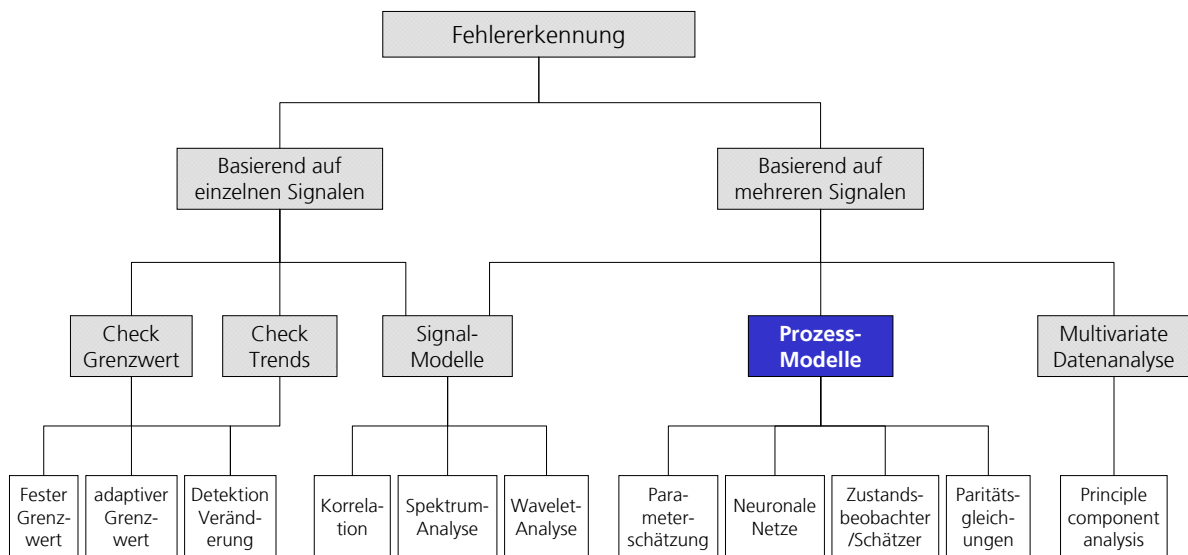


Abbildung 16 Klassifizierung von Methoden zur Fehlererkennung [17]

Isermann teilt die Methoden zunächst nach der Art ein, wie die Vergleichswerte für den Prozess erzeugt werden:

- **Grenzwerte / Trends**
Mit diesen relativ einfachen Verfahren wird geprüft, ob ein ausgewählter Messwert (Signal) oder dessen zeitliche Ableitung einen bestimmten Grenzwert verletzen. Häufig werden statistische Hilfsmittel wie Mittelwerte verwendet
- **Signalmodelle**
Häufig zeigen Signale aus Prozessen ein oszillierendes Verhalten (harmonisch oder stochastisch). Für diese Signale können Black-Box Modelle z.B. auf Basis von Korrelationsanalysen, Fourieranalysen, ARMA-Modelle oder Waveletanalysen erstellt werden. Falls Änderungen der Signale mit Fehlern in Verbindung stehen, können diese somit detektiert werden. Der Unterschied

zu Prozessmodellen liegt darin, dass meist nur Ausgangssignale jedoch keine Eingangsgrößen berücksichtigt werden.

- **Multivariate Datenanalyse**
Für Prozesse, die aufgrund ihrer Größe bzw. Komplexität die Erstellung einer modellbasierten Analyse erschweren, können multivariate Datenanalysen wie z.B. die so genannte Principal Component Analysis (PCA) verwendet werden. Dieses Verfahren eignet sich vor allem bei Prozessen, deren Messsignale eine hohe Korrelation zeigen. Grundidee der PCA ist es die Dimension des Datenraums zu reduzieren, indem aus den bestehenden Messdaten wenige neue „künstliche“ Variablen²¹ erzeugt werden, die unkorreliert sind und in die „Richtungen“ der größten Varianzen des Datenraums zeigen. Somit können Änderungen dieser neuen „Hauptkomponenten“ detektiert werden.
- **Prozessmodelle**
Die Fehlererkennung mit Hilfe von Prozessmodellen bietet vielfältige Möglichkeiten. Prozessmodelle stellen den Schwerpunkt dieses Berichts dar und sollen daher im Folgenden eingehender betrachtet werden.

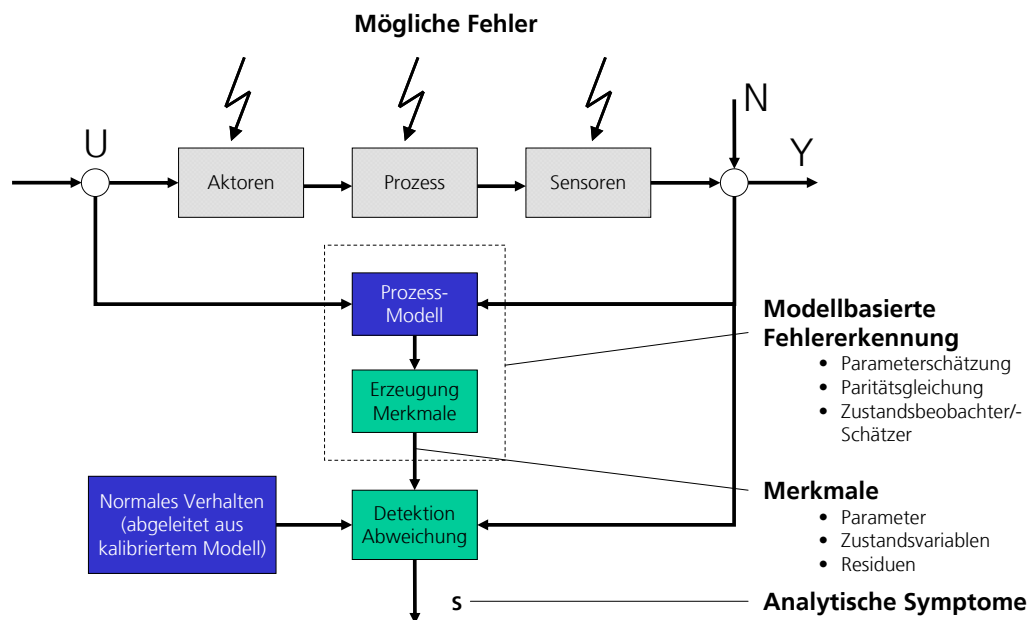


Abbildung 17 Prinzipschema der Fehlererkennung mit Prozessmodellen, U= Eingangsgroesse, Y = Ausgangsgroesse, N = Störgröße [17]

Der generelle Einsatz von Prozessmodellen ist in Abbildung 17 dargestellt. Zunächst ist der Prozess selbst mit Aktoren am Eintritt und Sensoren am Ausgang zu erkennen. Fehler können in jeder Komponente auftreten.

Prozessmodelle können in verschiedener Weise zur Fehlererkennung in Prozessen genutzt werden.

- **Fehlererkennung mit Hilfe von Parameteridentifikation**
In der Regel müssen Prozessmodelle kalibriert werden, damit sie in der Lage sind den realen Prozess abzubilden, d.h. es erfolgt zunächst eine

²¹ Durch Linearkombination der gemessenen Variablen

Parameterschätzung. Diese kann jedoch ebenso zur Fehlererkennung genutzt werden, indem sie kontinuierlich während der Laufzeit des Prozesses ausgeführt wird und ungewollte Änderungen der Parameter detektiert, die als Ergebnis eines Fehlers interpretiert werden können.

- Fehlererkennung mit Hilfe der Residuen der Ausgangssignale
Das kalibrierte Modell kann im einfachsten Fall dazu verwendet um Vergleichswerte für die Ausgangsgröße des Prozesses zu erzeugen. Weichen die Modellvorhersage und das Ausgangssignal des Prozesses voneinander ab, kann das auf einen Fehler hinweisen.
- Fehlererkennung mit Hilfe von Paritätsgleichungen
Mit einem bekannten bzw. kalibrierten Modell können weiterhin Fehler detektiert werden, indem das Verhalten von realem Prozess mit dem des Modells verglichen wird. Mit Hilfe des Modells kann der Einfluss verschiedener Fehler (multiplikative Prozessfehler oder additive Fehler am Ein- und Ausgang) in Form von Abweichungen vom idealen Verhalten (Residuen) berechnet werden. Aus den Eigenschaftender Residuen lässt sich somit auf die Art des Fehlers schließen.
- Fehlererkennung mit Hilfe von Zustandsbeobachtern / Schätzern
Fehler in einem Prozess führen in der Regel auch zur Änderung der Zustandsvariablen, weshalb diese ebenfalls als Residuen für die Fehlererkennung eingesetzt werden können. Diese Methode setzt jedoch die exakte Kenntnis der Struktur und der Parameter des Modells voraus (White-Box Modell).

5.1.2. Fehlerdiagnose

Ziel der Fehlerdiagnose ist es, aus den ermittelten Symptomen zurück zu schließen auf Ort, Art und Ausmaß des zugrunde liegenden Fehlers. Dies setzt Wissen darüber voraus, wie Symptome und Fehler zusammen hängen. Hierbei können zwei Fälle unterschieden werden:

- Kausalität von Fehler und Symptom nicht bekannt
In diesem Fall können Klassifizierungs-Methoden zur Fehlerdiagnose herangezogen werden. Diese Methoden versuchen auftretende Fehler anhand ähnlicher Symptome zu klassifizieren. Die Klassen müssen experimentell bzw. durch „Lernen“ ermittelt werden. Dadurch entsteht eine unstrukturierte Wissensdatenbank.
- Kausalität von Fehler und Symptom bekannt
Ist der kausale Zusammenhang zwischen Fehler und Symptom bekannt, können durch kausales Folgern die Fehler ermittelt werden. Je nachdem, ob die beobachteten Symptome diskreter (bzw. binärer) oder kontinuierlicher Natur sind, können verschiedene Verfahren zur Folgerung bzw. zur Schätzung eingesetzt werden.

Abbildung 18 gibt einen groben Überblick über die verschiedenen existierenden Methoden, der ebenfalls aus [17] entnommen ist.

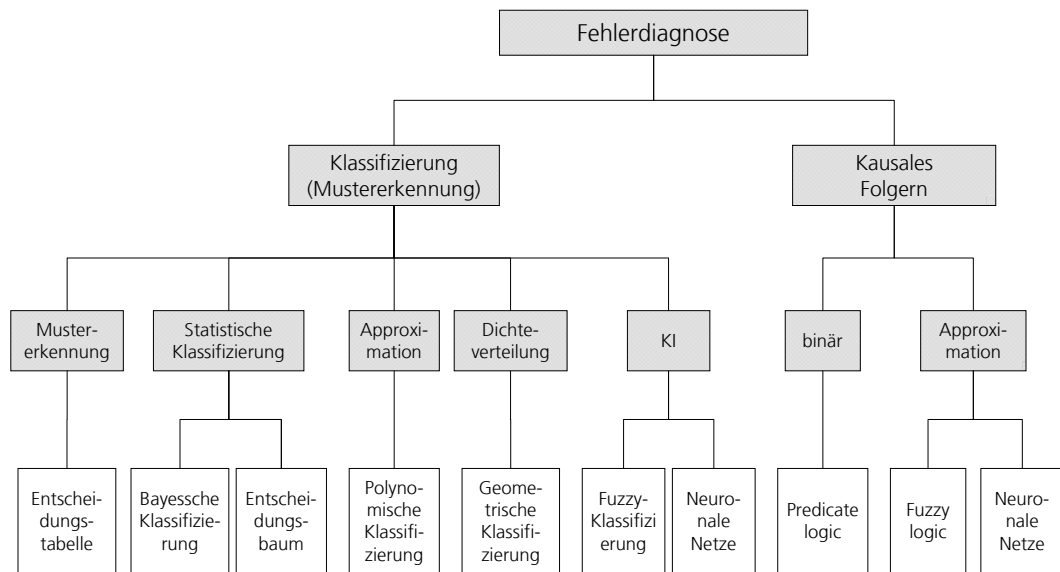


Abbildung 18 Klassifizierung der Methoden zur Fehlerdiagnose [17]

5.2. FED im Bereich Gebäudetechnik

Wie bereits erwähnt ist die Forschung und Anwendung von Techniken zur Fehlererkennung und Diagnose in Gebäuden eine relativ junge Disziplin. Das zunehmende Forschungsinteresse in diesem Bereich über die letzten 10-15 Jahre, lässt sich unter anderem anhand der Schwerpunktsetzung der Internationalen Energie Agentur (IEA) in verschiedenen Annexen im Programm Energy Conservation in Buildings and Community Systems (ECBCS) zeigen.

5.2.1. Literaturrecherche

Eine aktuelle Übersicht über den Stand der FED im Gebäudebereich – auch unabhängig von den IEA ECBCS Annexen - gibt Katipamula [1]. In einem zweiteiligen Artikel wertet er über 100 Veröffentlichungen zum Thema aus.

Er stellt fest, dass die meisten der zum Zeitpunkt der Veröffentlichung (2004) abgeschlossenen Studien sich mit einzelnen Komponenten bzw. Systemen beschäftigen. In seinem Artikel stellt er daher nur Arbeiten vor, die sich mit Kompaktklimageräten, Wärmepumpen, Kompressionskältemaschinen und Lüftungsanlagen beschäftigen.

Die meisten der Untersuchungen verwenden vereinfachte physikalische Modelle (White-Box) oder Black-Box Modelle in Form von Regressionsmodellen, Neuronalen Netzen oder ARX-Modellen. Detaillierte White-Box Modelle kommen kaum zum Einsatz.

Zur Diagnose kommen meist Klassifizierungsmethoden zum Einsatz, die den Charakter der Residuen (Differenz der Ausgangssignale des Modells und des realen Systems). Die Verfahren werden eingesetzt, um Fehler, deren Charakteristika aus Experimenten oder Simulationen bekannt sind, zu erkennen. Obwohl fast alle Autoren (unabhängig vom gewählten Verfahren) berichten, dass das von Ihnen verwendete Verfahren in der Lage ist, die gesuchten Fehler zu identifizieren, gibt

Katipamula zu bedenken, dass die meisten Untersuchungen lediglich im Labor und nicht als Feldtest durchgeführt wurden.

Katipamula kommt darüber hinaus zu folgenden Ergebnissen:

- Auf dem Markt existieren nur sehr wenige Produkte für die FED, die jedoch in der Regel sehr (auf einzelne Komponenten) spezialisiert und nicht automatisiert sind.
- Die (automatische) Generierung von Fehler-Schwellwerten für die Fehlerdetektion wurde noch nicht eingehend untersucht, stellt aber einen wichtigen Aspekt bei der Automatisierung dar.
- Die Kalibrierung von Modellen erfordert Trainingsdaten des korrekten Betriebs. Für die Anwendung der Modelle auf breiter Basis ist daher die Entwicklung der Modelle entweder während der Herstellung der betreffenden Komponente im Werk oder aber automatisiert, während des Betriebs (online) notwendig. Vor allem für den zweiten Ansatz besteht noch Forschungsbedarf. Der Einsatz in Bestandsgebäuden wird als problematisch gesehen, da für die Kalibrierung des Modells Messdaten des korrekten Betriebs benötigt werden. Bei Bestandsgebäuden ist jedoch vielmehr damit zu rechnen, dass Anlagen und Komponenten vor einem Energie-Audit nicht korrekt betrieben werden.
- Die meisten der zitierten Untersuchungen arbeiten bei der Fehlerdiagnose mit Verfahren, mit denen einzeln auftretende, signifikante Fehler erkannt werden können. Eine Erkennung von mehreren gleichzeitig auftretenden Fehlern ist damit nicht möglich. Auch hier besteht Forschungsbedarf.
- Im Allgemeinen ist der Umfang an verfügbaren Messdaten in Gebäuden gering und dessen Qualität niedrig. Die Entwicklung von kostengünstigen und verlässlichen Sensoren ist daher ein wichtiger Schritt zur Verbreitung von FED in Gebäuden. Als große Chance wird die allmähliche Einführung offener Kommunikationsstandards im Bereich der Gebäudetechnik gesehen.
- Informationen zum Kosten-Nutzen-Verhältnis des Einsatzes von FED in Gebäuden sind nur unzureichend verfügbar.

Somit ergibt sich auch aus der Sicht von Katipamula ein großer Forschungsbedarf im Bereich FED in Gebäuden, der vor allem den praktischen Einsatz und die Automatisierung betrifft.

Im Zug der der Literaturrecherche zum Thema FED und Optimierung wurden Am Fraunhofer ISE über 300 Veröffentlichungen gesammelt, von denen etwa 80 intensiver gesichtet wurden. Aufgrund dieser Vielzahl und der zum Teil recht ähnlichen Inhalte, werden an dieser Stelle nicht einzelne Veröffentlichungen vorgestellt, sondern es wird eine inhaltliche Gruppierung vorgenommen. Zu den einzelnen Gruppen jeweils einzelne besonders exemplarische Veröffentlichungen genannt.

- **FED mit Modelle von Einzelkomponenten oder Subsystemen**
Diese Veröffentlichungen behandeln die Fehlererkennung und Diagnose von Einzelkomponenten wie Kältemaschine, Heizregister oder zentralem Lüftungsgerät. Häufig wird ausgehend von einer Reihe bekannter Fehler eine Methode entwickelt. Um das Verfahren möglichst einfach implementierbar zu halten, werden häufig Black-Box Modelle (Regression, NN, ARX, ARMAX) oder vereinfachte White-Box Modelle verwendet. In einigen Veröffentlichungen

wird lediglich ein Modell entwickelt, wobei die Eignung zur FED lediglich als mögliches Einsatzgebiet genannt wird.
[26], [27], [28]

- **FED mit vereinfachten Modellen von Gebäuden / Gebäudezonen**
Neben Einzelkomponenten ist als ein Schwerpunkt in der Forschung die Erstellung vereinfachter Modelle für Gebäude oder Gebäudezonen zu nennen. Diese Modelle sollen dazu dienen das thermodynamische Verhalten des Gebäudes wiederzugeben bzw. die Last für die Anlagen bereit zu stellen. Darauf aufbauend kann eine FED oder auch eine Optimierung des Anlagenbetriebs. Insbesondere die Nutzung passiver Speichermassen des Gebäudes zur Reduzierung der Kühllast kann hier als eigenständiges Thema ausgemacht werden. Die Modellansätze reichen wieder von vereinfachten physikalischen Modellen bis zu reinen Black-Box Modellen. In einigen Fällen wird nur die Zone abgebildet, in anderen wird das Gebäudemodell mit einer Anlage (meist Lüftung) kombiniert bzw. ergänzt [29], [30], [31], [32], [33], [34].
- **FED mit Modellen zur Identifizierung / Vorhersage von Lastprofilen**
Für die FED auf der Ebene des Gesamtgebäudes werden häufig Modelle für die Identifikation stündlicher oder täglicher Verbrauchsprofile verwendet. Es werden meist Black-Box Modelle verwendet, die mittels Messdaten des Gesamtenergieverbrauchs (z.B. Fernwärme oder Strom) kalibriert werden. Sie sollen anschließend dazu verwendet werden, ungewöhnliche Energieverbräuche zu detektieren, indem die Residuen von aktuellem und vorhergesagtem Verbrauch ausgewertet werden.
[35], [36], [37], [38], [39], [40].

Als weitere Schwerpunkt bei den Veröffentlichungen kann das Thema Visualisierung genannt werden, dass sich allerdings als übergreifendes Thema durch viele Veröffentlichungen zieht. Beispielhaft können genannt werden [41] und [42]

5.2.2. IEA ECBCS Annexe

1996 wurde, als Ergebnis des IEA ECBCS Annex 25 ("Real Time Simulation of HVAC Systems for Building Optimisation, Fault Detection and Diagnosis", 1991-1995) [5] as „Building Optimization and Fault Diagnosis Source Book“ veröffentlicht. Das Thema FED in Gebäuden wird hier als neue bzw. zukünftige Aufgabe beschrieben. Das Source Book gibt einen umfassenden Überblick über die häufigsten Fehler in haustechnischen Systemen und FED-Methoden im Allgemeinen. Aufgrund der Zielsetzung, Fehler mit Hilfe von Prozessmodellen bzw. Simulation zu analysieren, wurden weiterhin zahlreiche Komponentenmodelle entwickelt bzw. zusammengestellt. Folgende Systeme wurden betrachtet: Öl-Kessel, Kältemaschinen, Wärmepumpen, Lüftungssysteme und Speicher. Eine der zahlreichen Empfehlungen hierbei lautet, Modelle so einfach wie möglich zu halten. Dementsprechend wurde häufig mit statischen Modellen gearbeitet. Der Annex gibt einen guten theoretischen Überblick (wahrscheinlich erstmalig in diesem Umfang), jedoch ohne die Methoden in Feldstudien zu evaluieren. Dies wird als Folgeprojekt angeregt.

Dieses Folgeprojekt war der IEA ECBCS Annex 34 („Computer-Aided Evaluation of HVAC System Performance“, 1997-2001) [6] dessen Ergebnisse 2001 in dem Bericht „Demonstrating Automated Fault Detection and Diagnosis Methods in Real

Buildings“ zusammengefasst wurden. Dort finden sich zahlreiche Fallstudien von FED im Gebäudebereich mit verschiedenen Werkzeugen. Insgesamt wurden über 26 Werkzeuge in mehr als 20 Gebäuden getestet. Im Gegensatz zu Annex 25 finden sich hier FED Methoden, die nicht nur auf der Ebene der Komponenten, sondern auch auf der Ebene des Gesamtgebäudes angewendet werden können. Die Autoren kommen unter anderem zu folgenden Schlüssen:

- Die Fehlerdiagnose in haustechnischen Systemen auf Grundlage von vorhandenen Messdaten aus dem laufenden Betrieb ist schwierig. Häufig ist nur eine Fehlererkennung möglich. FED erscheint vor allem für Einzelkomponenten möglich, die in Massenproduktion hergestellt werden und deren „normales“ Verhalten sowie die Charakteristika von typischen Fehlern gut bekannt sind.
- Die Schwellwerte für die Fehlererkennung sollten von Nutzer angepasst werden können.
- FED-Tools müssen verschiedene Betriebszustände eines Systems berücksichtigen, um Fehlalarme zu vermeiden. Dementsprechend müssen Messdaten für diese Betriebszustände vorliegen.
- Die Integration der Fehlererkennung auf Komponentenebene und einer übergeordneten Analyse auf Ebene des Gesamtgebäudes wird als eine der nächsten Forschungsaufgaben ausgemacht.
- Der Aufwand zur Installation und Konfiguration eines FED-Tools muss bei Kosten-Nutzen Analysen berücksichtigt werden, da dieser unter Umständen erheblich sein kann.

Als weiteres Folgeprojekt wurde der IEA ECBCS Annex 40 („Commissioning of Building HVAC Systems for Improved Energy Performance“, 2001-2004) initiiert [4]. Der Annex ist das Ergebnis der Erkenntnis von vielen Forschern auf dem Gebiet der FED im Gebäudebereich, dass die meisten Gebäude, die als Demonstrationsprojekte dienten (z.B. im IEA Annex 34) niemals korrekt bzw. effizient betrieben wurden. Daher lag es nahe ein Projekt zu starten, das sich mit der Inbetriebnahme haustechnischer Anlagen beschäftigt (Der Begriff „Commissioning“ lässt sich mit „Inbetriebnahme“ übersetzen).

Commissioning wird allerdings nicht als einmalige Prozedur sondern als kontinuierlicher bzw. sich wiederholender Prozess beschrieben, der notwendig ist, um ein Gebäude dauerhaft energieeffizient zu betreiben. Dementsprechend wurde unter anderem der Begriff Continuous Commissioning eingeführt, der mittlerweile als Wort-Marke von der Texas Engineering Experiment Station (TEES, tees.tamu.edu) geschützt ist. Im Rahmen dieses Prozesses werden wiederum FED Methoden angewandt. Neben dem Einsatz der Konzepte und Modelle, die bereits in den Vorgängerprojekten entwickelt wurden, kommt im Annex 40 den praktischen Randbedingungen eine höhere Bedeutung zu. So werden Fragen wie die der Organisation des Commissioning-Prozesses, der Verwendung des Gebäudeautomationssystems zur FED und der Datenvisualisierung intensiv behandelt.

Die Autoren des Endberichts stellen fest, dass das Gebäudeautomationssystem - aufgrund der Vielfalt der Informationen, die es bereitstellt - ein wichtiger Baustein für eine kontinuierliche FED ist. Gleichzeitig werden Kommunikationsprobleme aufgrund der Vielzahl der verschiedenen Protokolle im Bereich der Gebäudeautomation als Hürde ausgemacht.

Gleichzeitig wird festgestellt, dass in der Praxis nur vereinzelt FED-Werkzeuge angewendet werden.

Der IEA ECBCS Annex 47 („Cost Effective Commissioning of Existing and Low Energy Buildings“, 2005-2009) nahm diese Fragen auf und versuchte Methoden und Werkzeuge zu entwickeln, die für den Einsatz in der Praxis geeignet sind. Gleichzeitig wurden Hemmnisse für den Einsatz eines Continuous Commissioning untersucht sowie versucht das Kosten-Nutzen-Verhältnis des Verfahrens quantitativ zu erfassen. Die Projektteilnehmer kommen nach Abschluss des Annexes zu folgendem Schluss:

“In many countries, commissioning is still an emerging activity and in all countries, advances are needed for greater formalization and standardization. We hope that this report will be useful to promote best practices, to advance its development and to serve as the basis of further research in this growing field [43]”

Diese Kurzübersicht über die IEA ECBCS Annexe zeigt die Entwicklung des Themas FED im Gebäudebereich von den eher theoretisch, „Modell-getriebenen“ Betrachtungen Anfang der 90er Jahre hin zu „Anwendungs-getriebenen“ Betrachtungen des Einsatzes der Methoden in der Praxis und die Überwindung der damit verbundenen Probleme heute.

5.2.3. Marktverfügbare FED Produkte

Tabelle 7 zeigt eine Übersicht von Werkzeugen für die FED, die im Rahmen oder im Umfeld der IEA Annexe entwickelt wurden und die heute auf dem Markt verfügbar sind.

Tabelle 7 Übersicht FED Tools

Tool	Ebene			FED-Methode				Kopplung mit GA	Bemerkung
	Komponente	System	Gebäude	white / Gray-Box Modelle	Black-Box Modelle	Visualisierung	automatische Fehlerdiagnose		
Energy Witness ¹⁾	x		x			x		x	nur Visualisierung und nutzerspez. Berechnungen
ENFORMA ²⁾		x	x			x	(x)	x	automatische Fehlerdiagnose (regelbasiert) nur für Lüftungssysteme
PACRAT ³⁾	x	x	x		x	x	x	x	Black-Box Modelle für Baseline Fehlerdiagnose regelbasiert
Universal Translator ⁴⁾	x	x	x			x	x	x	Fehlerdiagnose regelbasiert
EMMA-CTA ⁵⁾		x				x	x	x	nur für Lüftungsanlagen Fehlerdiagnose regelbasiert
Energy Expert ⁶⁾			x		x	x	x	x	Black-Box Modelle für Baseline
DABO ⁷⁾	x	x				x	x	x	Fehlerdiagnose regelbasiert
ABCAT ⁸⁾		x	(x)	x		x	x		Modell für Kombination Lüftungsanlage + Zone

(Fortsetzung nächste Seite)

(Fortsetzung)

Tool	Ebene			FED-Methode				Kopplung mit GA	Bemerkung
	Komponente	System	Gebäude	white / Gray-Box Modelle	Black-Box Modelle	Visualisierung	automatische Fehlerdiagnose		
WBD ⁹⁾	x		x		x	x	x	x	nur für Gesamtgebäude und Lüftungsanlage Black-Box Modelle für Baseline Fehlerdiagnose regelbasiert
CITE-AHU ¹⁰⁾		x				x	x	x	nur für Lüftungsanlagen Fehlerdiagnose regelbasiert

Weitere Infos /Anbieter:

- 1) Interval Data Systems (www.intdatsys.com)
- 2) Architectural Energy Diagnostics (<http://www.enformadiagnostics.com>)
- 3) Performance and Continuous Recommissioning Analysis Tool (PACRAT), Facility Dynamics Engineering (www.facilitydynamics.com)
- 4) Universal Translator, PG&E (www.utonline.org)
- 5) EMMA-CTA, FAULT DETECTION AND DIAGNOSTIC OF AIR HANDLING UNIT, CSTB (<http://software.cstb.fr>)
- 6) Energy WorkSite and Energy Expert, NorthWrite, Inc. (www.energyworksite.com)
- 7) Diagnostic Agent for Building Optimisation (DABO) Natural Resources Canada (www.nrcan.gc.ca)
- 8) Automated Building Commissioning Analysis Tool (ABCAT), Texas A&M University, (www.esl.tamu.edu)
- 9) Whole Building Diagnostician, Pacific Northwest National Laboratory, (<http://www.buildingsystemsprogram.pnl.gov/fdd/wbd/index.stm>)
- 10) Commissioning the Installation and Technical Equipment-Air Handling Units (CITE-AHU), NIST / CSTB (www.bfrl.nist.gov)

Keines der oben genannten Werkzeuge ist älter als 10 Jahre, wenige sind älter als 5 Jahre. Dies verdeutlicht noch einmal, dass die Disziplin relativ jung ist. Über die Verbreitung (Anzahl der Lizenzen) der einzelnen Tools liegen keine Zahlen vor.

Neben den in Tabelle 7 genannten Eigenschaften weisen die meisten Tools erweiterte Funktionen zur Datenakquise und Datenverarbeitung auf (Erstellung „virtueller“ bzw. berechneter Datenpunkte, Filterung der Daten). Oft werden auch Verwaltungs- bzw. Datenbankfunktionalitäten wie die Erfassung und Darstellung von Tarifen bzw. Kosten und Kostenstellen angeboten.

Aus der Übersicht wird folgendes deutlich:

- Visualisierung ist die einzige Funktionalität, die alle Werkzeuge aufweisen. In den Produktunterlagen wird diese Funktionalität auch oft besonders betont als „intuitive“ Schnittstelle zum Benutzer. Dabei geht die Art der Visualisierung meist deutlich über die reine Zeitreihendarstellung hinaus (z.B. XY-Diagramme oder carpetplots). Weitere Funktionalitäten, die viele Werkzeuge besitzen, sind Filter oder Gruppierungen für die Daten.
- Fast alle Werkzeuge besitzen Schnittstellen zur direkten Ankopplung an die Gebäudeautomation. Diese Funktionalität wird von den Anbietern ebenfalls oft als wichtige Eigenschaft betont. Nur so wird eine kontinuierliche Überwachung ermöglicht.
- Fast alle Werkzeuge verwenden zur Fehlerdetektion entweder regelbasierte Methoden (auf Basis von Wenn-Dann-Verknüpfungen) oder Black-Box Modelle. Die regelbasierten Methoden kommen dabei häufig bei einzelnen Komponenten oder Subsystemen (z.B. Lüftungssystem) zum Einsatz, bei denen sich eine überschaubare Anzahl von Regeln (bzw. Fehlern) auf Grundlage eines festen Satzes an Messdaten definieren lässt (z.B. besitzt CITE-AHU etwa 60 Regeln um Fehler in Lüftungsanlagen zu erkennen). Black-Box Modelle kommen meist in Form von Regressionsmodellen (z.B. PACRAT) oder Neuronalen Netzen (z.B. WBD) zum Einsatz. Sie werden verwendet, um eine Baseline des Verbrauchs zu identifizieren, die anschließend zur Detektion ungewöhnlich hoher oder niedriger Verbräuche herangezogen wird. D.h. die Baseline repräsentiert den „normalen“ (soll heißen vorhandenen) Energieverbrauch und kann somit nur zur Ausreißerkennung aber nicht zur Optimierung herangezogen werden.
- White-Box Modelle kommen nur bei einem Tool zum Einsatz (ABCAT). Dort allerdings sehr speziell für Lüftungssysteme amerikanischen Stils. Das Modell bildet eine Lüftungsanlage mit dazugehöriger Zone ab (statisch). Heizung und Kühlung der Zone erfolgt ausschließlich über die Lüftungsanlage („all air system“). Obwohl der Ansatz eines einfachen, physikalisch basierten Modells prinzipiell interessant erscheint, lässt sich das Modell nicht ohne weiteres auf Europäische Systeme übertragen, die ein größeres Maß an Varianz in der Konstruktion aufweisen.

5.3. Zusammenfassung

Insgesamt ergibt sich für den Bereich FED in Gebäuden das Bild einer in der Entwicklung begriffenen Technik, die auf dem Gebiet der Forschung zahlreiche verschiedene Ansätze und wenig Systematisierung zeigt. Die Vielzahl der Ansätze, die in der Forschung untersucht werden und deren Eignung oft nur im Labor oder in Simulationsrechnungen untersucht wurde, finden sich jedoch noch nicht in der Praxis wieder.

Die Anzahl der verfügbaren Werkzeuge ist überschaubar und viele sind noch in der Entwicklung begriffen. Sie setzen bei der Fehlererkennung sehr stark auf Visualisierung, einfache Regeln zur Fehlerdiagnose bei hinreichend gut bekannten Systemen und Black-Box Modelle zur Detektion ungewöhnlicher Energieverbräuche.

Auffällig erscheint, dass physikalisch basierte Modelle (White-Box) in der Praxis bisher praktisch keine Rolle spielen, jedoch lange Zeit ein Hauptgegenstand der Forschung

waren bzw. immer noch sind. Die offensichtlichen Schwierigkeiten der Integration von Systemmodellen zur FED in bestehende Anlagen weist noch einmal deutlich darauf hin, dass die verwendeten Modelle möglichst einfach sein sollten. Gleichwohl sind White-Box Modelle von hohem Interesse, da sie prinzipiell nicht nur Abweichungen vom „normalen“ Betrieb detektieren, sondern auch zur Optimierung verwendet werden können.

Die Schwierigkeiten bei der Einführung von FED in den Gebäudebetrieb stellt aber nicht der Mangel an verfügbaren und validierten Modellen von haustechnischen Komponenten und Systemen dar. Es fehlt jedoch eine Systematisierung der Integration von einzelnen Ansätzen zu einer übergeordneten Betriebsüberwachung, die nicht nur einzelne Komponenten, sondern auch die Effizienz des Gesamtsystems überwachen kann.

Die FED (insbesondere die Diagnose) auf Ebene des Gesamtgebäudes oder auch von größeren Subsystemen ist deutlich schwieriger als bei einzelnen Komponenten, da die Systemkenntnis u.U. nicht vollständig ist. Es existieren nur wenige Ansätze, die diese Fragestellung untersuchen.

Probleme bereitet zum anderen die praktische Umsetzung. Eines der größten Probleme stellt hierbei die Datenakquise und die Datenqualität dar. Obwohl unter Umständen ein Gebäudeautomationssystem (GA-System) vorhanden ist, das Daten bereitstellen kann, fehlen oft Sensoren zur strukturierten Erfassung der Energiemengen. Weiterhin ist die datentechnische Ankopplung an GA-Systeme oft mit Kosten im Bereich von 5.000 – 10.000 € verbunden. Die Ankopplung oder sogar Integration der FED an/in das GA-System wird jedoch als wichtiger Schritt für deren weitere Verbreitung betrachtet.

Aus Sicht der Autoren sollten zukünftige Entwicklungen die letztgenannten Fragestellungen (Systematisierung, Datenakquise, Einbindung physikalischer Modelle) adressieren. Parallel sollten die bereits vorhandenen Funktionalitäten der Visualisierung und statistischen Analyse (bzw. Black-Box Modelle) ausgebaut werden.

6. Optimierung

Nachdem ein fehlerfreier Gebäudebetrieb erreicht worden ist, können Optimierungsmaßnahmen durchgeführt werden. Dabei ist neben der Frage wie niedrig der optimale Energieverbrauch ist auch die Frage wie man diesen erreichen kann entscheidend.

Da bei der Optimierung somit nicht nur eine Abweichung vom optimalen Betrieb festgestellt werden soll, sondern auch die Parameter, wie das reale System diesen Zustand erreichen kann, ist es im Gegensatz zur Fehlererkennung üblich, mit Modellen zu arbeiten, die auf physikalischen Grundprinzipien beruhen. Nur so lassen sich Optimierungspotenziale in vollem Umfang erkennen, [13].

Die Optimierung selbst ist die Suche nach den Parametern des Modells, die eine gegebene Zielfunktion, z.B. die Minimierung des Energiebedarfs oder der Energiekosten am besten erfüllen. Üblicherweise sind dabei vorgegebene Randbedingungen zu beachten, wie etwa die Bereitstellung einer bestimmten Raumsolltemperatur oder die erforderlichen Betriebszeiten.

Bei Optimierungsproblemen wird zwischen lokalen und globalen unterschieden. Bei einer globalen Optimierungsaufgabe soll das absolute Minimum im gesamten zulässigen Parameterraum gefunden werden. Globale Optimierungen sind wesentlich schwieriger. Dabei hängt die Lösbarkeit in Abhängigkeit von der verfügbaren Rechenkapazität sehr stark von der Topologie der Zielfunktion ab.

In vielen Fällen gibt es zusätzliche Rand- bzw. Nebenbedingungen, die bei der Optimierung eingehalten werden sollen. Nebenbedingungen können als Gleichungen oder Ungleichungen formuliert sein, oder die zulässigen Parameter sollen einer bestimmten Menge angehören (z. B. natürliche Zahlen). Optimierungs- und Fittmethoden werden inzwischen vielfältig angewendet, z.B. in Ingenieurwissenschaften, Statistik, Physik, Wirtschaft.

Im Folgenden werden zunächst Optimierungsmethoden, die im Gebäudebereich angewendet werden, erläutert. Danach wird deren Anwendung im Gebäudebereich dargestellt.

6.1. Optimierungsmethoden

Zunächst muss eine geeignete Methode zur Ermittlung der Zielfunktion z.B. „Energieverbrauch“ gefunden werden. Darüber hinaus müssen Rand- bzw. Nebenbedingungen eingehalten werden, z.B. muss die prinzipielle Funktionalität des Gebäudes gewährleistet sein, d.h. bestimmte Temperatur-, Beleuchtungs-, Belüftungsverhältnisse u. v. m. müssen sichergestellt werden. In Gebäuden sind meist verschiedene Energieträger anzutreffen, deren Gewichtung in der Gesamtenergieoptimierung festgelegt werden muss. Als Gesamtenergiegröße eignen sich z.B. die Primärenergie oder die Energiekosten, beides hängt vom jeweiligen Gebäude und Gebäudeumfeld ab [44]. Bei diesen Optimierungsaufgaben handelt es sich um Minimierungsprobleme, da das Minimum der Zielfunktion gesucht wird.

Der Aufwand zur Lösung von Optimierungsproblemen ist stark abhängig von den Eigenschaften (Form) der Zielfunktion. Für stetig differenzierbare Zielfunktionen existiert eine Reihe von Standardverfahren zur Optimierung, die eine einfache und

schnelle Lösung ermöglichen²². Sind Zielfunktionen und Nebenbedingungen in den unabhängigen Variablen linear so spricht man von einem linearen Programm²³. Bei einem quadratischen Programm ist dagegen die Zielfunktion quadratisch von den unabhängigen Variablen abhängig, die Nebenbedingungen (auch Ungleichungen möglich) dagegen linear. Sowohl für lineare als auch quadratische Programme gibt es verlässliche Lösungsalgorithmen.

In Abhängigkeit von der Art der Zielfunktion werden daher Optimierungsaufgaben in verschiedene Typen eingeteilt, z.B.: skalare und vektorielle (Multikriterien-Problem), lineare (lineares Programm), ganzzahlige (ganzzahliges Programm), quadratische (quadratisches Programm), nichtlineare, stochastische, konvexe²⁴, konkave. Wobei für viele Typen spezielle Methoden existieren. Nicht-lineare Programme (NP)²⁵ sind schwieriger zu lösen als lineare und quadratische, da hier sowohl die prinzipielle Lösbarkeit, als auch das Konvergenzverhalten nicht bekannt sind.

Schwierig ist die Suche nach globalen Minima oder Maxima (d.h. die Optimierung der Zielfunktion) bei nicht-linearen Problemen, wenn die Funktionen nicht stetig differenzierbar und konvex bzw. konkav sind. Ein Beispiel hierfür (im dreidimensionalen Raum) wäre eine horizontale Fläche, die einzelne unterschiedlich tiefe Löcher aufweist.(d.h. nicht stetig, nicht differenzierbar) Für diese Fälle bleiben nur Methoden, mit denen systematisch oder zufällig die gesamte Fläche abgetastet wird. Noch schwieriger wird die Suche, wenn die Zielfunktion nicht eindeutig ist, d.h. das an einem Punkt im Parameterraum die Zielfunktion mehr als einen Wert annehmen kann, der z.B. davon abhängt, auf welchem Weg man dorthin gelangt.

Im Bereich der Gebäudeoptimierung werden überwiegend skalare Zielfunktionen verwendet. Es gibt jedoch auch Beispiele für Vektoroptimierungsprobleme. Solche Probleme werden auch Pareto-Optimierung genannt. Dabei sollen die Werte einer vektoriellen Zielfunktion²⁶ gleichzeitig optimiert werden. Die Schwierigkeit besteht darin, dass normalerweise nicht alle Komponenten der Zielfunktion gleichzeitig ein Optimum annehmen. Aus den Optima der einzelnen Komponenten kann dann ein einzelner (Gesamt-) Optimalpunkt bestimmt werden. Das kann z.B. durch Gewichtungsfaktoren für die einzelnen Komponenten geschehen (d.h. Rückführung auf nicht vektorielle Optimierung). Bei Gebäuden sind sowohl Energie- als auch Kostenoptimierungsprobleme in der Planungs- und Betriebsphase zunächst inhärent

²² z.B. Newton Verfahren, u. U. nur lokale Extremwerte

²³ Das Wort „Programm“ wird gleichbedeutend zu „Optimierungsmethode“ bzw. „Optimierungsproblem“ (insbesondere im Englischen) verwendet. Das hat mit der Entwicklungsgeschichte von Optimierungsmethoden zu tun. Sie wurden zuerst für militärische Probleme eingesetzt (in Amerika), wobei Aktionspläne (engl: program of actions) optimiert wurden. Programm wird häufig in Verbindung mit Optimierungsproblemen mit Nebenbedingungen verwendet.

²⁴ konvex bedeutet für eine stetig differenzierbare Funktion f : f ist genau dann konvex, wenn ihre Ableitung f' wachsend ist, und genau dann streng konvex, wenn f' streng monoton wachsend ist (konkave analog). Eine allgemeinere Formulierung für nicht differenzierbare Funktionen ist möglich.

²⁵ Nicht-lineare Programme (NP): Zielfunktion und Nebenbedingungen sind nicht linear in den unabhängigen Variablen

²⁶ (d.h. mehrerer Zielfunktionen)

Multivariablen- und Multikriterien-Probleme (d.h. mehrdimensionale, vektorielle) [44]. In den meisten Fällen ist es jedoch eine Rückführung auf skalare Probleme sinnvoll.

Im Gebäudebereich ist in der Regel wenig über Eigenschaften die Zielfunktion bekannt. Nur in Ausnahmefällen handelt es sich hier um ganzzahlige Aufgabenstellungen. Auch die analytischen Eigenschaften der Zielfunktionen im Gebäudebereich sind in der Regel nicht bekannt, so dass nicht auf die Methoden der linearen oder quadratischen Programmierung zurückgegriffen werden kann.

Beschränkungen für abhängige Variablen können durch Bestrafungs- oder Begrenzungsfunktionen berücksichtigt werden (Wetter II 2004 (Genopt) p. 5).

Es existiert keine Optimierungsmethode, die mit Sicherheit oder mit einer bestimmbar Wahrscheinlichkeit unabhängig von der Topologie der Zielfunktion ein globales²⁷ Extremum (Minimum) auffinden kann²⁸. Für bestimmte Arten von Zielfunktionen (z.B. lineare oder stetig, differenzierbare streng konvex oder konkave) ist die globale Konvergenz bestimmter Optimierungsmethoden bewiesen²⁹. Für den Gebäudebereich sind diese Voraussetzungen für die Zielfunktionen in der Regel nicht gegeben, d.h. es gibt hier keine Methode mit der mit Sicherheit eine globale Optimierung erreicht werden kann.

Die meisten globalen Optimierungsmethoden suchen mit einem bestimmten System nach lokalen Extrempunkten (Minima). Es existieren viele verschiedene Methoden die auch bei nichtlinearen, nicht differenzierbaren und sogar nicht stetigen globalen Optimierungsproblemen angewendet werden. Auf einige, die im Gebäudebereich angewendet werden wird im Folgenden näher eingegangen.

Für Optimierungen im Gebäudebereich ist die Ermittlung der Zielfunktion in der Regel aufwendig und es sind keine analytischen Eigenschaften der Zielfunktion bekannt. Aus diesem Grund erscheint es sinnvoll keine zu große Anzahl von Parametern gleichzeitig zu optimieren und den Parameterbereich möglichst sinnvoll zu beschränken, um den Rechenaufwand gering zu halten und sinnlose lokale Optimierungspunkte zu vermeiden.

6.1.1. General Pattern Search GPS

GPS Algorithmen sind Methoden, mit denen der Definitionsbereich der Zielfunktion systematisch auf Extrempunkte (Minima) untersucht wird. Zu diesem Zweck werden regelmäßige Netze definiert, deren Unterteilung sukzessiv verfeinert wird. Ein Vertreter dieser Gruppe ist der Hooke – Jeeves Algorithmus (Hooke 1996).

Dabei wird immer entlang der Koordinatenachsen im Definitionsbereich der Zielfunktion³⁰ gesucht. Wenn die Zielfunktion bei einem Schritt in eine Richtung

²⁷ im gesamten Parameterraum

²⁸ Interessant erscheint auch der Gedanke, das Suchkriterium zu hinterfragen. Manchmal ist es vorteilhafter ein Gebiet mit möglichst vielen eng benachbarten lokalen Minima zu finden als ein eng begrenztes globales Minimum.

²⁹ Da für konvexe (konkave) Funktionen keine lokalen Minima neben dem globalen existieren, ist für diese Funktionen für alle Optimierungsverfahren für die ein Beweis für die lokale Konvergenz existiert gleichzeitig die globale Konvergenz bewiesen. Für die Zielfunktionen im Gebäudebereich aus Gebäudesimulationsprogrammen sind in der Regel keine Aussagen über die Konvexität möglich.

³⁰ Bei Gebäudesimulationen Parameterraum

reduziert werden kann, wird mit zunehmender Schrittweite (z.B. verdoppeln) in diese Richtung gesucht. Führt dies zu keiner Reduktion der Zielfunktion mehr, wird vom letzten (niedrigster Zielfunktionswert) ausgehend wieder entlang aller Koordinatenachsen (positive und negative Richtung) mit der ursprünglichen Schrittweite gesucht. Kann in keine Richtung mehr eine Reduktion der Zielfunktion erreicht werden, wird die Schrittweite reduziert und die Suche entlang aller Koordinatenachsen nach dem beschriebenen System wiederholt (siehe Abbildung 19).

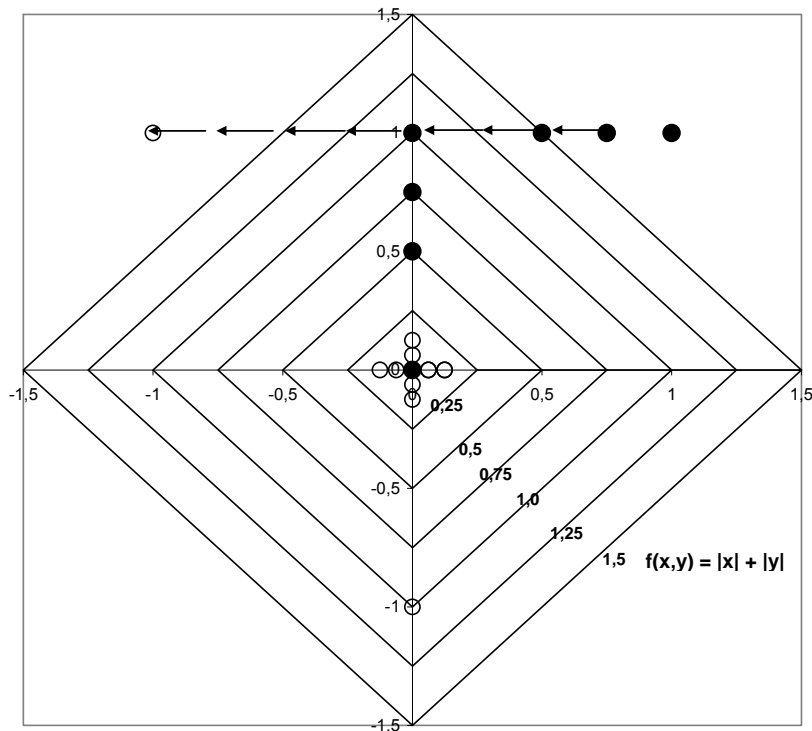


Abbildung 19 Iterationen des Hooke-Jeeves Algorithmus an einem Beispiel

Bei dem Programm GenOpt [8], das im Bereich der Gebäudeoptimierung schon mehrfach angewendet wurde, wurden einige Verbesserungen des Original-Algorithmus von 1961 berücksichtigt.

So kann es z.B. bei sehr unterschiedlichen Skalen der einzelnen Koordinatenachsen (Parameterachsen Größenordnungen Wärmekapazitäten 10^6 kJ/K, Temperaturen 10^1 °C) vorkommen, dass bestimmte Achsen zunächst fast vollkommen von der Suche ausgeschlossen sind. Deshalb ist es sinnvoll unterschiedliche Schrittweiten entlang der einzelnen Koordinatenachsen zu definieren.

Bell und Pike (Bell 1966) haben vorgeschlagen immer zunächst in die Richtung entlang einer bestimmten Koordinatenachse zu suchen, die bei der letzten Suche entlang dieser Richtung erfolgreich war. Dadurch kann die Wahrscheinlichkeit erhöht werden, direkt beim ersten Versuch erfolgreich zu sein. Im Originalalgorithmus wurde immer zunächst entlang der positiven Richtung gesucht. Durch einen Vorschlag von de Vogelaere (Vogelaere 1968) wurde erreicht, dass er nach einer bestimmbar Anzahl von (Ziel-) Funktionsaufrufen endet. Für einmal differenzierbare stetige Funktionen kann gezeigt werden, dass der Algorithmus gegen (lokale) Minima konvergiert.

Um das globale Minimum zu finden, wird der Hooke – Jeeves von vielen verschiedenen Startpunkten aus gestartet (Multi-Start).

Vorteile:

- GPS-Algorithmen (und damit auch der Hooke – Jeeves Algorithmus) benötigen kaum Problemwissen, d.h. sie können auch für nicht kontinuierliche (diskrete) und nicht-stetige Probleme verwendet werden.

Nachteile:

- Die Konvergenz gegen das globale Optimum hängt vom Startpunkt ab.
- Bei Multi-Start HJ relativ hoher Rechenzeitbedarf.

6.1.2. Particle Swarm Algorithmus (PSA) Algorithmus

Der 1995 von Eberhart und Kennedy erstmals erwähnte Particle Swarm Optimization Algorithmus ist eine stochastische, Populations-basierte, heuristische Optimierungsmethode. Dabei wird eine festgelegte endliche Anzahl von Individuen bzw. Teilchen verfolgt. Diese Teilchen bewegen sich im Parameterraum, am jeweiligen Standort wird die Zielfunktion ausgewertet. Die Bewegungen der Teilchen werden entsprechend dem Sozialverhalten von z. B. Vogel- oder Fischeschwärmen modelliert. Jedes Teilchen versucht sich in Richtung seiner eigenen besten Position mit niedrigster Zielfunktion (kognitives Verhalten) und in Richtung einer noch günstigeren Position anderer Teilchen (soziales Verhalten) zu bewegen [8], [45].

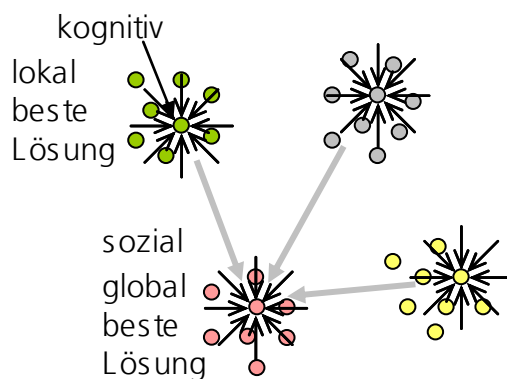


Abbildung 20 Schematische Darstellung PSA

Vorteile:

- PSAs benötigen kaum Problemwissen (z.B. Gradienten), d.h. sie können auch für nicht kontinuierliche (diskrete) und nicht-stetige Probleme verwendet werden.
- PSAs gehören zur Klasse der stochastischen Verfahren und können damit auch für Probleme eingesetzt werden, bei denen die traditionellen Optimierungsverfahren versagen.

Nachteile:

- Die Konvergenz gegen das globale Optimum in einer akzeptablen Zeit ist bei PSAs nicht immer gegeben.

- Der entscheidende Nachteil der PSAs ist der relativ hohe Rechenzeitbedarf bei Problemen, bei denen auch traditionellere Methoden eingesetzt werden können. Methoden, die die Gradienten bei der Suche nach dem Optimum verwenden sind um ein vielfaches schneller.

Es konnte bereits gezeigt werden, dass bei einer Kombination solcher heuristischer Suchverfahren mit traditionellen Verfahren das Konvergenzverhalten verbessert werden kann, ohne die Fähigkeit das globale Optimum zu finden zu erniedrigen [46].

PSA Algorithmen wurden bereits erfolgreich im Gebäudebereich eingesetzt. Die Leistungsfähigkeit war dabei mit GPS und GA (siehe unten) vergleichbar.

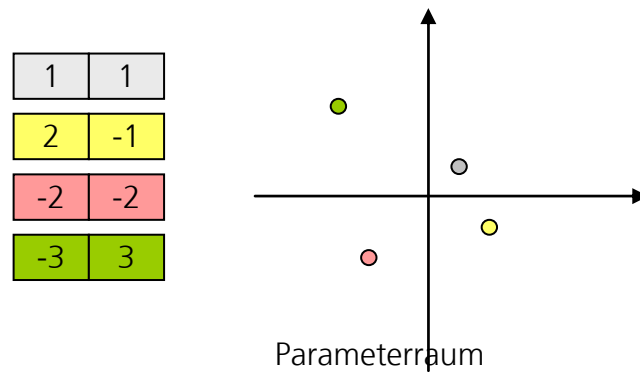
6.1.3. Evolutionary Algorithmus (GA Genetic Algorithm)

Bei den evolutionären Algorithmen handelt es sich ebenfalls um ein heuristisches Verfahren das auf den Prinzipien der biologischen Evolution beruht. Sie sind für Optimierungsaufgaben mit nicht differenzierbaren und nicht stetigen Zielfunktion geeignet. Der genetische Algorithmus ist sehr beliebt, weil er auf Grund der binären Darstellung gut implementierbar ist.

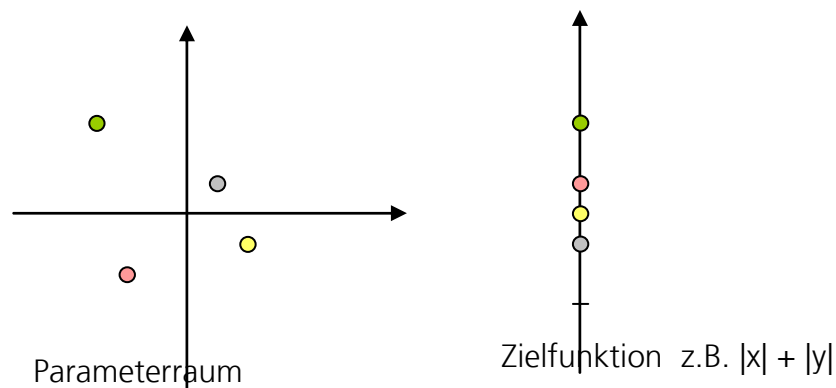
Evolutionäre Algorithmen werden eingesetzt wenn traditionelle Optimierungsmethoden wegen z.B. nicht-stetigen (nicht-kontinuierlichen) und nicht differenzierbaren Zielfunktionen nicht zum Ziel führen. GAs haben sich als besonders effektiv erwiesen, wenn die Lage der lokalen Minima eine regelmäßige Struktur im Parameterraum aufweist. GAs sind robuste Optimierungsmethoden, da sie mit einer Menge von zulässigen Lösungen arbeiten und weil bei der Suche nach dem Optimum dadurch verschiedene Wege ausprobiert werden und sogar Informationen über die verschiedenen Wege über die gesamte Population verbreitet wird.

Bei genetischen Algorithmen wird oft von Individuen geredet. Folgender Ablauf wird typischerweise durchlaufen:

1. Erzeugen (engl. „generate“) einer Population unterschiedlicher „Individuen“ (im Definitionsbereich der Zielfunktion³¹).

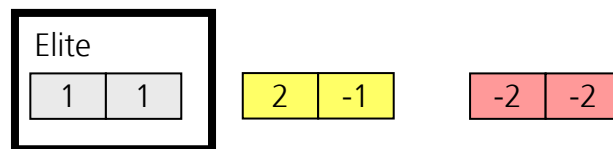


2. Evaluation: Für jedes Individuum wird Zielfunktion („Fitness“) bestimmt.



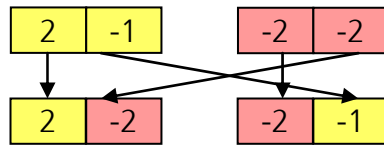
3. Selektion: Auswahl bestimmter Individuen (Eltern) anhand ihrer Fitness und zufallsbeeinflusst (Elite wird unverändert in nächste Generation weitergegeben).

Selektion Elternpopulation

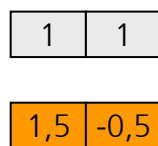


³¹ Bei Gebäudesimulationen Parameterraum

4. *Rekombination (crossover): die Genome (Parameter) verschiedener Individuen werden gemischt und daraus eine neue Generation erzeugt.*



5. *Mutation: Zufällige Veränderungen des Genoms (Parameter) der Individuen der neuen Generation. Eine vorteilhafte Mutationsmöglichkeit ist die Addition von normalverteilten Zufallszahlen (Matlab Optimization Toolbox)*



Neue Generation:



Iteration ab Schritt 2 bzw. ein Abbruchkriterium wird erfüllt.

Je weniger Individuen überleben (hoher Selektionsdruck) und in die neue Generation aufgenommen werden, desto schneller konvergiert das Verfahren zu einem Punkt im Parameterraum. Gleichzeitig nimmt damit die Wahrscheinlichkeit zu, dass nicht das globale Optimum gefunden wird. Es hat sich in vielen Fällen als Vorteil erwiesen, die Zahlen als so genannte grey encoded binaries zu repräsentieren [46]. Dabei unterscheiden sich benachbarte (natürliche) Zahlen jeweils nur durch ein Bit.

Vorteile:

- GAs benötigen kaum Problemwissen (kann jedoch dafür auch gezielt genutzt werden, d.h. können auch für nicht kontinuierliche (diskrete) und nicht-stetige Probleme verwendet werden).
- GAs gehören zur Klasse der stochastischen Verfahren und können damit auch für Probleme eingesetzt werden, bei denen die traditionellen Optimierungsverfahren versagen.

Nachteile:

- Die Konvergenz gegen das globale Optimum in einer akzeptablen Zeit ist bei GAs nicht immer gegeben.
- Der entscheidende Nachteil der GAs ist der relativ hohe Rechenzeitbedarf bei Problemen, bei denen auch traditionellere Methoden eingesetzt werden können. Methoden, die die Gradienten bei der Suche nach dem Optimum verwenden sind um ein vielfaches schneller.

6.1.4. Simplex Algorithmus von Nelder Mead

Ein weiterer Optimierungsalgorithmus der häufig bei nicht-differenzierbaren und nicht-stetigen Zielfunktionen und damit auch im Gebäudebereich angewendet wird ist der Simplex-Algorithmus von Nelder und Mead [47]. Dieses Verfahren wird auch als Downhill-Simplex-Verfahren oder Simplex-Algorithmus bezeichnet.

Der Name des Verfahrens beruht auf dem verwendeten Simplex, das ist der einfachste Körper (bzw. Polytop) in einem n-dimensionalen Raum. Ein Simplex wird von n+1 Punkten aufgespannt. Ein Simplex ist eine konvexe Hülle im n-dimensionalen Raum³². Die Zielfunktion wird an den Eckpunkten des Simplex berechnet. Bei dem Algorithmus wird iterativ der Eckpunkt mit dem höchsten Wert der Zielfunktion (bei Minimierungsaufgabe) wird durch einen neuen ersetzt. Für die Ermittlung des neuen Punktes gibt es bestimmte Regeln die durch Parameter des Verfahrens gesteuert werden. Eine dieser Regeln ist z.B. die Spiegelung des schlechtesten Eckpunktes am Mittelpunkt des Simplex eventuell mit zusätzlichen Faktoren für die Lage des neuen Punktes auf der Geraden durch den Mittelpunkt und den alten Punkt. Eine andere ist Kontraktion des Simplex um den besten Eckpunkt um einen bestimmten Faktor.

Der Downhill-Simplex Algorithmus zeigt ein ca. lineares Konvergenzverhalten bei einer sehr guten Stabilität bei nicht differenzierbaren und nicht stetigen Funktionen. Das Ergebnis bei Funktionen mit ausgeprägten lokalen Minima hängt von den Startwerten ab.

6.1.5. Newton Verfahren

Das Newton Verfahren ist ein numerisch iteratives Verfahren zur Bestimmung von Nullstellen einer stetig differenzierbaren Funktion. Für nicht differenzierbare oder nicht stetige Funktionen ist das Verfahren nicht oder nur beschränkt geeignet. Daher ist die Anwendbarkeit im Gebäudebereich eingeschränkt.

Bei der Anwendung des Newton Verfahrens für Optimierungsaufgaben wird genutzt, dass die erste Ableitung einer zweimal stetig differenzierbaren Funktion im Optimum verschwindet (diese Voraussetzung schränkt die Anwendbarkeit im Gebäudebereich noch weiter ein). Zum Auffinden der Nullstelle der Ableitung wird die Ableitung der Ableitung (2. Ableitung, bzw. Hesse-Matrix) genutzt. Das Verfahren wird (wie die anderen Verfahren) an einem frei wählbaren Punkt gestartet. An diesem Punkt wird eine Taylorentwicklung der Ableitung erstellt. Die Taylorentwicklung wird lediglich bis zu dem linearen Term betrachtet und daraus wird die Nullstelle bestimmt. Diese Nullstelle ist der neue Iterationspunkt des Verfahrens.

$$x_{n+1} = x_n - \frac{f(x_n)}{f'(x_n)}$$

für das eigentliche Newton Verfahren zum Auffinden von Nullstellen bzw. Für die Optimierung lautet die Iterationsgleichung:

$$x_{n+1} = x_n - \frac{f'(x_n)}{f''(x_n)}$$

³² Anschauliche Beispiele für Simplexe: 1-dim: Strecke, 2-dim: Dreieck, 3-dim: Tetraeder

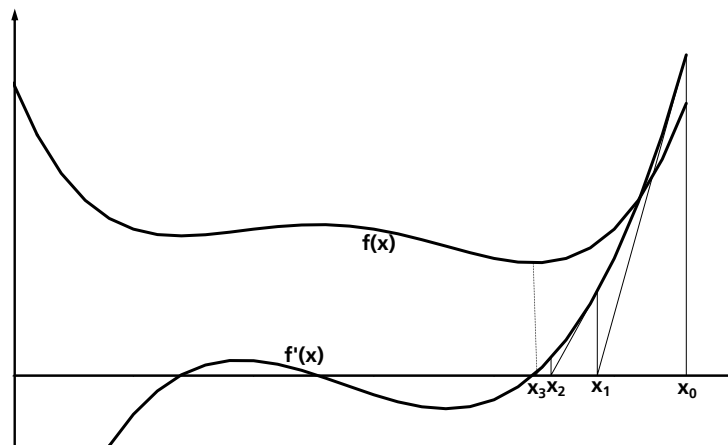


Abbildung 21 Iterationen eines Newtonverfahrens für die Ableitung an einem Beispiel aus \mathbb{R}

Für die Anwendung des Verfahrens müssen die Ableitung nicht analytisch bekannt sein, sie können auch numerisch ermittelt werden (z.B. finite Differenzen). Für $f : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ kann auf die Berechnung der Inversen der Hessematrix (zweite Ableitung im Nenner) durch implizite Verfahren verzichtet werden. Diese Verfahren sind schneller und u. U. stabiler als das normale Newton Verfahren. Sie werden Quasi-Newton-Verfahren genannt. Als Beispiel für ein solches Verfahren kann das von Davidon, Fletcher und Powell (DFP-Verfahren) genannt werden.

Bei der Minimierung von Fehlerquadraten kann das so genannte Gauß-Newton Verfahren angewendet werden. Hierbei handelt es sich um eine Bezeichnung für die Anwendung eines impliziten Newton Verfahrens für eine bestimmte Anwendung bzw. Zielfunktionsart (Fehlerquadratsumme).

Besonders gutes Konvergenzverhalten zeigen die so genannten konjugierten Gradienten Verfahren (engl. **conjugant gradient** CG) die allerdings nur in Bereichen mit positiv definiten Hesse-Matrix³³ anwendbar sind. Numerisch noch etwas günstiger sind Verfahren mit Vorkonditionierung (engl. **preconditioned conjugant gradient** PCG).

Bei mindestens zweimal stetig differenzierbaren Funktionen zeichnen sich die Newton-Verfahren durch hohe Konvergenzgeschwindigkeiten aus. Bei Zielfunktionen mit unbekannt analytischen Eigenschaften³⁴ ist es sinnvoll zunächst zu testen, ob ein Newton Verfahren konvergiert.

$${}^{33} \text{ Hesse Matrix } H = \begin{pmatrix} \frac{\partial^2 f}{\partial x_1 \partial x_1} & \frac{\partial^2 f}{\partial x_1 \partial x_2} & \dots & \frac{\partial^2 f}{\partial x_1 \partial x_n} \\ \frac{\partial^2 f}{\partial x_2 \partial x_1} & \frac{\partial^2 f}{\partial x_2 \partial x_2} & \dots & \frac{\partial^2 f}{\partial x_2 \partial x_n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial^2 f}{\partial x_n \partial x_1} & \frac{\partial^2 f}{\partial x_n \partial x_2} & \dots & \frac{\partial^2 f}{\partial x_n \partial x_n} \end{pmatrix}$$

³⁴ bei Gebäudesimulationen häufig

6.1.6. Weitere Optimierungsverfahren

Eine weitere sehr stabile Gruppe von Optimierungsalgorithmen gehört zu dem so genannten Simulated Annealing (engl. simuliertes Abkühlen). Dieser stochastische Optimierungsalgorithmus ist geeignet für globale Optimierungsaufgaben von nicht differenzierbare und nicht stetige Funktionen, der Algorithmus ist daher für Gebäudeprobleme geeignet. Das Konvergenzverhalten langsamer als gradientenbasierten Methoden.

In anderen Bereichen mit zum Gebäudebereich ähnlichen Optimierungsproblemen werden noch eine Vielzahl andere Algorithmen angewendet, wie z.B. sequentielles quadratisches Programm (*Sequential Quadratic Programming SQP*), Simulated Annealing (*great deluge algorithm*), Metropolisalgorithmus Schwellenakzeptanz (*threshold accepting*) Stochastisches Tunneln (*Stochastic tunneling*). Dabei gibt es jeweils für spezifische Anwendungen noch eine Vielzahl von Untervarianten und Abwandlungen der Algorithmen. Darüber hinaus existieren zahlreiche Kombinationen verschiedener Optimierungsalgorithmen (z.B. PSA kombiniert mit Hooke-Jeeves [8]).

6.1.7. Zusammenfassung

Tabelle 8 Beispiele für verschiedene Modell- bzw. Gleichungsarten

Optimierungsproblem	Lösungsalgorithmen	Bemerkungen
lineares Programm	Simplex Algorithmus ³⁵ , Innere-Punkte- Verfahren (Im Gebäudebereich äußerst selten, Bsp. Sequenzsteuerung Energie- erzeuger
ganzzahliges Programm	Heuristiken: lokale Suche, Tabu-Suche, GA, Simulated Annealing, Exakte Verfahren: Schnittebenen-~, Branch-and-Bound ~, Branch-and-Cut ~	Im Gebäudebereich äußerst selten, Bsp. Sequenzsteuerung Energie- erzeuger mit Ein-Ausschalt-möglichkeit u.U. sehr aufwendig
Quadratisches Programm	Newton-Typ z.B. Quasi- Newton CG	Im Gebäudebereich äußerst selten, da i.d.R. die analytischen Eigenschaften der Zielfunktion unbekannt
Nicht-lineare Optimierung		
Für eine Variable	Goldener Schnitt ...	

(Fortsetzung nächste Seite)

³⁵ Nicht zu verwechseln mit dem Downhill-Simplex-Algorithmus

(Fortsetzung)

Optimierungsproblem	Lösungsalgorithmen	Bemerkungen
ohne Nebenbedingungen lokal ³⁶ , stetig differenzierbare Funktionen	Newton-Typ z.B. Quasi-Newton CG	Im Gebäudebereich selten, da die Anwendung von Nebenbedingungen sinnvoll ist
ohne Nebenbedingungen lokal, nicht-stetige Funktionen	GPS, Down-Hill-Simplex, PSO, GA, ³⁷	Im Gebäudebereich selten, da die Anwendung von Nebenbedingungen sinnvoll ist
mit Nebenbedingungen lokal, stetig differenzierbar	SQP, Newton-Typ mit Penalty Funktionen	Im Gebäudebereich nicht sicher anwendbar, da i.d.R. die analytischen Eigenschaften der Zielfunktion unbekannt, sollte aber getestet werden, weil sehr schnell.
mit Nebenbedingungen global, stetig differenzierbar	Multistart: Newton-Typ, SQP, GPS kombiniert mit Newton-Typ	³⁸ Im Gebäudebereich nicht sicher anwendbar, da i.d.R. die analytischen Eigenschaften der Zielfunktion unbekannt, sollte aber getestet werden, weil sehr schnell,
mit Nebenbedingungen global, nicht-stetig	PSO, GA, Multistart GPS, Down-Hill-Simplex, u. U. Multistart Newton-Typ ³⁷	³⁸ üblich im Gebäudebereich

Da stetig differenzierbare Zielfunktionen wesentlich besser optimiert werden können, ist es erstrebenswert, die Gebäudesimulationen mathematisch so zu formulieren, dass die entsprechenden Zielfunktionen dieser Bedingung genügen. In der Literatur wird ein Beispiel für ein eigens unter diesem Aspekt entwickeltes Gebäudesimulationsprogramm beschrieben [8]. Da jedoch bei der Gebäudesteuerung in der Regel auch Ein-Aus-Schaltelemente verwendet werden, ist eine konsistente Beschreibung mit stetig differenzierbaren Funktionen schwierig und unter Umständen artifiziell. Darüber hinaus können durch die numerische Ermittlung der Zielfunktionen im Gebäudebereich Unstetigkeiten entstehen [8]. In der Regel sind die Eigenschaften der Zielfunktion im Gebäudebereich bzw. der Gebäudesimulationen jedoch so, dass klassische gradientenbasierte Optimierungsmethoden nicht konvergieren.

Aufgrund dieser Eigenschaften von Zielfunktionen im Gebäudebereich, werden hier häufig die robusten stochastischen Optimierungsverfahren eingesetzt (siehe Tabelle

³⁶ Bzw. global für konvexe / konkave Funktionen

³⁷ Newton-Verfahren können zusätzlich getestet werden, können erfolgreich sein, wenn Minimum nicht an der Unstetigkeit angenommen wird

³⁸ Information ob tatsächlich globales Optimum gefunden wurde schwer zu erhalten

8), obwohl dabei die Anzahl der Iterationsschritte bzw. der Gebäudesimulationen erhöht wird.

6.2. Arten der Anwendung von Optimierung

Es können zwei grundsätzlich verschiedene Arten von Betriebsoptimierungen bei Gebäuden unterschieden werden. Zum einen kann die Optimierung der Regelparameter durch Simulation, ohne Kopplung und unabhängig zum aktuellen Gebäudebetrieb erfolgen, um eine optimale Regelstrategie für unterschiedliche Betriebszustände zu finden. Diese Art der Optimierung wird hier als Offline-Optimierung bezeichnet, da sie in der Regel nicht kontinuierlich erfolgt (siehe Abbildung 22)

Im Gegensatz dazu wird bei der Online-Optimierung der Optimierungsprozess direkt mit der Regelung gekoppelt, so dass jeweils der aktuelle Betriebszustand und evtl. Vorhersagen (z.B. Tagesvorhersagen der Last oder des Klimas) mit in die Optimierung einbezogen werden können. Die Online-Optimierung stellt somit einen kontinuierlichen Prozess dar (siehe Abbildung 23).

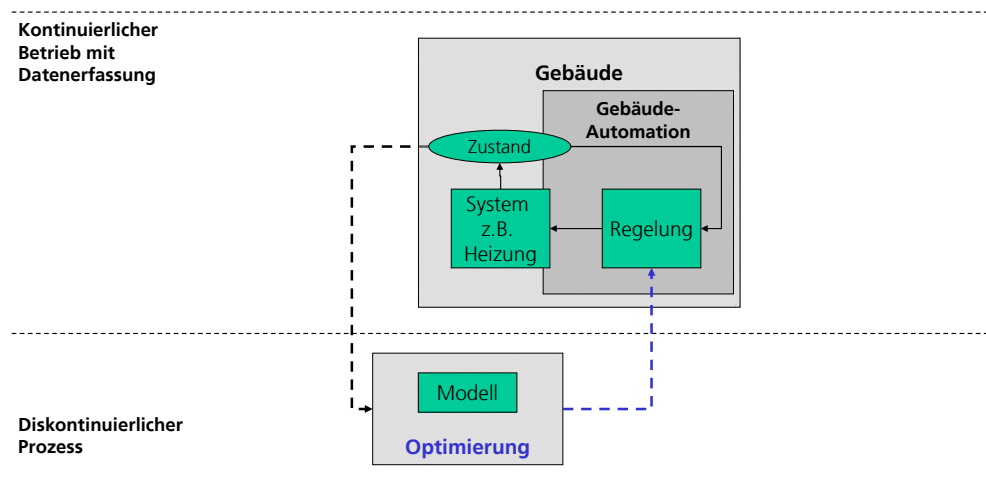


Abbildung 22 Prozessstruktur bei Offline-Optimierung des Gebäudebetriebs

(Nicht-Wohn-) Gebäude sind sehr individuell. Sie bestehen in der Regel aus identischen oder ähnlichen (in der Größe angepassten) Komponenten in stark unterschiedlichen Kombinationen. Die Gebäuderegulung wird an jedes Gebäude individuell angepasst. Es ist daher nahe liegend, die individuell angepassten Regelungen zu nutzen, um eine automatisierte individuelle Optimierung daran anzukoppeln bzw. daraus zu generieren. Damit kann sowohl der Arbeits- als auch der Kostenaufwand gesenkt werden. Zukünftig könnte daher die Optimierung ziemlich eng mit der Regelung verknüpft sein. Die Optimierung kann dann auch leicht als kontinuierlicher Prozess durchgeführt werden, um wechselnde Randbedingungen (Klimaänderungen, Nutzung, Preise ...) zu berücksichtigen.

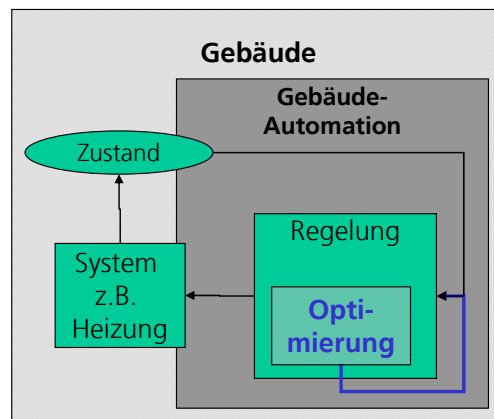


Abbildung 23 Prozessstruktur bei Online-Optimierung des Gebäudebetriebs

6.2.1. Offline-Optimierung

Das Konzept der Offline-Optimierung beruht darauf, dass ein stabiler Gebäudebetrieb mit klassischen Regelungs- und Steuerungstechniken erreicht wird, weil das dynamische Verhalten von Gebäuden ausreichend stabil und gutmütig ist. Im Wesentlichen werden die Parameter der Regelungen (Sollwerte, PID-Einstellungen, Schaltzeiten, etc.) optimiert. Da sich die Gebäudedynamik nicht schnell ändert, sollten sich die optimalen Regelungsparameter für größere Zeiträume nicht ändern.

Das bedeutet, es besteht keine technische Notwendigkeit die Optimierung direkt in der Gebäudeautomation zu implementieren. Die Erfahrung zeigt, dass es wichtig ist, dass solche Optimierungen in regelmäßigen Abständen wiederholt werden. Dies entspricht dem Vorgehen beim Continuous Commissioning (CC). Eine regelmäßige Wiederholung der Optimierung ist im praktischen Betrieb jedoch die Ausnahme.

Die Offline-Optimierung wird hauptsächlich im wissenschaftlichen Bereich oder im Bereich der Planung von Gebäuden eingesetzt. Im Folgenden werden einige Beispiele für die Anwendung von Offline-Optimierung vorgestellt.

Das von der Texas A&M University entwickelte (relativ einfache) Gebäudesimulationsprogramm AirModel enthält sehr einfache Optimierungsmethoden. Sie sind auf die Regelung bestimmter Haustechnikkomponenten amerikanischen Typs („cold deck“ und „hot deck“) beschränkt [48]. Die Parameter (Solltemperaturen) werden in der Simulation schrittweise geändert um das Optimum zu suchen. Diese Software ist in Deutschland und Europa kaum anwendbar.

In [46] und [8] wird die Kopplung von EnergyPlus als Gebäudemodell mit verschiedenen Optimierungsalgorithmen (u. a. GPS und GA) verglichen. Dabei werden u. a. Gebäudeparameter (wie z.B. Fensterdimensionen) optimiert, die nur in der Planungsphase angepasst werden können. Dabei zeigt sich jedoch, dass im Zusammenhang mit Gebäudesimulationen kaum allgemeingültige Aussagen zur Wahl der Optimierungsalgorithmen gemacht werden können.

Auch bei [49] werden Parameter der Gebäudehülle mit GenOpt und EnergyPlus optimiert. Dort wird berichtet, dass aufgrund der Importmöglichkeiten von EnergyPlus das Gebäudemodell in zwei Stunden erzeugt werden konnte und mit lediglich ca.

120 Iterationsschritten (Simulationsläufen) das Optimum in einem Parameterraum von ca. $3 \cdot 10^{10}$ Möglichkeiten gefunden werden konnte. Dabei wurde eine Energieeinsparung von 22,5 % erzielt. Diese Methoden wurden hier für die Planung angewendet, lassen sich aber prinzipiell auch für den Betrieb nutzen.

In einigen Untersuchungen werden mehrere verschiedene Simulationsprogramme gekoppelt, z.B. TRNSYS, EES und Matlab-Simulink um den Gebäudebetrieb abzubilden und auch zu optimieren [50]. In diesem Beispiel wurde allerdings kein Optimierungsalgorithmus angewendet, sondern der Parameterraum auf unterschiedlichen Schnittebenen vollständig untersucht, um die Charakteristik der Zielfunktion darzustellen.

Spezielle Aspekte der Betriebsoptimierung (Kühlung) werden in [51] untersucht. Allerdings sind diese Untersuchungen auf amerikanische Systeme beschränkt und wurden mit EnergyPlus durchgeführt. Die Ergebnisse sind daher nicht auf Europa übertragbar. Die Optimierungen wurden in GenOpt und Matlab durchgeführt, d.h. es handelt sich dabei um Forschungsergebnisse. Die Integration in praxistaugliche Werkzeuge muss noch geleistet werden. Wie bei vielen Überlegungen zur Kühlung spielt auch hier die Reduktion der Spitzenlast (zur Kostenreduktion) eine wichtige Rolle.

Ebenfalls ein Optimierungswerkzeug für die Planungsphase wird von [44] beschrieben. Auch hier wurden amerikanische Systeme mit EnergyPlus untersucht.

Viele unterschiedliche Konzepte explizit zur Betriebsoptimierung werden von Henze [52] skizziert. Sie werden für amerikanische Systeme dargestellt und sind in Entwicklungsumgebungen (Matlab-Simulink, TRNSYS-GenOpt, EnergyPlus) erzielt worden. Der Bezug zur Praxis wird hergestellt, praxistaugliche Werkzeuge für den europäischen Raum sind jedoch nicht enthalten.

Eine weitere Variante der Offline-Optimierung ist das Testen und Optimieren von einzelnen realen Gebäudeelementen in einer Simulationsumgebung. Dieses Verfahren wird auch als „Hardware in the Loop“³⁹ bezeichnet.

³⁹ Englisch: relativ frei übersetzt: Gerät im Regelkreis

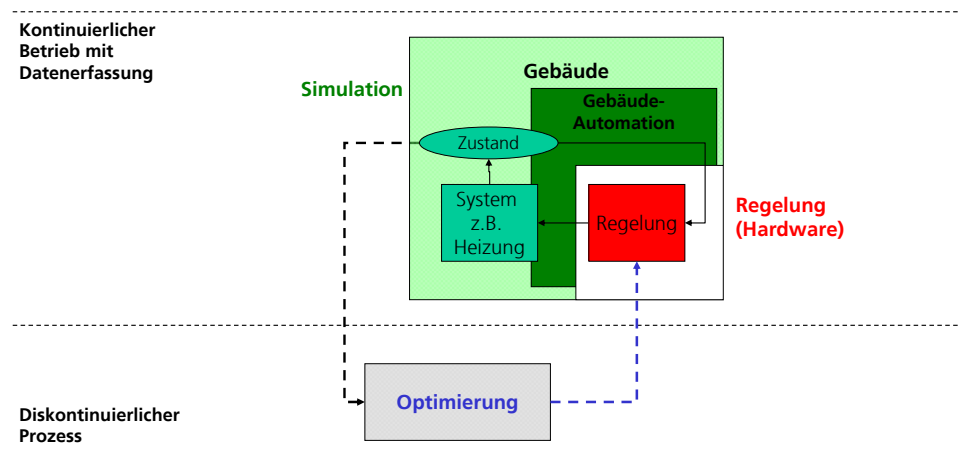


Abbildung 24 Beispiel für Optimierung einer wirklichen Regelung mit einem Hardware in the Loop Verfahren

Hardware in the Loop (HIL) Verfahren werden meistens in der Entwicklungsphase von Reglern verwendet, wenn z.B. das reale Gebäude noch nicht existiert oder das Verhalten von Reglern bei unterschiedlichen Gebäuden getestet und optimiert werden soll [53].

In dem Beispiel von Abbildung 24 wird das zu regelnde Gebäude und dessen Systeme durch eine entsprechende Gebäudesimulation ersetzt. Die Messdaten der Regelung werden durch die entsprechenden Zustandsgrößen der Simulation generiert. Die Ausgangsdaten der Regelung werden (z.B. durch A/D-Wandler) zurück in die Simulation geschleift. Mit den oben beschriebenen Optimierungsmethoden können dann Regelungseinstellungen gefunden werden, die bestimmte Zielfunktionen (der Simulation) optimieren.

Je nach Geschwindigkeit der Simulation wird hier zwischen Echtzeitanwendungen und Nicht-Echtzeitanwendungen unterschieden. Für Gebäudeenergieoptimierungen ist es dabei interessant, die Simulationszeit schneller als die Echtzeit ablaufen zu lassen, damit das Verhalten unter unterschiedlichen Klimabedingungen möglichst schnell und unabhängig von tatsächlichen Klimaten getestet und optimiert werden kann. Darüber hinaus ist an der HIL interessant, dass verschiedene Hardware-Varianten (oder Einstellungen) unter exakt gleichen Bedingungen getestet und optimiert werden können.

6.2.2. Online-Optimierungen

Während im Baubereich die Offline-Optimierung zumindestens in Teilen in der Praxis verwendet wird (hauptsächlich in der Planungsphase), wird die Online-Optimierung nur selten verwendet, z.B. für einzelne Regelungskomponenten wie die Aufheizoptimierung von Nachtabsenkungen.

Wenn die Optimierung in eine Regelung integriert wird, wird das als adaptive oder lernende Regelung bezeichnet. Werden für die Optimierung (bzw. die Beeinflussung der Regelung) Modelle verwendet so wird dies häufig auch modellprädiktive Regelung (engl. Model-Predictive-Control, MPC) genannt. D.h. im Gebäudebereich sind adaptive Regelungen normalerweise MPC. Werden nicht-lineare Modelle in der

MPC verwendet, so wird das auch NMPC (engl. Non-Linear-Model-Predictive-Control) genannt.

Normalerweise werden MPC Regelungen verwendet um Systeme zu Regeln, deren Regelungsdynamik starken Schwankungen unterliegt, wie z.B. Überschallflugzeugen. Gebäude zeigen normalerweise keine stark wechselnde Regelungsdynamik.

In anderen Bereichen wird MPC heute schon häufiger eingesetzt, z.B. Verbrennungsprozesse, Papiermaschinen und Zementwerken. Dort wird ohne MPC keine ausreichende Regelgüte erreicht und die Dynamik dieser Systeme ist langsam genug um die Optimierung bei jedem Zeitschritt in Echtzeit durchzuführen. Dies gilt auch für Gebäude und Gebäudesysteme.

In [52] wird Online-Optimierung als zeitabhängige Betrachtung der Betriebsoptimierung bezeichnet. Unter diesem Oberbegriff werden modellbasierte prädiktive Regelung (Model-Based Control MBC), Modell-Freie lernende Regelung (Reinforcement-Learning Control RLC) und Hybrid-Modell-Basierte lernende Regelung (Hybrid-Learning Control HLC) eingeordnet. Die Tauglichkeit dieser Konzepte konnte dort gezeigt werden. Der Vorteil der lernenden Regelungen ist die leichte Implementierbarkeit. Jedoch sind die bislang extrem langen Trainingszeiten in der Praxis nicht hinnehmbar.

6.3. Fazit

Die Zielfunktionen bei der Gebäudebetriebsoptimierung weisen Eigenschaften auf, die eine Optimierung erschweren. Sie können nicht-differenzierbar und sogar nicht-stetig sein. Deshalb ist die Optimierung mit klassischen, hoch effektiven gradientenbasierten Optimierungsmethoden, wie z.B. dem Preconditioned Conjugant Gradient (Newton) Algorithmus (PCG) nicht immer möglich.

Wenn diese gradientenbasierten Methoden keine Lösung finden können, dann haben sich stochastische Optimierungsmethoden wie General Pattern Search (GPS), Particle Swarm Algorithm (PSA) oder Genetic Algorithm (GA) für Gebäudeoptimierungsprobleme bewährt. Mit Kombinationen verschiedener Algorithmen konnten Verbesserungen erzielt werden. Allerdings können keine allgemeinen Auswahlkriterien für den am besten geeigneten Optimierungsalgorithmus angegeben werden.

Gebäude sind sehr unterschiedlich, bestehen aber zum Großteil größenangepassten Komponenten in verschiedenen Kombinationen. Da die Gebäuderegulation an jedes Gebäude individuell angepasst wird, ist zukünftig eine automatisierte Optimierungsgenerierung aus der Regelung denkbar. Damit kann der Aufwand gesenkt werden. Damit würden Optimierungen in der Zukunft als Model-Predictive-Control (MPC) Regelungen im Gebäudebereich implementiert. Solche Ansätze werden im Gebäudebereich bis jetzt jedoch nur selten in Teilregelungen eingesetzt. Andere adaptive (lernende) RLC Regelungen haben sich im Gebäudebereich bisher als ungeeignet erwiesen.

Heute wird der Gebäudebetrieb überwiegend offline optimiert. D.h. es werden mit kalibrierten Modellen des realen Gebäudes optimale Regelparameter für verschiedene Betriebszustände ermittelt. Dies erfolgt ohne Kopplung und unabhängig vom aktuellen Gebäudebetrieb. Diese optimalen Regelparameter werden dann (u. U. manuell) in die Gebäuderegulation eingegeben. Diese Art wird hier als Offline-Optimierung bezeichnet, da sie in der Regel nicht kontinuierlich erfolgt. Sie wird im Vergleich zur Online-Optimierung häufig angewendet, da die Optimierung unabhängig vom Gebäude bzw. der Gebäudeautomatisierung durchgeführt werden

kann. Die Offline Optimierung ist daher auch besser für wissenschaftliche Untersuchungen geeignet.

7. Überblick der Methodik in ModBen

Dieses Kapitel gibt zur Orientierung einen Überblick über die in ModBen entwickelten Methoden. Die einzelnen Werkzeuge und Ansätze werden in Kapitel 8 detailliert erläutert.

7.1. Allgemeine Systematik

Ausgangspunkt für die Entwicklungen in ModBen war eine allgemeine Top-Down-Methodik für die Analyse des Gebäudebetriebs, die sich an das aus dem Amerikanischen Sprachraum kommende "continuous commissioning" anlehnt und das inhaltlich am besten mit "kontinuierliche funktionale Qualitätskontrolle" übersetzt werden kann.

Dieser Ansatz unterscheidet sich von einem Energie-Audit darin, dass nicht nur eine einmalige, sondern eine kontinuierliche - in Idealfall über die Gesamte Betriebsphase des Gebäudes andauernde - Betriebsüberwachung erfolgt.

Der Haupt-Unterschied zum Energiemanagement liegt darin, dass neben dem Energieverbrauch weitere Betriebsgrößen wie Temperaturen oder Betriebsrückmeldungen aufgenommen werden.

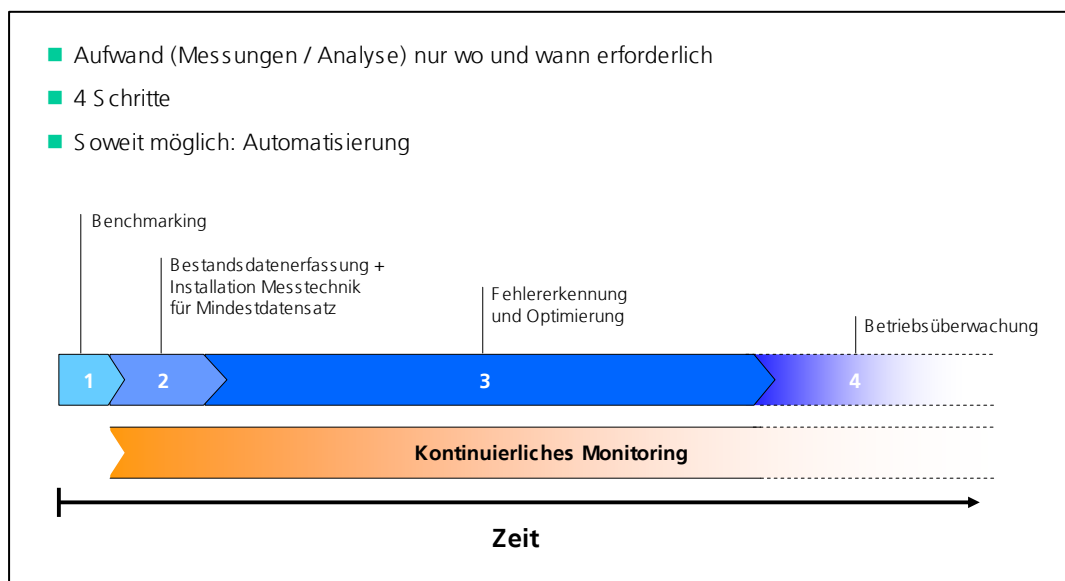


Abbildung 25 Schema der allgemeinen Methodik in ModBen

Es wurde ein 4-stufiger Ansatz entsprechend Abbildung 25 entworfen, der mit einer Grobanalyse beginnt (Benchmarking), an das sich - je nach Ergebnis - in weitere, detailliertere Untersuchungen anschließen. Ein kontinuierliches Monitoring kann prinzipiell bereits auf der ersten Stufe aufsetzen. Allerdings erlaubt das Benchmarking in der Regel keine Analyse, sondern liefert nur die Aussage, dass der Energie- oder Wasserverbrauch zu hoch liegt. Beim Auftreten von erhöhten Verbräuchen sind für die Analyse daher weitere Stufen notwendig.

Tabelle 9 gibt einen groben Überblick über die Details des Verfahrens. Flussbilder zu den einzelnen Schritten finden sich im Anhang. Der Schwerpunkt der Arbeiten in ModBen lag auf der Entwicklung von Analyseverfahren für Stufe 3 "Fehlererkennung, -Diagnose und Optimierung", die in der Tabelle rot markiert sind (siehe auch 8).

Tabelle 9 Übersicht über die Analyseschritte des Verfahrens

	Stufe 1	Stufe 2	Stufe 3	Stufe 4
Name	Benchmarking	Bestandsdatenerfassung und Ermittlung Zielwert (Zertifizierung)	Fehlererkennung und -Optimierung	Betriebsüberwachung
Beschreibung	Grobe Zusammenstellung Verbrauchs- und Bestandsdaten. Erste Einordnung / erste Baseline.	Detaillierte Bestandsdatenerfassung und Erstellung des Bedarfsausweis (DIN 18599)	Analyse des Gebäudebetriebs, Identifikation und Umsetzung von Einsparmaßnahmen, Optimierung des Betriebs	Aufrechterhalten des optimierten Betriebs
Bestandsdaten	Grobe Gebäudebeschreibung (Baujahr, Flächen, Nutzung)	Entsprechend DIN 18599	Wie Stufe 2 + weitere für Detailuntersuchungen (nur wenn notwendig)	Keine zusätzlichen
Messdaten	Abrechnungen / Zählerablesungen (jährlich / monatlich)	Keine	Mindestdatensatz (stündlich) + weitere für Detailuntersuchungen (nur wenn notwendig)	Minimal möglicher Datensatz
Analyse	Benchmarks (jährlich) Energiesignaturen (monatlich)	<ul style="list-style-type: none"> • Detaillierte Energiebilanz • Primärenergiebedarf • Aufwandszahlen 	Verschiedene Verfahren für <ul style="list-style-type: none"> • Fehlererkennung und -Diagnose • Optimierung 	Überwachung des Energieverbrauchs als Hauptindikator
zusätzliche Arbeiten	Keine	Installation der Datenerfassung / Datentransfer für stündliche Daten	Umsetzung von Energiesparmaßnahmen	Keine
Ergebnisse	Erste Einordnung, erste Baseline	<ul style="list-style-type: none"> • Bedarfsausweis • Theoretischer Zielwert 	<ul style="list-style-type: none"> • Fehlerfreier / optimierter Betrieb • Nachweis der Energieeinsparung 	Nachhaltig energieeffizienter Betrieb
Werkzeuge	<ul style="list-style-type: none"> • Excel Checkliste • Referenzwerte verschiedener Quellen • ennovatis (Verbrauchsausweis) 	<ul style="list-style-type: none"> • Excel Checkliste • ennovatis EnEV+ (Bedarfsausweis) 	<ul style="list-style-type: none"> • datastorage* • "R" ** • verschiedene Simulationsumgebungen 	<ul style="list-style-type: none"> • datastorage* • "R" ** • ennovatis

* Die Software "datastorage" wurde von Fraunhofer ISE im Rahmen des Projekts ModBen entwickelt

** Die Software "R" stellt eine Numerik-Bibliothek mit dem Schwerpunkt auf statistischen Verfahren dar (www.r-project.org)

7.2. Mindestdatensatz

Eine kontinuierliche Betriebsüberwachung muss notwendigerweise Messdaten erfassen und auswerten. Dabei stellt sich insbesondere die Frage nach dem minimalen Datensatz, der den energetischen Betrieb eines Gebäudes hinreichend genau erfassen kann, um die häufigsten und schwerwiegendsten Fehler und Optimierungspotenziale im Betrieb erkennbar zu machen. Andererseits muss der Minimaldatensatz wirtschaftlich darstellbar sein.

Tabelle 10 Mindestdatensatz in ModBen, der in hoher zeitlicher Auflösung erfasst wird (i.d.R. 5-10 Minutenwerte)

Bereich	Größe	Bemerkung
Verbrauch	Gesamtverbrauch je Brennstoff	z.B. Gas, Öl, Biomasse
	Gesamtverbrauch Fernwärme	
	Gesamtverbrauch Fernkälte	
	Gesamtverbrauch Strom	
	Gesamtverbrauch Wasser	
Wetter	Außenlufttemperatur	Eigenen Wetterstation oder Daten von Anbieter
	relative Außenluftfeuchte	Eigenen Wetterstation oder Daten von Anbieter
	Globalstrahlung	Eigenen Wetterstation oder Daten von Anbieter
Systemdaten	Vor- / Rücklauftemperaturen der Hauptwasserkreise	Haupt-Wärme-/Kälteverteilung
	Zu- und Ablufttemperatur der größten Lüftungsgeräte	
	Relative Zu- und Abluftfeuchte der größten Lüftungsgeräte	Nur, wenn Zuluft thermodynamisch behandelt wird
	Betriebsrückmeldung der größten Antriebe (Pumpen, Ventilatoren)	
Raumklima	Raumtemperatur	Von einer oder mehreren Referenzzonen
	relative Raumluftfeuchte	Von einer oder mehreren Referenzzonen

Die Begründung für diesen Mindestdatensatz lässt sich folgendermaßen darstellen:

- Die Verbrauchsdaten sind notwendige Voraussetzung, um den Energieverbrauch zu kontrollieren und zu minimieren. Zusätzlich zu den Energieverbräuchen wird außerdem der Wasserverbrauch aufgezeichnet, da dieser wertvolle Rückschlüsse auf die Belegung des Gebäudes mit Personen bzw. die Nutzungszeiten zulässt. Dieser oft unsichere Parameter wird damit greifbar.
- Die Aufzeichnung von Wetterdaten ist notwendig, um klimaabhängige und -unabhängige Verbrauchsanteile identifizieren zu können. Dies ist eine wichtige Voraussetzung für die weitergehende Analyse des Energieverbrauchs.
- Die Systemdaten (Vor- und Rücklauftemperatur und Betriebsrückmeldung der Pumpe von Heiz- und Kühlkreisen sowie Zu- und Ablufttemperatur, -Feuchte und Betriebsrückmeldung der Ventilatoren von Lüftungssystemen) geben wertvolle Hinweise auf die Verteilung der Energie im Gebäude und vor allem auf die prinzipiellen Steuer- und Regelungsstrategien. Betriebszeiten, Temperaturspreizungen und Sollwerte wie Heiz- und Kühlkurven können daraus extrahiert werden.
- Raumtemperatur und -Feuchte geben schließlich ein Bild von den Anforderungen des Nutzers bzw. auch davon inwieweit die haustechnische Anlage behagliche Raumzustände bereit stellen kann.
- Der Mindestdatensatz wird in der Regel in hoher zeitlicher Auflösung (5-20 Minutenwerte) aufgezeichnet. Durch die hohe zeitliche Auflösung werden die Stunden-, Tages- und Wochenprofile sichtbar, die viel Information bezüglich der Gebäudenutzung und des Gebäudebetriebs enthalten (z.B. wird so ein morgendlicher Anheizbetrieb sichtbar und analysierbar)

Der Mindestdatensatz stellt einen Kompromiss zwischen zur Analyse notwendiger Datenmenge und Kosten für deren Erfassung und Auswertung dar. Aus technischer Sicht wären weitere Datenpunkte wünschenswert, um z.B. die Effizienz der Erzeuger und die Anteile einzelner Nutzungszonen und Anlagen am Wärme-, Kälte- und Stromverbrauch erfassen und bewerten zu können. Allerdings haben die Erfahrungen im Projekt gezeigt, dass dadurch hohe Mehrkosten entstehen, die den Bauherren nicht immer zu vermitteln sind und deren Wirtschaftlichkeit im Einzelfall auch sicher kritisch ist. Weitere Informationen zur Messdatenerfassung und den damit verbundenen Kosten sind in Kapitel 10 zu finden.

7.3. Performance Metrics

Bei der Beurteilung von technischen Systemen stellt sich immer die Frage nach der Bewertungsgröße und einem Vergleichswert, der ein qualitatives und/oder quantitatives Urteil über eine bestimmte Eigenschaft des Systems erlaubt.

In diesem Abschnitt wird ein Konzept von so genannten Performance Metrics und Referenzwerten vorgestellt, das prinzipiell im Rahmen von ModBen verwendet wurde.

Ein Energie- bzw. Anlagenmonitoring soll dazu dienen, den Anlagenbetrieb zu überwachen und anhand von vordefinierten Performance-Indikatoren Fehler und Optimierungspotenziale zu identifizieren.

Messdaten dienen als Grundlage der Bewertung des energetischen Betriebs. Aus Ihnen können unterschiedlich detaillierte Kennzahlen bzw. Charakteristiken gewonnen werden, die die enthaltene Information mehr oder weniger verdichten. Diese verdichteten Informationen werden auch als Performance Metrics bezeichnet. Performance Metrics sollten...

- ...messbar sein oder aus messbaren Größen berechnet werden können
- ...eindeutig definiert sein
- ...spezifische Fragen zum Anlagenbetrieb beantworten helfen.

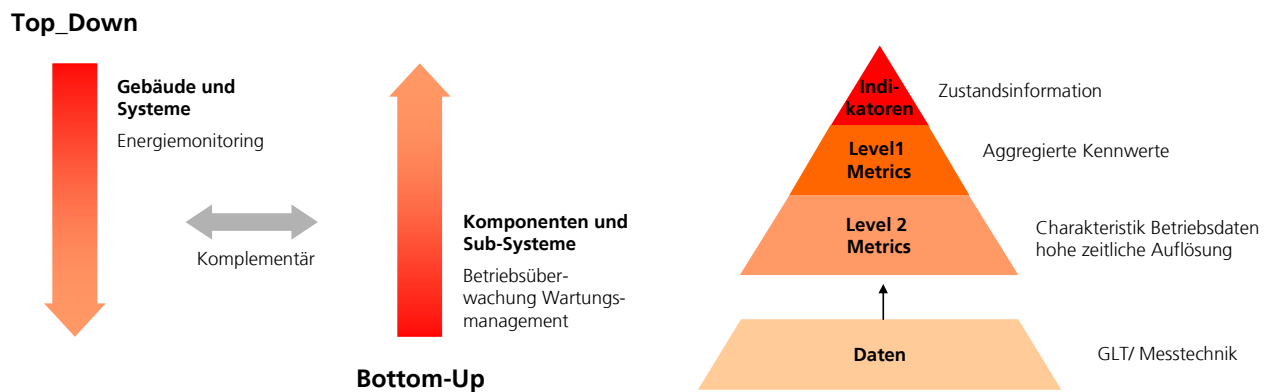


Abbildung 26 Schema Betriebsanalyse.
Links: Analyseansätze, Rechts: Verdichtung von Daten zu Performance Metrics unterschiedlichen Detaillierungsgrades

Beim Energiemonitoring wird für die Analyse ein Top-Down Ansatz gewählt. Dieser ergänzt sich im Idealfall mit einem Bottom-up Ansatz aus dem Anlagenmonitoring. Während der erste eher zur Detektion von Fehlern in Betrieb geeignet ist, kann der zweite zur weitergehenden Analyse und Diagnose verwendet werden.

7.3.1. Allgemeine Definition

Entsprechend Abbildung 26 können verschiedene Detaillierungsgrade von Performance Metrics definiert werden:

- **Indikatoren**
Indikatoren sind Zustandsinformationen auf hohem Level und stellen die am weitest verdichteten Daten dar. Es wird lediglich der korrekte, inkorrekte oder evtl. kritische Betrieb angezeigt. Eine typische grafische Repräsentation stellt eine Ampel mit drei Levels dar ("OK", "kritisch", "fehlerhaft").
- **Level 1 Metrics**
Bei Level 1 Metrics handelt es sich um aggregierte Kennwerte, die sich in einer Zahl wiedergeben lassen. Typisches Beispiel ist der auf die Nutzfläche bezogene Energieverbrauch eines Gebäudes in kWh je Quadratmeter im Jahr oder im Monat.
Diese Kennzahlen erlauben eine schnelle Einordnung des energetischen Betriebs des betrachteten Systems. Voraussetzung ist das Vorhandensein von Zielwerten, die einen Vergleich mit den Messdaten erlauben (Abschnitt 7.3.2).

- Level 2 Metrics
Bei Level 2 Metrics handelt es sich um Kenngrößen, die sich nicht mehr in Form eines einzelnen Wertes darstellen, sondern z.B. in Form eines Kennlinienfeldes einer Anlage. Level 2 Metrics ermöglichen damit die weitergehende Analyse des betrachteten Systems.
Auch hier ist die Voraussetzung, dass Vergleichsdaten für den "optimalen" bzw. "normalen" Betrieb zur Verfügung stehen (Abschnitt 7.3.2).

7.3.2. Referenzwerte

Um den aktuellen Gebäude- und Anlagenbetrieb mit Performance Indikatoren im obigen Sinne bewerten zu können, ist es in der Regel notwendig die Performance Metrics der Level 1 und 2 mit Referenzwerten zu vergleichen, die einen Erwartungswerte für den "normalen" oder gar "optimalen" Betrieb darstellen.

Ein einfaches Beispiel ist wie folgt:

Um zu entscheiden, ob der Performance Indikator für den Heizenergieverbrauch des letzten Monats auf "OK" gesetzt werden kann, kann der spezifische Heizenergieverbrauch (Level 1 Metric) aus den Messdaten errechnet (und witterungsbereinigt) werden, um ihn anschließend mit dem Planungswert zu vergleichen. Bei einer Abweichung von mehr als 15% könnte der Performance Indikator z.B. auf "kritisch", bei einer Abweichung von mehr als 30% auf "fehlerhaft" gesetzt werden. Weitere Analysen könnten im Bedarfsfall dann z.B. mit Level 2 Metrics durchgeführt werden.

Allgemein können folgende Daten als Referenzwerte dienen:

- Planwerte
Zielwerte für den Energieverbrauch des Gesamtgebäudes oder einzelner Zonen oder Anlagen aus der Planungsphase, die z.B. anhand von Simulationen oder Bedarfsberechnungen ermittelt wurden.
- Historische Daten
Falls keine Planwerte vorliegen, können historische Daten als Referenz verwendet werden. D.h. in diesem Fall wird das Gebäude bzw. die Anlage "mit sich selbst" verglichen. Zeigen die aktuellen Daten große Abweichungen zu den historischen Daten weist das u.U. auf einen Fehler hin.
Voraussetzung ist hier, dass zum einen genügend Messwerte vorliegen, zum anderen muss jedoch auch gesichert sein, dass die Vergleichsdaten aus einer Betriebsperiode stammen, die fehlerfrei war.
- Messdaten anderer, ähnlicher Gebäude
Falls Kennwerte für ähnliche Gebäude, z.B. aus statistischen Auswertungen des Gebäudebestands, vorliegen, können diese als Referenzwert verwendet werden. Oft scheitert diese Methode daran, dass die Nutzung und anlagentechnische Ausstattung der Gebäude so individuell ist, dass keine brauchbaren Vergleichsdaten verfügbar sind.
- Modellberechnungen
In Ermangelung von Planwerten können auch während der Betriebsphase Modellberechnungen durchgeführt werden, um einen Zielwert zu ermitteln. Voraussetzung hierbei ist die Verfügbarkeit eines genügend genauen Modells des Systems, das beurteilt werden soll, sowie Messwerte aller Randbedingungen und Eingangsgrößen des Modells. In der Regel ist dieses

Verfahren sehr aufwendig und erfordert eine genaue und individuelle ingenieurmäßige Untersuchung.

- Herstellerangaben
Im Falle von einzelnen Anlagenkomponenten (vor allem Im Bereich der Energieerzeugung) können Herstellerdaten z.B. für die Effizienz einer Komponente verwendet werden.

7.4. Messdatenerfassung

Die Messdaten aller Demonstrationsgebäude wurden via internet zum Fraunhofer ISE übertragen. Dort wurden sie zunächst mit Hilfe des Systems von ennovatis erfasst und gespeichert. Für die weitere Datenanalyse wurden die Rohdaten auf einen Datenserver des Fraunhofer ISE übertragen, auf dem das Werkzeug datastorage installiert ist.

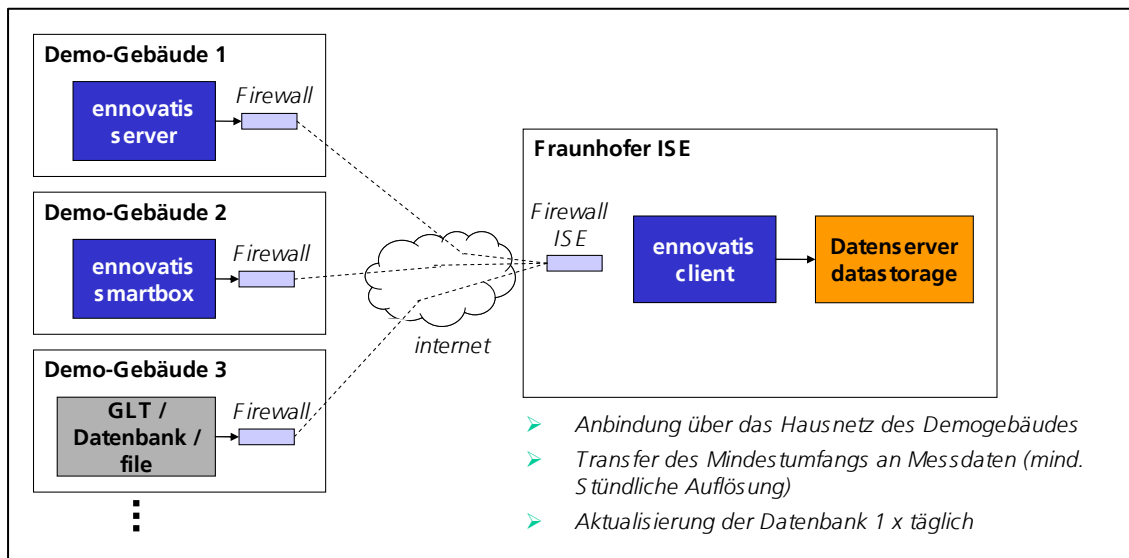


Abbildung 27 Schematische Darstellung der Datenübertragung

8. Ansätze und Werkzeuge in ModBen

Im Rahmen von ModBen wurden für das in Abschnitt 7 vorgestellte allgemeine Verfahren eine Reihe von Ansätzen getestet und verschiedene Werkzeuge entwickelt. Tabelle 11 gibt einen Überblick.

Tabelle 11 Übersicht der in ModBen untersuchten Ansätze

	Analyseschritte	Werkzeuge	Kapitel
1	Benchmarking	Checkliste 1	8.2
2	Bestandsdatenerfassung und Ermittlung Zielwert (Zertifizierung)	Checkliste 2 (Bestandsaufnahme)	8.3
		ennovatis EnEV+ (Zielwert, DIN V 18599)	8.3
3a	Fehlererkennung und -Diagnose	Manuelle Fehlererkennung (Datenvisualisierung)	8.4, 8.5
		Simulation ausgewählter Teilsysteme	8.6
		Simulation Gesamtsystem	8.7
3b	Optimierung	Simulation Gesamtsystem	8.8
4	Betriebsüberwachung	Automatische Ausreißerdetektion	8.9
		Anpassung der Werkzeuge der ennovatis	8.10





In den folgenden Abschnitten werden zunächst die Demonstrationsgebäude kurz vorgestellt, um dann ab Kapitel 8.2 die einzelnen Ansätze und Werkzeuge zu erläutern und ihre Eignung für die Analyse anhand der Ergebnisse in den Demonstrationsgebäuden darzustellen.

8.1. Demonstrationsgebäude

Die Demonstrationsgebäude decken bezüglich des Baujahrs, der Größe, der anlagentechnischen Ausstattung und der Nutzung eine große Bandbreite ab. Obwohl die Anzahl von 5 Gebäuden statistisch betrachtet sicher nicht signifikant ist, wurde somit doch sichergestellt, dass die Evaluation der Methoden und Werkzeuge mit unterschiedlichsten Randbedingungen erfolgen kann.

Tabelle 12 gibt einen Überblick über die Demonstrationsgebäude, die im Rahmen von ModBen untersucht werden.

Tabelle 12 Übersicht Demonstrationsgebäude

Gebäude	Baujahr	NGF m ²	Nutzung	TGA
DVZ Barnim, Barnim 	2007	8.000	Büro	Heizung, Lüftung, Kühlung, GA
ennovatis, Großpösna 	1995	1.000	Büro	Heizung
M+W Zander, Stuttgart 	1998	15.000	Büro, Gastro, Konferenz	Heizung, Lüftung, Kühlung / Klima, GA
EADS, Ottobrunn 	1976	6.000	Büro	Heizung, Klima
Ludwig Erhard Haus, Berlin 	1998	37.000	Büro, Gastro, Konferenz	Heizung, Lüftung, Klima, GA
Kraft Foods, München 	1986	11.000	Büro, Labor Gastro, Konferenz	Heizung, Lüftung, Klima, GA

Insgesamt wurden sogar 6 Gebäude ausgewählt. Allerdings ist zu vermerken, dass nach wiederholten technischen und organisatorischen Problemen die Zentrale von M+W Zander in Stuttgart nicht als Demonstrationsgebäude genutzt werden konnte. Auch das wirft ein Licht auf den aktuellen Stand bzw. die Hindernisse bei der Einführung einer systematischen Betriebsüberwachung und -Analyse.

8.1.1. DVZ Barnim

Beim Dienstleistung- und Verwaltungszentrum (DVZ) Barnim handelt es sich um ein Ensemble von mehreren Verwaltungsgebäuden der Kreisverwaltung Barnim in der Nähe von Berlin.



Abbildung 28 Luftaufnahme des DVZ Barnim. Die rote Markierung zeigt Gebäude D, das im Rahmen von ModBen betrachtet wurde.

Es handelt sich um relativ neue Gebäude (Inbetriebnahme 2007) mit einem hochwertigen energetischen Standard (spezifischer Primärenergiebedarf unter $100 \text{ kWh/m}^2\text{a}$), der in etwa dem eines Passivhauses entspricht. Die Gebäude wurden im Rahmen des Programms EnOB gefördert.

Die Büroflächen gruppieren sich um ein zentrales Atrium, so dass eine Außenzone, eine Innenzone (Räume zum Atrium) und eine dazwischen liegende Kombizone bzw. Verkehrsfläche entstehen.

Tabelle 13 Hauptdaten DVZ Barnim

Baujahr	2007
Nutzung	Bürogebäude
Stockwerke	4
Netto-Grundfläche	ca. 8000 m^2
Heizung	Erzeugung: 2 reversible Wärmepumpen Erdsondenanlage und Rückkühlwerk als Quelle Übergabe: Radiatoren (Außenzonen/Innenzone) und Fußbodenheizung / - kühlung (Kombizone) Heiz- / Kühlregister in der RLT

RLT-Anlage	Be- und Entlüftung mit WRG, Sicherstellung des hygienischen Luftwechsels Zuluft in die Büros, Abluft aus den Kombizonen
Kälte	Erzeugung: 2 Wärmepumpen (reversibel) Erdsonden als Wärmesenke und zur direkten Kühlung, Rückkühlwerke zur Regeneration der Erdsonden und zur direkten Kühlung Übergabe: Fußbodenkühlung (Kombizone), Zuluftkühlung
Sonstiges	Umfassende GA Steuerung Sonnenschutz und Beleuchtung über EIB, nutzer- und wetterabhängig, Detaillierte Erfassung des Energieverbrauchs und des Anlagenbetriebs

8.1.2. ennovatis Großpösna

Beim Gebäude der ennovatis GmbH in Großpösna (in der Nähe von Leipzig) handelt es sich um das kleinste Demonstrationsgebäude, das sich ebenfalls durch eine wenig komplexe anlagentechnische Ausstattung auszeichnet.



Abbildung 29 Das Firmengebäude von ennovatis in Großpösna

Aufgrund der einfachen Struktur des Gebäudes und den direkten Zugriff über den Projektpartner ennovatis wurde dieses Gebäude für viele Tests im Rahmen von ModBen verwendet.

Tabelle 14 Hauptdaten ennovatis Großpöсна

Baujahr	1996
Nutzung	Bürogebäude
Stockwerke	2
Netto-Grundfläche	436 m ²
Heizung	Erzeugung: Niedertemperaturheizkessel (Erdgas), Erwärmung des Kesselwassers über zweistufig schaltbaren Brenner, installierte Zeitschaltuhr zur Schaltung der Nacht- und Wochenendabsenkung der Vorlauftemperatur der Heizungsanlage Übergabe: Plattenheizkörper
RLT-Anlage	nicht vorhanden
Kälte	Splitgerät zur Kühlung des Serverraums
Sonstiges	Erwärmung des Warmwassers in Küche und WCs dezentral über Elektro-Boiler

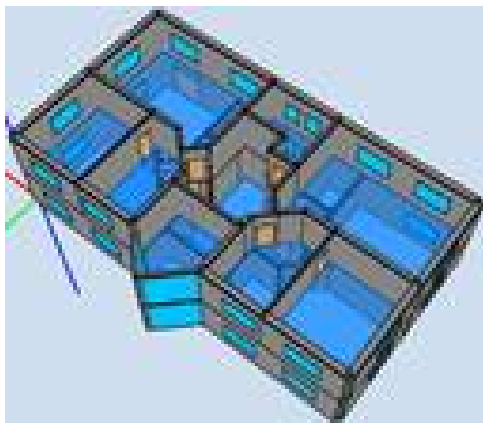


Tabelle 15 Modell mit Grundriss des Firmengebäudes von ennovatis in Großpöсна

8.1.3. EADS Ottobrunn

Das Gebäude 88 der EADS in Ottobrunn wurde 1976 errichtet. 1996 wurden die Fenster erneuert und die Fassade wurde mit Dämmung versehen. Das Gebäude wird überwiegend als Bürogebäude genutzt. Im Untergeschoss sind große Serverräume bzw. Computerarbeitsplätze untergebracht, die fast vollständig gekühlt werden.

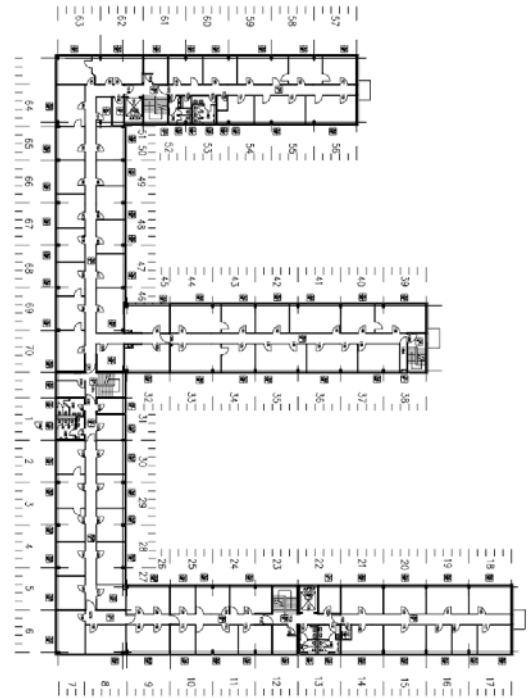


Tabelle 16 links: Ansicht Gebäude EADS 88; rechts: Regelgrundriss (1.OG)

Obwohl es sich um ein Bestandsgebäude handelt, lagen keine historischen Verbrauchsdaten vor, da die Abrechnung auf dem Gelände der EADS bis Projektbeginn von ModBen nicht auf Basis von Zählerwerten stattfand.

Tabelle 17 Hauptdaten EADS 88 Ottobrunn

Baujahr	1976 Renovierung 1996 (Fenster, Wärmedämmung Fassade)
Nutzung	Bürogebäude
Stockwerke	4
Netto-Grundfläche	ca. 6.000 m ²
Heizung	Erzeugung: Beheizung über Nahwärmenetz Energiezentrale, Indirekte Übergabestation mit Plattenwärmetäuscher Übergabe: statische Heizflächen (Einrohrheizung)

RLT-Anlage	Nicht vorhanden
Kälte	Erzeugung: Nahkälte über zentrale, z.T. dezentrale Splitgeräte Übergabe: Umluftkühlgeräte
Sonstiges	Keine GA vorhanden

8.1.4. Ludwig Erhard Haus Berlin

Das Ludwig Erhard Haus in Berlin ist ein großes Büro- und Konferenzgebäude inklusive Gastronomie mit einer umfangreichen anlagentechnischen Ausstattung.

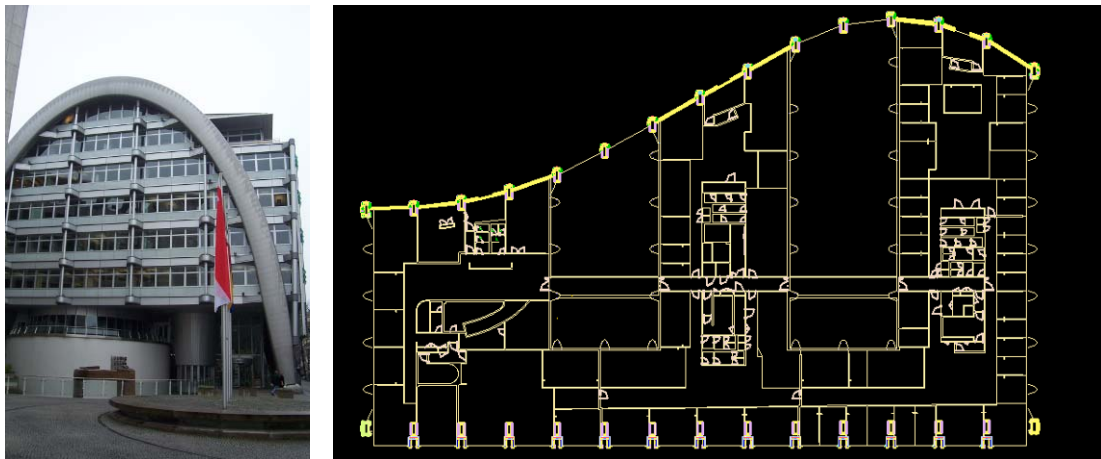


Abbildung 30 Ansicht des Ludwig Erhard Hauses in Berlin und Grundriß 2.OG

Im Erdgeschoss und im 1.UG befinden sich die Mehrzahl der „öffentlichen“ Flächen (Foyer, Gastronomie und Konferenz), in den darüberliegenden Geschossen sind hauptsächlich Büros untergebracht. AB dem 1.OG schneiden zwei Atrien den Grundriss ein.

Tabelle 18 Hauptdaten des Ludwig Erhard Hauses in Berlin

Baujahr	1998
Nutzung	Büro- / Konferenzgebäude
Stockwerke	2.UG – 9.OG
Netto-Grundfläche	gesamt: 37350 m ² beheizt: ca. 22000 m ² gekühlt: ca. 19950 m ²

Heizung	Erzeugung: Fernwärme 105°C/35°C, 2x Fernwärmeplattenwärmetauscher mit je 1400 kW Übergabe: Zuluft über RLT-Anlagen, Quellluftinduktionsgeräte, Unterflurkonvektoren, Fußbodenheizung
RLT-Anlage	3x Großanlagen 31.000 - 54.000 m³/h, 2x Küchenanlage 9.000 - 10.600 m³/h, 3x Veranstaltungsanlagen 6.000 - 22.000 m³/h
Kälte	Erzeugung: 2x Schraubenverdichter mit je 1100 kW, 1x Hubkolbenverdichter mit 250 kW, Übergabe: Zuluft RLT-Anlagen, Quellluftinduktionsgerät,
Sonstiges	GA vorhanden Last- und Wassermanagementsystem

8.1.5. Kraft Foods München

Das europäische Forschungs- und Entwicklungszentrum von Kraft Foods für Schokoladen- und Food-Produkte ist in München angesiedelt. Das Gebäude besteht aus 3 Bauteilen A, B und C, die baulich miteinander verbunden sind.

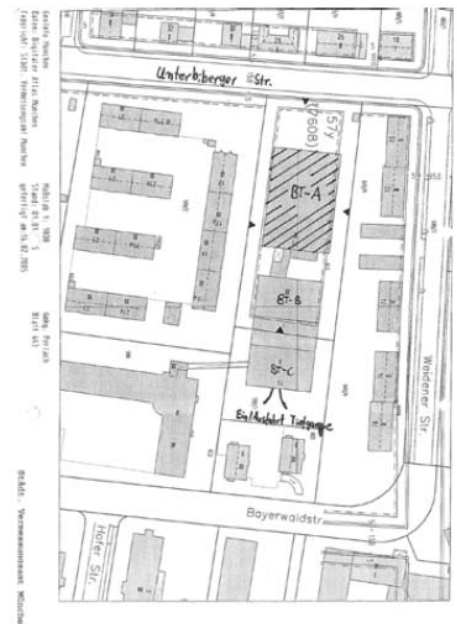


Abbildung 31 Ansicht und Lageplan des Kraft Foods Gebäudes in München

Das Gebäude wird für die Forschung und Entwicklung neuer Produkte benutzt und besteht überwiegend aus Labor- und Büroräumen. Dementsprechend komplex und leistungsintensiv ist die anlagentechnische Ausstattung

Tabelle 19 Hauptdaten des Kraft-Foods Gebäudes in München

Baujahr	1986
Nutzung	Labore, Büros
Stockwerke	UG – 2.OG
Netto-Grundfläche	9.800 m ²
Heizung	Erzeugung: Gaskessel, Gas-Dampferzeuger, Ölkessel Übergabe: Heizkörper, Heizregister der RLT-Anlagen
RLT-Anlage	Lüftungsanlagen für Labors, Büros, Lager
Kälte	Erzeugung: Kompressionskältemaschinen Übergabe: Split-Kleinkälteanlagen für Kühlräume, Kühltregister der RLT
Sonstiges	GA vorhanden Eiswasserspeicher, Druckluft

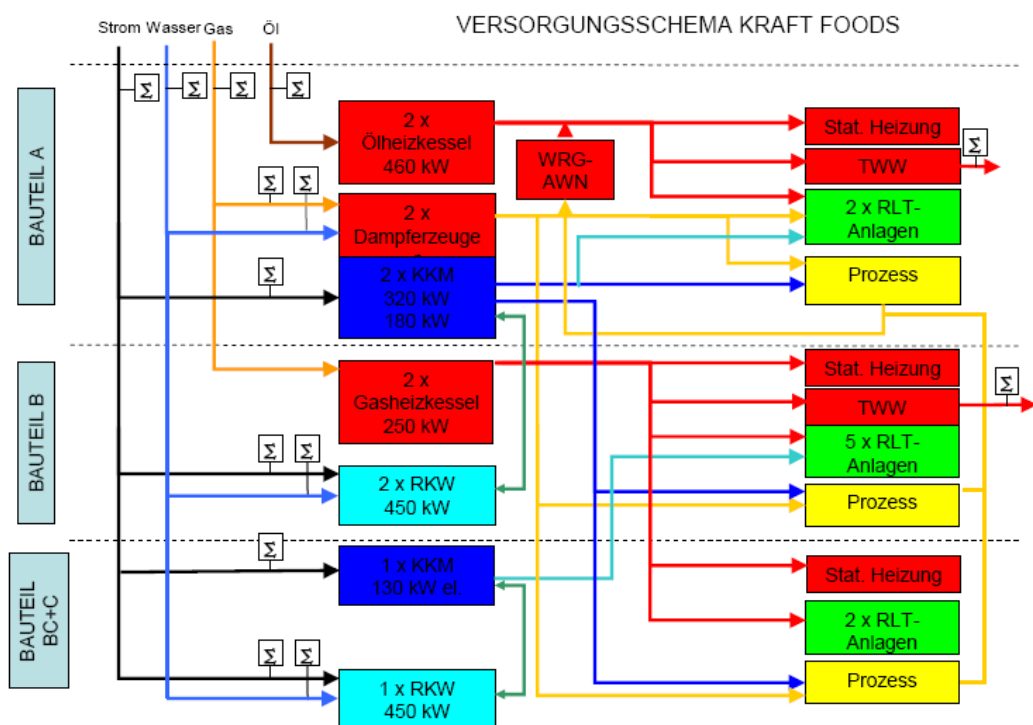


Abbildung 32 Schema Energie- und Wasserversorgung des Kraft Foods Gebäudes in München

8.2. Stufe 1 – Benchmarking

8.2.1. Begründung für den Ansatz

Ziel des Benchmarking ist eine erste Einordnung des Energieverbrauchs des Gebäudes, um etwaigen weiteren Untersuchungsbedarf zu identifizieren.

In Stufe 1 werden die Hauptdaten des Gebäudes und der Energieverbrauch erhoben. Dabei werden nur Daten erhoben, die der Gebäudebesitzer ohne größeren Aufwand bereitstellen können sollte.

8.2.2. Beschreibung

Prinzipiell werden folgende Daten bzw. Informationen erhoben:

Tabelle 20 Stufe 1: benötigte Daten / Informationen

Informationen / Daten	Erläuterung
Allgemeine Daten	Standort, Baujahr, Ansprechpartner, etc.
Flächen / Bezugsgrößen	Bezugsgröße für die Berechnung des spezifischen Energieverbrauchs z.B. beheizte Nutzfläche, etc.
Energieverbrauch	Jährlicher Endenergieverbrauch je Energieträger
Wasserverbrauch	Jährlicher Wasserverbrauch
Hauptnutzungen	Hauptnutzung des Gebäudes bzw. Der relevanten Gebäudezonen (z.B. Büro, Kantine, Serverraum, etc.)
Tarife (optional)	Tarife je Energieträger und für Wasser

Anhand der erhobenen Daten können spezifische Kennwerte (Level 1 Performance Metrics) für den Energieverbrauch berechnet werden. Bei klimaabhängigen Verbrauchsanteilen muss eine Witterungsbereinigung erfolgen. Diese können mit geeigneten Referenzwerten aus Statistiken des Gebäudebestands verglichen werden.

8.2.3. Implementierung

Das Benchmarking (z.B. gemäß VDI 3807) ist ein übliches Bewertungsverfahren und beinhaltet keine komplexen Rechenoperationen, so dass die Berechnung mit einem Tabellenkalkulationsprogramm erfolgen kann.

Im Rahmen von ModBen wurde für die Datenaufnahme jedoch eine einheitliche Checkliste entwickelt, die eine übersichtliche Erfassung und Dokumentation der benötigten Daten erlaubt. Die Checkliste findet sich in Anhang F.

8.2.4. Beispiel / Evaluation in den Demonstrationsgebäuden

Die Aussagefähigkeit des Benchmarkings hängt maßgeblich von der Verfügbarkeit geeigneter Referenzwerte ab. In Deutschland sind verschiedene Quellen für Referenzwerte des Energie- und Wasserverbrauchs von Gebäuden verfügbar: VDI 3807 [54], ages GmbH [55], ARGE Benchmark [56], Referenzwerte gemäß EnEV[57]. Mit diesen Quellen ergeben sich die in den nächsten beiden Abbildungen gezeigten Ergebnisse

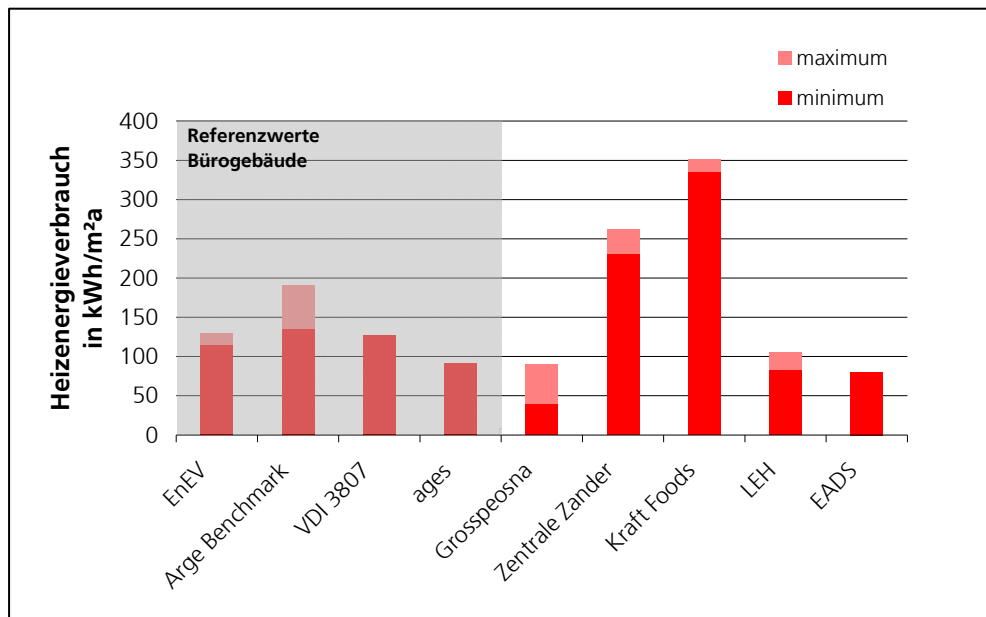


Abbildung 33 Benchmarking Heizenergieverbrauch

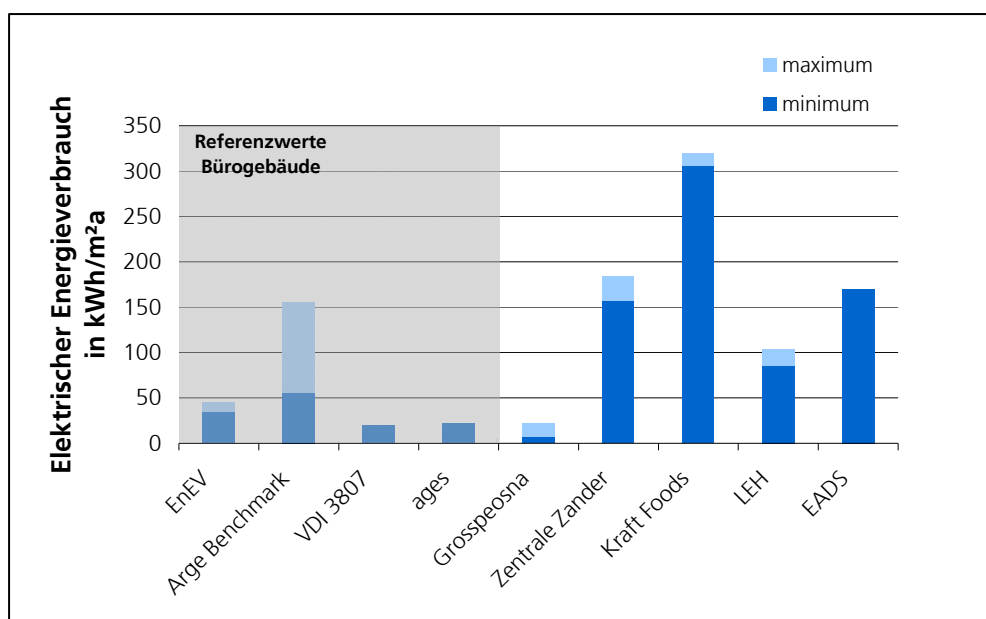


Abbildung 34 Benchmarking Stromverbrauch

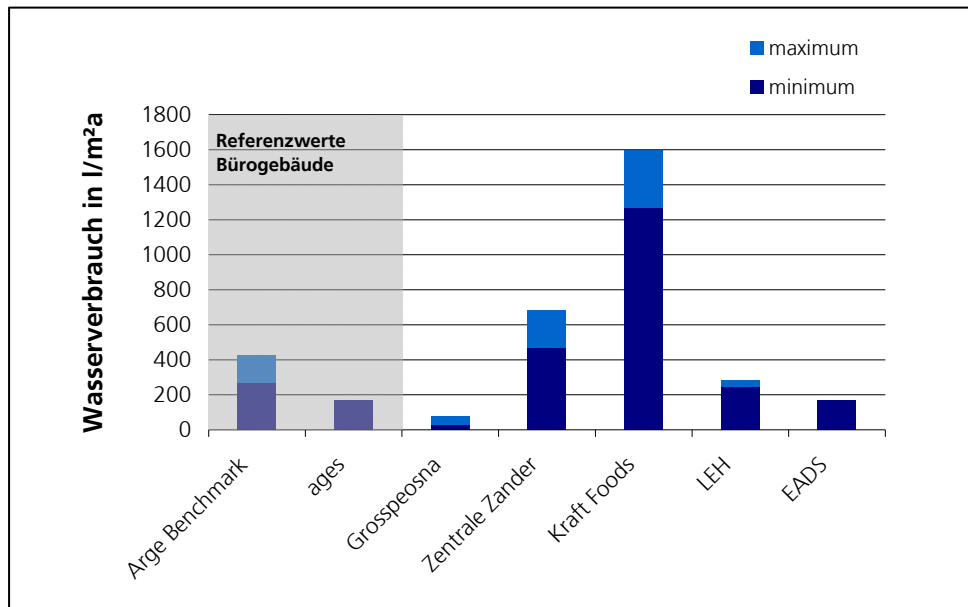


Abbildung 35 Benchmarking Wasserverbrauch

Die Vergleichswerte aus den unterschiedlichen Quellen zeigen eine sehr große Streuung. Eindeutige Aussagen bezüglich der Einordnung des Energieverbrauchs der Demogebäude sind – vor allem im Bereich Wärme – nicht ohne weiteres möglich.

Weiterhin beziehen die Vergleichswerte für den Heizenergieverbrauch nicht das Erzeugersystem mit ein. In der Regel wird das Benchmarking jedoch auf Basis des Endenergieverbrauchs – also der gelieferten Energie – gemacht. Im Falle von Anlagen zur Kraft-Wärme-(Kälte)-Kopplung oder Wärmepumpen sind damit die Vergleichswerte zunächst nutzlos. Daraus ergeben sich aus Sicht des Projektteams folgende Forderungen an zukünftige Vergleichswerte:

- Referenzwerte für den Energieverbrauch von Nichtwohngebäuden sollten sich auf Nutzungszonen und nicht auf das Gesamtgebäude beziehen. Der Referenzwert für das Gesamtgebäude ergibt sich dann aus dem flächengewichteten Mittel der einzelnen Nutzungszonen.
- Referenzwerte des Energieverbrauchs sollten die Erzeugungsanlagen berücksichtigen (z.B. ist es entscheidend, ob Erdgas für einen Brennwertkessel oder ein BHKW verwendet wird oder Fernwärme für die Raumheizung oder eine Absorptionskältemaschine).

Für diese Art von Referenzwerten sind weitere Untersuchungen bzw. Datenerhebungen notwendig, so dass sich die entsprechenden Datengrundlagen erst über die Jahre erstellen lassen.

8.3. Stufe 2 - Datenerhebung / Ermittlung Zielwert

8.3.1. Begründung für den Ansatz

Absicht des Projekts ModBen war es, zu prüfen, inwieweit die Daten und Systematik, die bei der Erstellung eines Energiebedarfsausweises gemäß Energieeinsparverordnung (EnEV) zur Anwendung kommen, für die Betriebsanalyse und die Optimierung des Gebäudebetriebs verwendet werden kann. Damit sollten mögliche Synergien zwischen dem Zertifizierungsverfahren und dem Gebäudebetrieb identifiziert und bewertet werden.

8.3.2. Beschreibung

Die EnEV 2009 (Verordnung über energiesparenden Wärmeschutz und energiesparende Anlagentechnik bei Gebäuden), die in der aktuellen Fassung seit dem 01.10.2009 gültig ist [58], ist die nationale Umsetzung der Europäischen Gebäuderichtlinie (EPBD – Energy Performance of Building Directive) [59].

Als Grundlage für die Berechnung des Primärenergiebedarfs von Nichtwohngebäuden wird in der EnEV 2009 die DIN V 18599 festgelegt [60]. Die DIN V 18599 beschreibt eine Berechnungsmethode – entsprechend der Europäischen Gesetzgebung – für den Nutz-, End- und Primärenergiebedarf für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung von Gebäuden. Die Norm besteht aus 10 Teilen und einem zusätzlichen Korrekturteil (Teil 100).

In der EnEV werden Mindestanforderungen für die energetische Qualität von Gebäuden formuliert. Der Nachweis erfolgt anhand des so genannten Referenzgebäudeverfahrens. Dabei muss nachgewiesen werden, dass der Primärenergiebedarf des zu errichtenden Gebäudes den entsprechenden Wert eines Referenzgebäudes gleicher Geometrie, Nettogrundfläche, Orientierung und Nutzung sowie einer vorgegebenen technischen Referenzausführung nicht überschreitet. Weiterhin werden Anforderungen an den Mindestwärmeschutz der Außenbauteile und an den sommerlichen Wärmeschutz von neu zu errichtenden Gebäuden formuliert.

Die DIN V 18599 legt in Teil 10 Norm-Nutzungsprofile (Z.B. für Büronutzung, Verkehrswege, etc.) fest, die bei der Berechnung berücksichtigt werden müssen, sowie Regeln zur Zonierung des Gebäudes.

Es sind zwei Arten des Energieausweises zu unterscheiden:

- **Energiebedarfsausweis**
Der Energiebedarfsausweis weist den Primärenergiebedarf eines Gebäudes aus, der auf Grundlage von theoretischen Berechnungen gemäß der oben genannten DIN 18599 bestimmt wurde.
Für neu zu errichtende Gebäude ist der Energiebedarfsausweis verpflichtend.
Für Bestandsgebäude kann auch ein Energieverbrauchsausweis ausgestellt werden.
- **Energieverbrauchsausweis**
Der Energieverbrauchsausweis wird auf Grundlage von Energieverbrauchsabrechnungen der letzten 3 Jahre erstellt und bezieht sich damit auf den realen Verbrauch des Gebäudes.

Ausgangspunkt der Untersuchungen im Rahmen von ModBen war die Idee, dass eine bei der Erstellung des Energiebedarfsausweises alle relevanten Daten für eine detaillierte Berechnung des Energiebedarfs erhoben werden und dass die DIN V 18599 auch eine individualisierte Berechnung des Energiebedarfs (mit Anpassung z.B. der Nutzungsprofile) prinzipiell erlaubt. Somit sollte es möglich sein im Zuge der Erstellung eines Energiebedarfsausweises mit überschaubarem Zusatzaufwand auch einen Zielwert für den Energieverbrauch zu bestimmen, der zur Beurteilung des energetischen Betriebs herangezogen werden kann. Diese These wurde im Rahmen des Projekts überprüft.

8.3.3. Implementierung

Die Berechnungsmethodik für die Erstellung des Energiebedarfsausweises gemäß EnEV bzw. DIN V 18599 wurde vom Projektpartner ennovatis – unabhängig vom Projekt ModBen – implementiert. Somit stand ein marktverfügbares und professionelles Werkzeug zur Verfügung, das unter dem Namen „EnEV+“ von ennovatis vertrieben wird.

Im Zuge des Projekts wurde deutlich, dass jedoch die Datenaufnahme und Dokumentation von größeren und komplexeren Nicht-Wohngebäuden – vor allem im Bezug auf die Anlagentechnik und deren Struktur bzw. Verschaltung – nicht trivial ist.

Zu diesem Zweck wurde eine Checkliste zur Datenaufnahme entwickelt, die neben den Daten der Gebäudezonen insbesondere die Struktur der Anlagentechnik erfassen und dokumentieren kann.

Die Dokumentation der Struktur des anlagentechnischen Systems baut dabei auf einer Kreuztabelle auf, die neben den Charakteristika der einzelnen Komponenten auch deren Verknüpfung darstellen kann.

Eine detaillierte Dokumentation der Checkliste, die mit dem Tabellenkalkulationsprogramm Excel erstellt wurde, befindet sich in Anhang G.

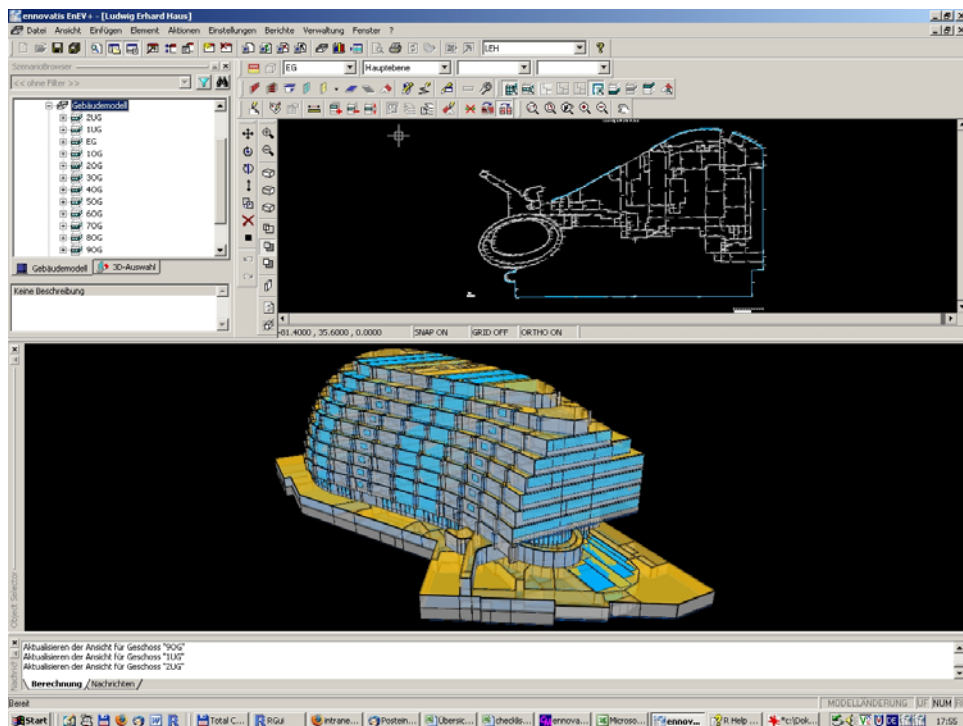


Abbildung 36 Screenshot des Programms EnEV+ von ennovatis zur Erstellung von Energiebedarfsausweisen gemäß EnEV bzw. DIN V 18599. Gezeigt ist hier das 3D-Modell des Ludwig-Erhard-Hauses in Berlin.

	Wärmeerzeuger	Gaskessel		BHKW		Kälteerzeuger	KKM	KE 2	Speicher	SP1	SP2	Verteilung	VT1	VT2	Übergabe	ÜS_h1	ÜS_h2	ÜS_h3	ÜS_k1	ÜS_k2	RLT-Anlagen	RLT1	Zonen	Z1	Z2	Z3
Wärmeerzeuger																										
Gaskessel									↑																	
BHKW									↑																	
Kälteerzeuger																										
KKM										↑																
KE 2																										
Speicher																										
SP1												↑														
SP2												↑	↑													
Verteilung																										
VT1																↑	↑	↑				↑				
VT2																			↑	↑		↑				
Übergabe																										
ÜS_h1																								↑		
ÜS_h2																								↑	↑	
ÜS_h3																									↑	
ÜS_k1																									↑	
ÜS_k2																									↑	
RLT-Anlagen																										
RLT1																									↑	
...																										

Abbildung 37 Prinzip der Dokumentation der Anlagenstruktur. Die einzelnen Komponenten bzw. Subsysteme der Anlagentechnik sind als Kreuztabelle angelegt. Die Pfeile markieren physikalische Verknüpfungen zwischen den Systemen (im Beispiel würde der „Gaskessel“ Wärme an Speicher 1 (SP1) liefern und dieser wiederum Wärme an Verteilkreis 1 (VT1) abgeben. Siehe auch Anhang G.

8.3.4. Beispiel / Evaluation in den Demonstrationsgebäuden

Für alle Demonstrationsgebäude wurde der Energiebedarfsausweis zunächst ohne individuelle Anpassung, d.h. mit standardisierten Nutzungsprofilen und anlagentechnischer Ausstattung erstellt.

Ein direkter Vergleich der berechneten Werte mit dem gemessenen Verbrauch ist in der Regel nur für die Endenergie für Raumheizung möglich, da der Strombedarf, der gemäß EnEV berechnet wird, den nutzungsbedingten Strom (z.B. für Arbeitshilfen wie Computer) nicht enthält. Weiterhin werden andere Bilanzanteile, die nach EnEV berechnet werden (wie z.B. der Stromverbrauch für Beleuchtung oder die Endenergie der Kälteerzeugung) in der Regel messtechnisch nicht erfasst.

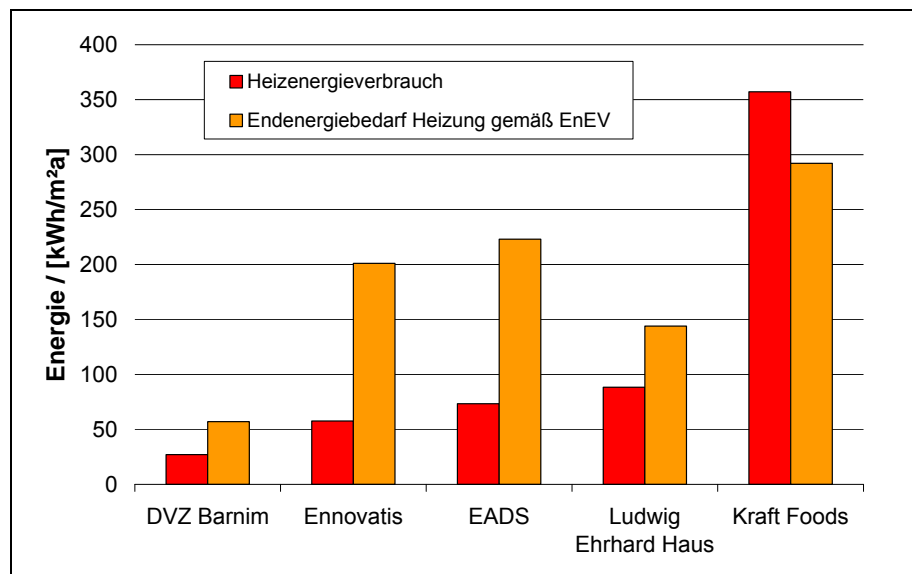


Abbildung 38 Vergleich des gemessenen Heizenergieverbrauchs und des nach EnEV bzw. DIN V 18599 berechneten Endenergiebedarfs für Raumheizung.

Der Vergleich zeigt, dass die Normberechnung gemäß EnEV den Heizenergiebedarf für 4 von 5 Gebäuden deutlich überschätzt. Von einem Verfahren, das mit Normnutzungsprofilen arbeitet, ist zunächst natürlich auch nicht zu erwarten, dass der Energieverbrauch, der hochgradig von der Nutzung abhängig ist, mit hoher Genauigkeit abgebildet werden kann.

Im Rahmen einer Diplomarbeit wurde der Frage nachgegangen, inwieweit über eine Individualberechnung gemäß DIN V 18599 mit angepassten Nutzungsprofilen und Kennwerten der anlagentechnischen Ausstattung eine Angleichung an den realen Energieverbrauch möglich ist [61].

Im Ergebnis ist festzustellen, dass selbst nach Anpassung aller relevanten Größen wie Nutzungszeiten, interne Lasten, Leitungslängen der Verteilnetze und Luftvolumenströme der Heizenergiebedarf in vielen Fällen im Monatsverfahren der DIN V 18599 offensichtlich systematisch zu hoch berechnet wird (übrigens auch im Vergleich zu stündlichen Rechnungen etwa nach der VDI 2067, wie sie in Kap. 8.10 beschrieben werden).

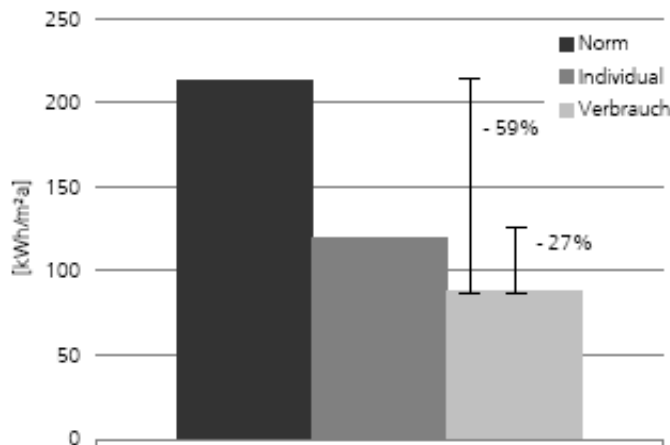


Abbildung 39 Vergleich des berechneten Endenergiebedarfs für Heizung nach Norm- und Individualberechnung und des gemessenen Heizenergieverbrauchs für das Gebäude von ennovatis in Großpösna

Beim Gebäude DVZ Barnim war aufgrund der umfassenden messtechnischen Ausstattung ein detaillierter Vergleich der berechneten und gemessenen Energieverbräuche möglich. Auch hier zeigen die Ergebnisse der DIN V 18599 erhebliche Abweichungen bei den einzelnen Bilanzanteilen. Dies ist auffällig insbesondere im Vergleich mit den Planwerten, die mit Hilfe einer dynamischen Gebäudesimulation berechnet wurden.

Tabelle 21 Vergleich des berechneten Endenergiebedarfs gemäß EnEV bzw. DIN V 18599 mit den entsprechenden Messwerten und den Planwerten für das Gebäude DVZ Barnim.

	Planwerte	Messwerte	DIN V 18599
	kWh/m²a	kWh/m²a	kWh/m²a
Heizen (Wärme)	28*	27,2	57
Kühlen (Kälte)	8*	7,5	21
Kühlen (Strom)	3	2	3
Lüfterstrom	5	7	9,8
Kunstlicht	10	13,6	26
Warmwasser	1	-	6,6

Insgesamt war es im Rahmen von ModBen nicht möglich mit Hilfe der Berechnungsmethodik der DIN V 18599 geeignete Zielwerte für den Energieverbrauch abzuleiten. Dies hat folgende Gründe:

- Der Strombedarf gemäß EnEV bezieht sich nur auf die Haustechnik und ist somit nicht vergleichbar mit gemessenem Gesamt-Stromverbrauch, der im Monitoring erhoben wird.
- Beim Endenergiebedarf für Heizung wird trotz der Anpassung von Nutzungsprofilen und der Kennwerte der Anlagentechnik der Energiebedarf in den meisten Fällen überschätzt.

- Obwohl die Norm sehr umfangreich und detailliert erscheint sind einige Technologien – insbesondere im Bereich Kühlung/Klimatisierung -nicht abbildbar:
 - Fernkälte
 - Direktkühlung über Grundwasser, Erdsonden, Rückkühlwerke
 - Reversible Wärmepumpen
 - Sorptiv gestützte Kühlung
- Eine Berechnung der Aufteilung der Last auf mehrere Erzeuger oder Übergabesysteme ist nicht korrekt möglich
- Neben den oben genannten Problemen wurde in der Bearbeitung deutlich, dass sowohl die Norm als auch die verwendete Software in einem relativ frühen Stadium befinden und daher Fehler enthalten, die zwar über die Zeit korrigiert werden, jedoch die Bearbeitung deutlich erschwert haben.

Weiterhin besteht aus rein praktischen Gesichtspunkten das Problem, dass Energiebedarfsausweise in Deutschland nur für neu zu errichtende Gebäude verpflichtend vorgeschrieben sind. Im Gebäudebestand kommt weitgehend der Energieverbrauchsausweis zum Einsatz, da dieser deutlich kostengünstiger angeboten werden kann.

D.h. im realen Gebäudebetrieb würde sich selbst bei einer besseren Eignung der DIN V 18599 zur Ableitung von Zielwerten für den Energieverbrauch eine Synergie nur schwerlich ergeben.

8.4. Stufe 3a - Das Datenhandling tool "datastorage"

8.4.1. Begründung für den Ansatz

Für die Entwicklung bzw. den Test von verschiedenen Analysemethoden sollte ein Werkzeug entwickelt werden, das den komplexen Umgang mit großen Datenmengen erlaubt und sich flexibel und modular weiterentwickeln lässt. Im Rahmen des Projekts wurde das Werkzeug datastorage für diesen Zweck entwickelt.

8.4.2. Beschreibung

Im Kern enthält datastorage eine Verwaltung für Zeitreihendaten und dazugehörige Metadaten. Modular können beliebige Funktionalitäten ergänzt werden. Es wurde bei der Entwicklung insbesondere auf die einheitliche und systematische Behandlung der Daten geachtet.

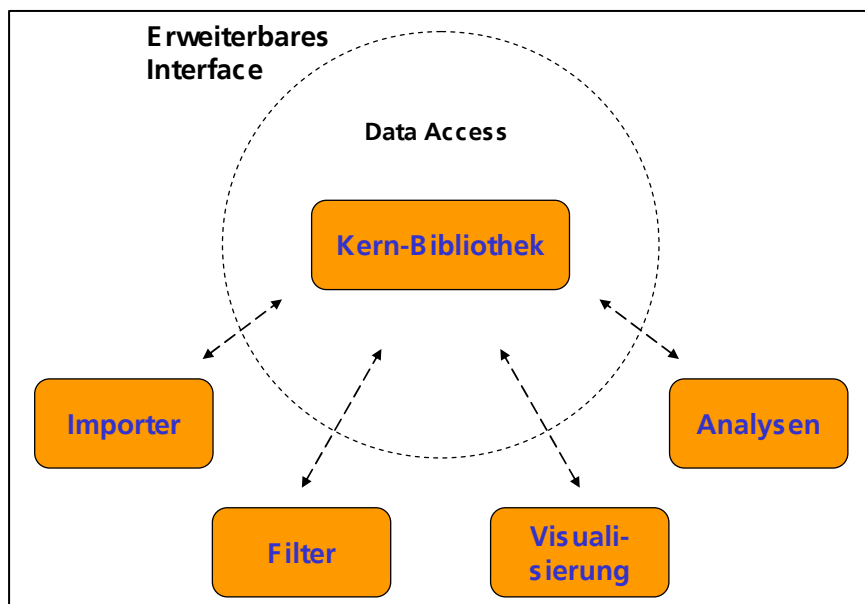


Abbildung 40 Struktur des Datenhandling tools datastorage

Neben Standardfunktion für Zeitreihen wie Interpolation und zeitliche Verdichtung wurden speziell die Filterungen und Gruppierung von Daten anhand beliebiger Bedingungen ermöglicht (für die Analyse von verschiedenen Betriebszuständen von Anlagen ist dies z.B. zwingend notwendig).

Weiterhin wurde ein Schema zur einheitlichen Datenbezeichnung erarbeitet, das eine hierarchische Strukturierung der Datenpunkte des minimalen Datensatzes ermöglicht. Die einheitliche Datenpunktbezeichnung beinhaltet folgende Kategorien:

- Gebäude
- Zone
- System
- Subsystem1
- Subsystem2
- Medium

- Position
- Datenpunktart
- Sensor

Für jede dieser Kategorien wurden Inhalte und entsprechende Abkürzungen definiert. Die Vorlauftemperatur in einem Heizkreis kann somit z.B. folgende Bezeichnung erhalten:

Building1_GF_WC.H_ _HW_SUP_MEA_T

(GF=Ground floor, WC.H = Water Circuit for heating, HW=hot water, SUP=supply pipe, MEA=measured value)

Aufgrund der Vereinheitlichung und hierarchischen Struktur können somit Algorithmen entwickelt werden, die selbstständig die notwendigen Datenpunkte identifizieren. Damit ist die Grundlage für eine weitreichende Automatisierung in der Analyse geschaffen.

8.4.3. Implementierung

Die Implementierung des Werkzeugs erfolgte auf Basis der Open Source Skriptsprache *python* (www.python.org). Die Messdaten werden im HDF5-Format abgelegt (Hierarchical Data Format). Eine ausführliche Dokumentation inklusive der Möglichkeit des Downloads des Quellcodes findet sich im Internet⁴⁰.

datastorage wird skriptbasiert verwendet, d.h. es existiert keine grafische Benutzeroberfläche (zumindest keine, die den Funktionsumfang voll abbildet).

Allerdings wurde im Rahmen von Modben ein Webfrontend erstellt, das den webbasierte Zugang zu den Daten und zu den Visualisierungen erlaubt (siehe modben.ise.fraunhofer.de)

8.4.4. Beispiel / Evaluation in den Demonstrationsgebäuden

datastorage stellt nur die Basis für die Entwicklung von Werkzeugen dar. Vor allem für die intelligente Datenvisualisierung kam datastorage verstärkt zum Einsatz (siehe 8.5).

8.5. Stufe 3a - Manuelle FED über intelligente Visualisierung

8.5.1. Begründung für den Ansatz

Der Mindestdatensatz enthält eine Fülle von Informationen über die Qualität des Gebäudebetriebs, die sich jedoch nicht unmittelbar aus den Rohdaten ablesen lassen. Um die Informationen aus dem Datensatz zu extrahieren, müssen die Daten in der Regel vorprozessiert (z.B. zeitlich verdichtet oder gemittelt) werden und der zeitliche Verlauf sowie gegenseitige Abhängigkeiten der einzelnen Datenpunkte müssen analysiert werden. Ein geeignetes Hilfsmittel hierfür ist die intelligente

⁴⁰ Siehe <https://trac.riap.eu/trac/DataStorage>. Für den Zugang ist eine Registrierung notwendig. Bitte wenden Sie sich an sebastian.herkel@ise.fraunhofer.de

Datenvisualisierung, die die Charakteristika des Betriebs als visuelle Muster wiedergibt. Diese Muster erlauben dem geübten Betrachter eine zwar manuelle, jedoch schnelle und sichere Identifikation von Fehlern und Optimierungspotenzialen im Betrieb. Ein typisches Beispiel für solch ein Muster ist z.B. die Signatur der Heizleistung, die sich aus der Darstellung der mittleren täglichen Heizleistung über dem Tagesmittel der Außentemperatur ergibt.

Der Mindestdatensatz gemäß 7.2 erlaubt hierbei eine weitgehende Standardisierung und Automatisierung, da von jedem Gebäude die gleichen Daten erfasst werden.

Obwohl der Mindestdatensatz zunächst überschaubar erscheint, kann er sich – in Abhängigkeit der Anzahl der Heiz-/Kühlkreise und RLT-Anlagen - im Einzelfall auf mehrere hundert Datenpunkte aufblähen. Ein weiterer Vorteil einer standardisierten und automatisierten Datenvisualisierung ist daher eine schnelle und einheitliche Prozessierung auch großer Datenmengen.

8.5.2. Beschreibung

Auf Basis des Mindestdatensatzes wurden für die enthaltenen Datenpunkte in den Bereichen Energieverbrauch, Heiz-/Kühlkreise und RLT-Anlagen standardisierte Visualisierungen inklusive Vorprozessierung der Daten entwickelt. Prinzipiell werden folgenden Visualisierungstypen verwendet

- **Zeitreihenplots**
Die klassische Darstellung des zeitlichen Verlaufs einer Messgröße als Linienplot
- **Relationaler Plot (Scatterplot oder XY plot)**
Scatterplots zeigen die Abhängigkeit zweier Datenpunkte. Zusätzliche Information kann erschlossen werden, wenn die Daten evtl. Zusätzlich gruppiert werden (z.B. verschiedene Betriebszustände).
Mehrere dieser Plots können zu so genannten Scatterplot-Matrizen kombiniert werden, die dann die Darstellung der Abhängigkeiten von mehr als zwei Variablen ermöglicht.
Scatterplots ermöglichen die Identifikation globaler Regelstrategien, z.B. die Abhängigkeit von Systemtemperaturen von der Außentemperatur. Diese Plots werden auch als Signatur bezeichnet.
- **Carpetplots**
Carpetplots sind eine besondere Art der Darstellung des zeitlichen Verlaufs einer Messgröße, bei der der Messwert mit Hilfe einer Farbskalierung angezeigt wird. Dadurch werden regelmäßige zeitliche Muster wie z.B. Betriebszeiten von Anlagen sehr gut ablesbar.
Carpetplots eignen sich daher besonders zur Identifikation von Betriebs- und Anwesenheitszeiten.
-

Für die Analyse werden hauptsächlich Scatter- und Carpetplots verwendet, da sie für die Bereiche Energieverbrauch, Heiz-/Kühlkreise und RLT-Anlagen charakteristische Betriebsmuster liefern, die eine schnelle Fehlererkennung erlauben.

Zeitreihendarstellungen werden lediglich als Referenz verwendet, z.B. um den zeitlichen Verlauf einer Störung im Detail zu untersuchen.

Wichtige Hilfsfunktionen für die Visualisierung stellen die Filterung und Gruppierung der Daten dar:

- **Filterung**

Als "Filterung" wird die Extraktion einer Teilmenge der Messdaten bezeichnet, die eine bestimmte Bedingung erfüllt. (z.B. Teilmenge der Daten eines Heizkreises, wenn die Umwälzpumpe in Betrieb ist). Somit kann das Verhalten der Messgrößen unter bestimmten Randbedingungen untersucht werden.

- **Gruppierung**

Messdaten können weiterhin nach bestimmten Bedingungen gruppiert werden (z.B. mittlere tägliche Heizleistung an Werktagen und Wochenenden). Verschiedene Betriebszustände können somit direkt miteinander verglichen werden.

Obwohl die zeitliche Auflösung des Mindestdatensatzes in der Regel 5-10 Minuten beträgt, ist in manchen Fällen die zeitliche Verdichtung zu Tageswerten sinnvoll, um dynamische Effekte zu reduzieren. Für eine Erstanalyse sollten mindestens 2-3 Monate an Messdaten vorliegen.

Die folgenden Abbildungen zeigen Beispiele für die verschiedenen Visualisierungstypen.

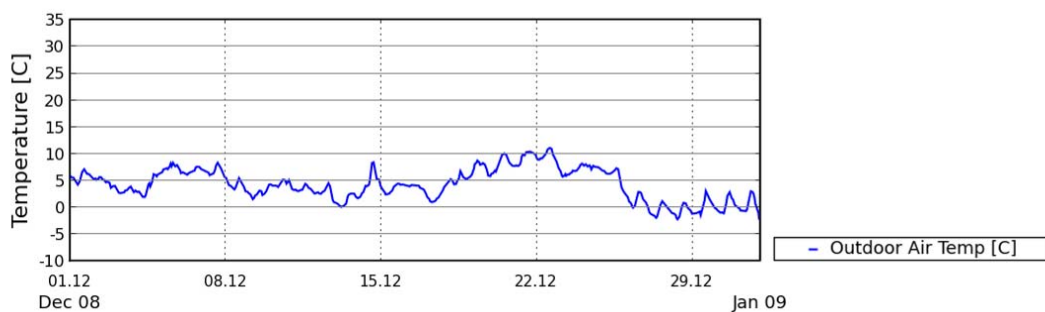


Abbildung 41 Zeitreihenplot.
klassische Zeitreihendarstellung einer Messgröße. Wird im Rahmen von ModBen nur als Referenz für die detaillierte Analyse des zeitlichen Verlaufs herangezogen.
Zeitliche Auflösung: 1 Stunde

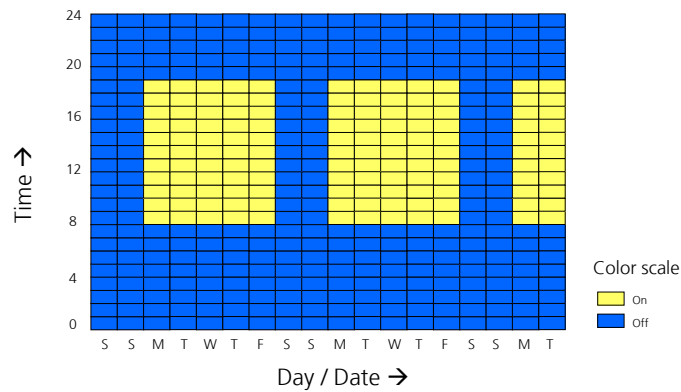


Abbildung 42 Idealisierter Carpetplot (würde sich z.B. ergeben, wenn ein Ventilator von montags bis freitags jeweils von 8:00 bis 18:00 betrieben würde.)
 Die Stundenwerte der Messgröße sind hier für jeden Tag als Farbwert von „unten“ (0:00 Uhr) nach „oben“ (23:00 Uhr) aufgetragen“. Die einzelnen Tage liegen nebeneinander auf der X-Achse. Für Tage mit ähnlichem Verlauf der Messgröße ergeben sich ähnliche Farbverläufe, so dass sich Muster (im obigen Fall „Wochenblöcke“ für den Betrieb des Ventilators) ergeben, die vom Betrachter schnell identifiziert werden können. Die Darstellung erlaubt die schnelle Identifikation von Betriebs- und Anwesenheitszeiten.
 Zeitliche Auflösung: 1 Stunde

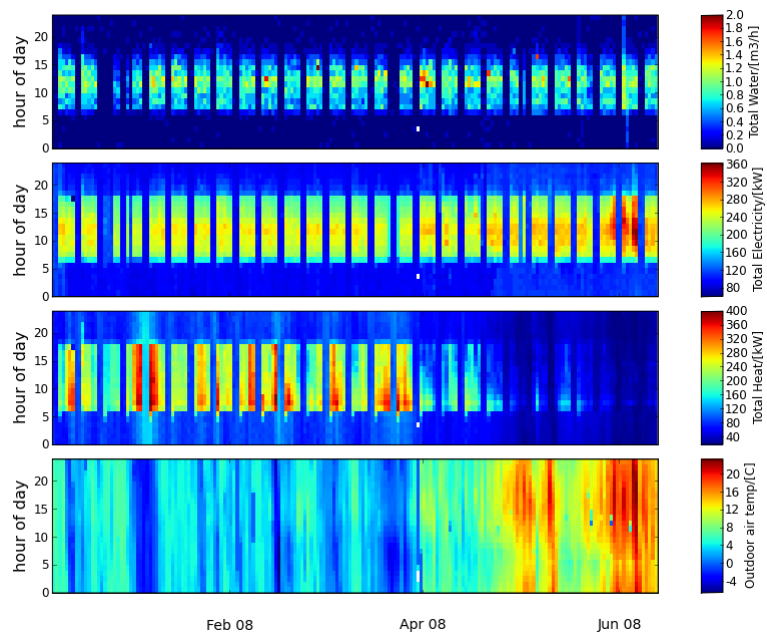


Abbildung 43 Carpetplot realer Wetter- und Verbrauchsdaten.
 Für reale Daten sind die Muster oft weniger „scharf“. Gerade für reale Daten zeigt sich jedoch der Vorteil im Vergleich zur klassischen Zeitreihendarstellung

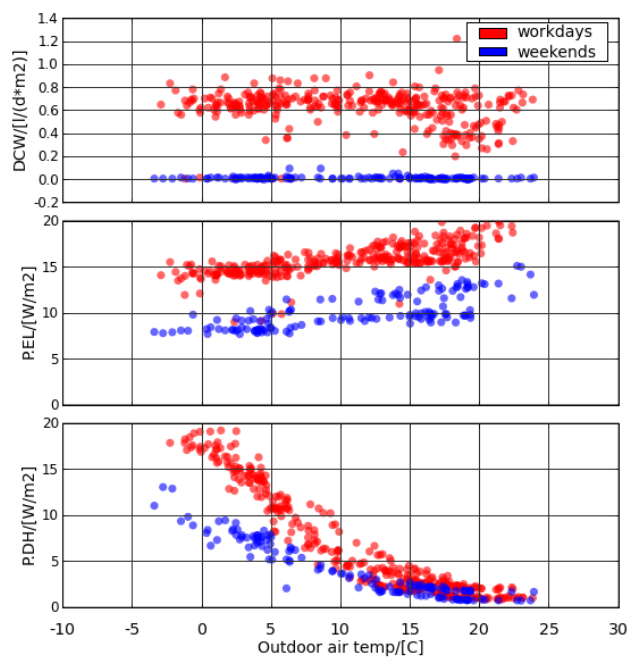


Abbildung 44 Scatterplot des Energie- und Wasserverbrauchs über der Außentemperatur, gruppiert nach Werktagen und Wochenende.
Diese Plots ermöglichen die Identifikation globaler Regelstrategien. Die Werte werden hierbei zu Tagesmittelwerten verdichtet, was die Identifikation der Charakteristik und von potenziellen Ausreißern erleichtert.

Für jeden Bereich des Mindestdatensatzes (Verbrauch, Heiz-/Kühlkreise, RLT-Anlagen) wurden entsprechende Plots nach vordefinierten Regeln bezüglich Filterung, Gruppierung erzeugt.

In den folgenden Abschnitten werden die Carpet- und Scatterplots für den Mindestdatensatz gezeigt und Ihre Interpretation wird erläutert.

8.5.3. Visualisierung Verbrauch

Der Mindestdatensatz beinhaltet die Daten des Gesamtenergie- und Wasserverbrauchs.

Scatterplot (Signaturen)

Der Scatterplot der Verbrauchsdaten zeigt den Energie- und Wasserverbrauch in Form der Tagesmittel der Leistung (für den Energieverbrauch) bzw. des Durchflusses (für den Wasserverbrauch) über dem Tagesmittel der Außentemperatur (AT). Die Daten sind nach Werktagen und Wochenenden gruppiert. Diese Darstellungen werden auch als Signaturen bezeichnet.

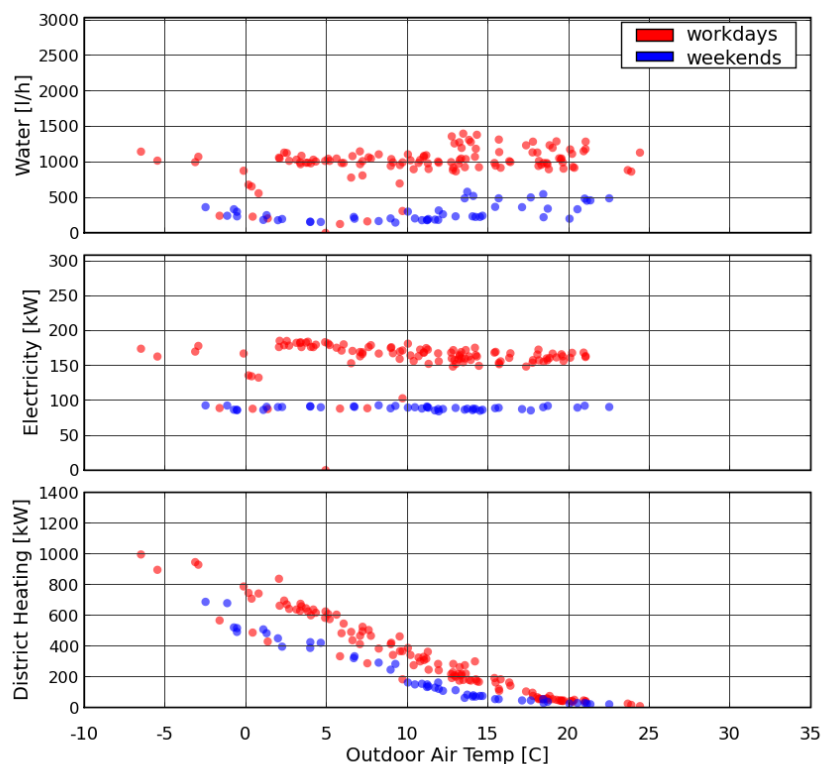
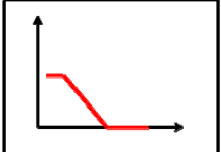
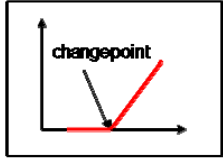
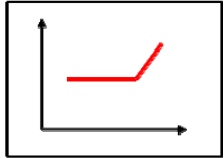
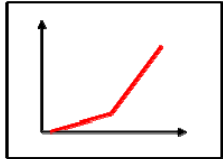
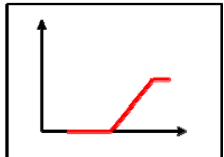


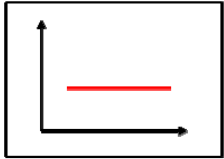
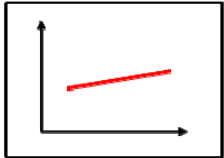
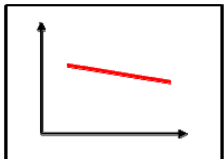
Abbildung 45 Beispiel für einen Scatterplot des Verbrauchs über der Außentemperatur
 Das Gebäude wird mit Fernwärme, Strom und Wasser versorgt
 Aus der Differenz zwischen dem Strom- und Wasserverbrauch an Werktagen und Wochenenden kann geschlossen werden, dass das Gebäude am Wochenende nicht genutzt wird. Entsprechend macht ein Absenkbetrieb der Heizung an Wochenenden Sinn, der auch tatsächlich sichtbar ist.

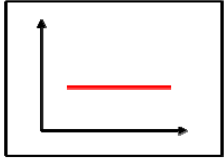
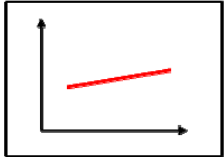
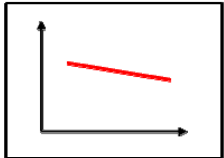
Tabelle 22 gibt einen Überblick über den generellen Aufbau der Scatterplots für die Verbrauchswerte.

Tabelle 22 Genereller Aufbau Scatterplots für Energie- und Wasserverbrauch
AT = Außentemperatur

Plots	Hinweise zur Interpretation	Typisches Erscheinungsbild (vereinfacht)
<p>Fernwärme über AT</p>	<ul style="list-style-type: none"> ○ Typisches Erscheinungsbild: Der Energieverbrauch steigt mit sinkender AT an. Über dem so genannten „Changepoint“ – bei Heizenergie in den meisten Fällen gleichbedeutend mit der Heizgrenze - kann die Leistung entweder A) gleich Null (wenn keine Wärme im Sommer benötigt wird)oder B) konstant sein (z.B. für einen klimaunabhängigen Verbrauch wie Warmwasser) oder C) eine negative Steigung haben. Der letzte Fall tritt typischerweise auf, wenn das Verteilnetz (evtl. unnötig) im Sommer betrieben wird und somit Verteilverluste auftreten. Wenn die Leistung bei niedrigen AT einen gewissen Wert nicht überschreitet (D), kann das ein Hinweis auf zu geringe Leistung der Fernwärmeversorgung sein, insbesondere, wenn es keinen weiteren Wärmeerzeuger gibt. ○ Unterschied zwischen Werktagen und Wochenenden Bei vielen Nichtwohngebäuden beschränkt sich die Nutzung auf die Werktage. Falls eine Wochenendabsenkung implementiert ist, erscheinen Werktage und Wochenenden als zwei separate Punktwolken mit erkennbarem Abstand. Je weiter die Absenkung, desto größer wird der Abstand. Falls kein Abstand erkennbar ist, ist oft ein fehlender oder fehlerhafter Absenkbetrieb Ursache hierfür. ○ Changepoint Der Changepoint bzw. die Heizgrenze liegt in den meisten Fällen zwischen 12°C und 18°C. Wenn sie deutlich höher liegt, könnte unnötiger Heizbetrieb vorliegen. Bei starkem Absenkbetrieb können Werktage und Wochenenden unterschiedliche Changepoints aufweisen. ○ Steigung: Die Steigung der Signatur korrespondiert mit der energetischen Qualität der Gebäudehülle und der Belüftung und stellt ein Maß für den spezifischen Wärmeverluste. Je geringer die Steigung desto besser ist die Qualität bzw. je geringer sind die Verluste ○ Nennleistung Aus dem Plot kann die Nennleistung abgeschätzt werden, indem die Heizleistung linear bis zur AT am Auslegungspunkt extrapoliert wird. Anhand der abgeschätzten Leistung kann die Dimensionierung der Wärmeerzeuger geprüft werden. 	<div style="display: flex; flex-direction: column; align-items: center;"> <div style="margin-bottom: 10px;"> <p>A) </p> </div> <div style="margin-bottom: 10px;"> <p>B) </p> </div> <div style="margin-bottom: 10px;"> <p>C) </p> </div> <div> <p>D) </p> </div> </div>

Plots	Hinweise zur Interpretation	Typisches Erscheinungsbild (vereinfacht)
	<ul style="list-style-type: none"> ○ Grundlast im Sommer In vielen Fällen korrespondiert die Grundlast im Sommer mit der klimaunabhängigen Wärmelast zur Warmwasserbereitung. Bei Nicht-Wohngebäuden liegt die Grundlast oft in einem Bereich deutlich unter 10% der Nennleistung. Wenn die Grundlast deutlich höher liegt, sollte überprüft werden, ob andere thermische Prozesse im Gebäude betrieben werden oder ob die energetische Qualität der Gebäudehülle und der anlagentechnischen Ausstattung extrem hochwertig ist. Andernfalls liegt evtl. ein Einsparpotenzial vor. ○ Streuung Wenn die Punkte im Plot eine große Streuung aufweisen, kann der Grund dafür z.B. eine stark unterschiedliche Nutzung des Gebäudes sein, eine fehlerhafte Regelung oder auch eine hohe energetische Qualität des Gebäudes, die den Einfluss von internen und solaren Lasten relativ stärker ausfallen lässt. 	
<p>Fernkälte über AT</p>	<ul style="list-style-type: none"> ○ Typisches Erscheinungsbild: Das Erscheinungsbild der Signatur von Fernkälte ist de der Fernwärme sehr ähnlich, abgesehen davon, dass die Kälteleistung natürlich mit zunehmender AT ansteigt Alle Aussagen zur Fernwärme können auf Fernkälte übertragen werden, wenn der umgekehrte Zusammenhang zur AT berücksichtigt wird. Im Fall von Zonen mit hohen internen Lasten (z.B. Rechenzentren) kann die Grundlast im Winter im Vergleich zur Spitzenlast jedoch deutlich höher ausfallen. 	<p>A) </p> <p>B) </p> <p>C) </p> <p>D) </p>
<p>Brennstoffe über AT</p>	<ul style="list-style-type: none"> ○ Typisches Erscheinungsbild: Das Erscheinungsbild der Signatur für Brennstoffe hängt stark vom Einsatz des Brennstoffs ab. Falls der Brennstoff ausschließlich zu Heiz- oder Kühlzwecken eingesetzt wird, treffen sie obigen Aussagen zu Fernwärme bzw. Fernkälte zu. Wird der Brennstoff jedoch z.B. in einer Anlage zur 	

Plots	Hinweise zur Interpretation	Typisches Erscheinungsbild (vereinfacht)
	<p>Kraft-Wärme-Kopplung eingesetzt, kann die Signatur deutlich von den obengezeigten Mustern abweichen. In diesem Fall ist zur Interpretation eine genaue Betrachtung des Systems notwendig.</p>	
<p>Strom über AT</p>	<ul style="list-style-type: none"> ○ Typisches Erscheinungsbild: Falls Strom überwiegend zu Heiz- oder Kühlzwecken eingesetzt wird (z.B. für Wärmepumpen oder Kältemaschinen) kann die Signatur den oben gezeigten für Fernwärme bzw. Fernkälte sehr ähnlich sein. In den meisten Gebäuden wird Strom für eine Vielzahl von Zwecken verwendet, wie z.B. Beleuchtung, Lüftung und Klimatisierung, Computer und andere Arbeitshilfen. Daher zeigen viele Gebäude eine konstante Signatur (A), falls Strom nicht oder nur marginal zu Heiz- und Kühlzwecken eingesetzt wird. Falls Strom zu Kühlzwecken eingesetzt wird, kann die Kühlleistung eine positive Steigung aufweisen. Falls die Kühlung nicht den Haupt-Stromverbraucher darstellt, ist üblicherweise kein Changepoint zu erkennen (B). Falls die Signatur eine negative Steigung aufweist (C), kann das häufig auf den erhöhten Strombedarf für Beleuchtung im Winter zurückgeführt werden (sofern Strom nicht auch zu Heizzwecken eingesetzt wird). ○ Unterschied zwischen Werktagen und Wochenenden: Viele Nicht-Wohngebäude weisen aufgrund einer fehlenden oder reduzierten Nutzung am Wochenende eine deutliche Differenz der Stromleistung an Werktagen und Wochenenden auf. Der Faktor zwischen Werktagen und Wochenenden liegt häufig im Bereich von etwa 2. Falls der Faktor deutlich geringer ausfällt, kann das ein Hinweis auf eine vergleichsweise hohe Grundlast und damit auf ein Einsparpotenzial sein. ○ Changepoint: Die Stromleistung wird nur dann einen Changepoint aufweisen, wenn der Verbrauch einen klimaabhängigen Anteil besitzt und dessen Maximalwert deutlich über 10% der Grundlast liegt. ○ Steigung: Die Steigung der Signatur ist ebenfalls mit dem klimaabhängigen Anteil der Last verbunden. Das Ausmaß der Steigung spiegelt direkt die Größenordnung der Klimaabhängigkeit wieder. Die Signatur von Strom, der zu Heizzwecken oder zur Beleuchtung eingesetzt wird, kann eine negative 	<div style="display: flex; flex-direction: column; align-items: center;"> <div style="margin-bottom: 10px;"> <p>A) </p> </div> <div style="margin-bottom: 10px;"> <p>B) </p> </div> <div> <p>C) </p> </div> </div>

Plots	Hinweise zur Interpretation	Typisches Erscheinungsbild (vereinfacht)
	<p>Steigung besitzen. Wenn er zu Kühlzwecken eingesetzt wird, kann die Steigung positiv sein. U.U. kompensieren klimaabhängige Verbrauchsanteile sich bezüglich der Steigung (z.B. Beleuchtung und Kühlung), so dass sich im Ergebnis eine konstante Signatur ergibt.</p> <ul style="list-style-type: none"> Typische Last: Viele „normal“ genutzte Nicht-Wohngebäude (Büronutzung ohne größere Datacenter oder Gastrobereiche) weisen eine durchschnittliche elektrische Last von ca. 5 W/m² Nutzfläche auf. Falls der Wert für ein entsprechendes Gebäude deutlich höher liegt, kann dies ein Hinweis auf ineffiziente Auslegung oder Betrieb der anlagentechnischen Systeme sein. 	
<p>Wasser über AT</p>	<ul style="list-style-type: none"> Typisches Erscheinungsbild: Der Wasserverbrauch zeigt ähnliche Signaturen wie der Stromverbrauch aus teilweise denselben Gründen. Viele Nicht-Wohngebäude haben keinen klimaabhängigen Anteil der Wasserverbrauchs (A). Eine positive Steigung (B) kann z.B. von Kühltürmen verursacht werden, die im Sommer den Wasserverbrauch erhöhen. Der Grund für eine negative Steigung (C) kann z.B. geringere Belegung im Sommer durch Ferienzeiten sein (insbesondere z.B. bei Universitäten oder Schulen) Changepoint: Die Signatur des Wasserverbrauchs der meisten Gebäude besitzt keinen Changepoint, da der klimaabhängige Anteil des Verbrauchs sehr gering ist (Ausnahmen können z.B. bei großen Kühltürmen auftreten) Steigung: Die Steigung der Signatur kann sowohl mit klimaabhängigen Verbrauchsanteilen (z.B. Bewässerung im Sommer) aber auch mit Belegungseffekten (Ferienzeiten) zu tun haben. Unterschied zwischen Werktagen und Wochenenden: Viele Nicht-Wohngebäude weisen aufgrund einer fehlenden oder reduzierten Nutzung am Wochenende eine deutliche Differenz des Wasserverbrauchs an Werktagen und Wochenenden auf. Der Wasserverbrauch ist der wichtigste Indikator für die Anwesenheit von Personen und liefert somit wichtige Informationen für die Nutzung des Gebäudes. 	<div style="display: flex; flex-direction: column; align-items: center;"> <div style="margin-bottom: 10px;"> <p>A) </p> </div> <div style="margin-bottom: 10px;"> <p>B) </p> </div> <div> <p>C) </p> </div> </div>

Plots	Hinweise zur Interpretation	Typisches Erscheinungsbild (vereinfacht)
Gesamplot	Aus einer vergleichenden Betrachtung der einzelnen Plots können folgende Informationen generiert werden: <ul style="list-style-type: none"><li data-bbox="488 479 1134 734">○ Absenkbetrieb: Wenn Wasser- und Stromverbrauch einen deutlichen Unterschied zwischen Werktagen und Wochenenden aufweisen, dann sollte in der Regel ein Absenkbetrieb für Heizung und Kühlung möglich sein. Falls dieser nicht aus den entsprechenden Signaturen ersichtlich ist, kann das ein mögliches Einsparpotenzial darstellen.<li data-bbox="488 748 1134 880">○ Gleichzeitiges Heizen und Kühlen: Dieser Effekt kann aus dem Vergleich der Signaturen für Fernwärme oder Brennstoffe mit den Signaturen von Fernkälte bzw. Strom.	

Carpetplots

Der Carpetplot für die Verbrauchswerte zeigt die Daten in stündlicher Auflösung in Form von Leistungen (Energie) bzw. Durchfluss (Wasser). Weiterhin werden die Außentemperatur und die Globalstrahlung als Referenz mit angezeigt.

Die Hauptanwendung von Carpetplots ist die Identifizierung von Betriebs- und Anwesenheitszeiten und ihrer gegenseitigen Abhängigkeiten.

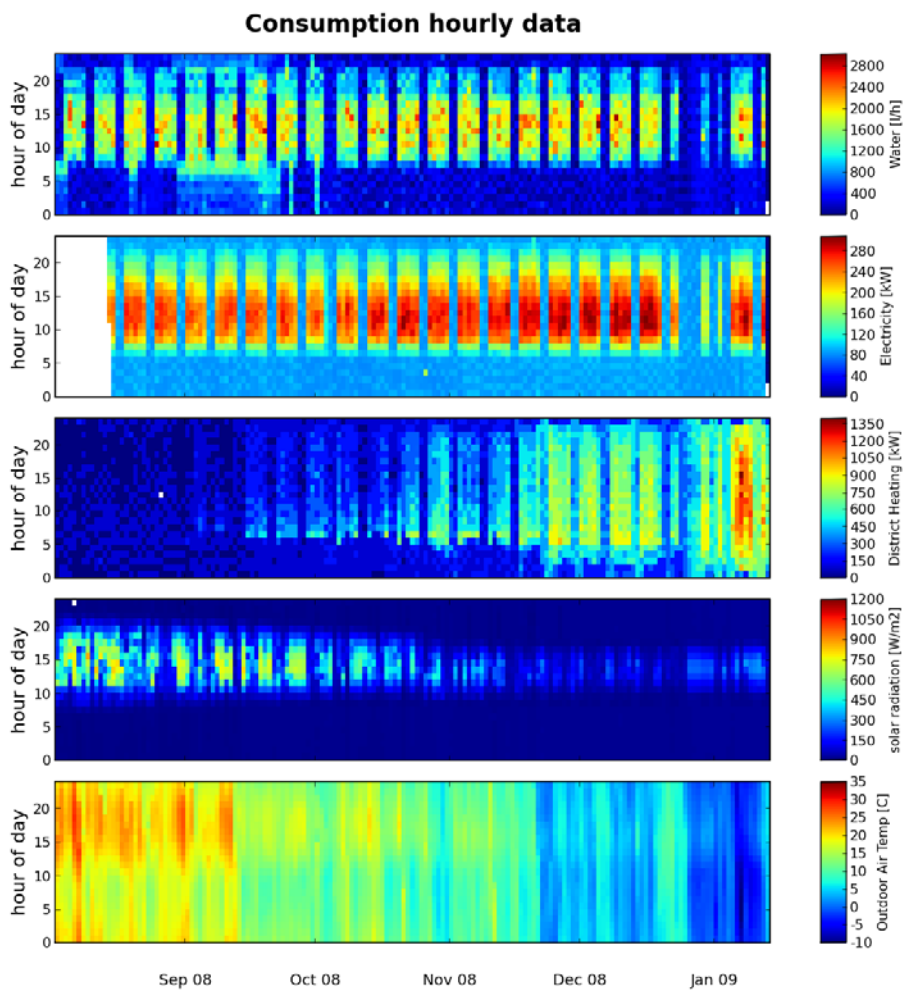
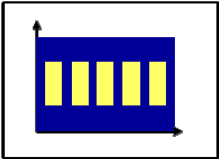
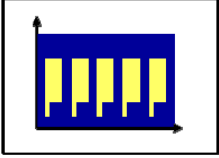
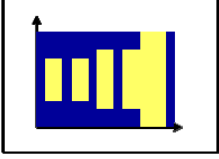
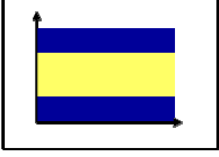
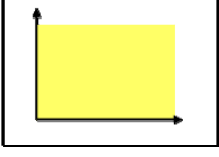
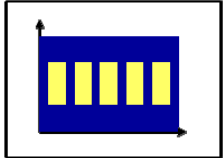
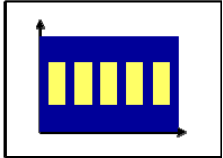


Abbildung 46 Beispiel eines Carpetplots für die Verbrauchswerte eines Nicht-Wohngebäudes. Strom- und Wasserverbrauch zeigen typische Wochenmuster, während die Heizlast im Winter ein eher verschwommenes Muster aufweist. Grund dafür ist eine AT-abhängige Steuerung der Betriebszeiten für die Heizung. Weiterhin kann beim Wasserverbrauch ein ungewöhnlicher Mehrverbrauch im September ausgemacht werden, der auf eine unkontrollierte Gründach-Bewässerung zurückgeführt werden kann. Die Weihnachtsferien können ebenfalls deutlich abgelesen werden.

Tabelle 23 gibt einen Überblick über den generellen Aufbau der Carpetplots für die Verbrauchswerte.

Tabelle 23 Genereller Aufbau der Carpetplots für Energie- und Wasserverbrauch
AT = Außentemperatur

Plots	Hinweise zur Interpretation	Typisches Erscheinungsbild (vereinfacht)
Wetterdaten (AT und Solarstrahlung)	<ul style="list-style-type: none"> Diese Daten werden nur als Referenz dargestellt 	
Fernwärme	<ul style="list-style-type: none"> Typisches Erscheinungsbild: In Abhängigkeit der Betriebszeiten und der Regelung können unterschiedliche Muster auftauchen. Falls der Betrieb lediglich über einen festen Zeitplan gesteuert wird, treten meist sehr regelmäßige tägliche und wöchentliche Muster auf (A), die den Absenkbetrieb in der Nacht und am Wochenende anzeigen. In manchen Gebäuden ist nach der Wochenendabsenkung eine spezielle Aufheizphase mit verlängerten Betriebszeiten vorgesehen, um die verstärkte Auskühlung zu kompensieren (B). In anderen Gebäuden wird in Abhängigkeit der AT bzw. bei niedriger AT die Betriebszeit der Heizung verlängert (C) Falls der Zeitplan an Werktagen und Wochenenden gleich ist, ergibt sich Muster (D), bei durchgehendem Betrieb ergibt sich (E). Saisonale Änderungen: Typischerweise „verschwindet“ das Muster für Fernwärme in den Sommermonaten, sofern die Grundlast gering ist. In der Übergangszeit kann es vorkommen, dass das Muster nur in den Morgenstunden, nach dem Absenkbetrieb in der Nacht, deutlich zu erkennen ist. Falls an diesen Tagen an den Nachmittagen Kühlenergiebedarf auftritt, könnte dies ein Einsparpotenzial darstellen. Falls die Ferienzeiten im Zeitplan für den Betrieb berücksichtigt sind, sollten diese aus dem Muster ablesbar sein. 	<p>A) </p> <p>B) </p> <p>C) </p> <p>D) </p> <p>E) </p>
Fernkälte	<ul style="list-style-type: none"> Typisches Erscheinungsbild: analog zu Fernwärme Saisonale Änderungen: analogo zu Fernwärme, das Muster „verschwindet“ jedoch im Winter 	
Brennstoffe	<ul style="list-style-type: none"> Typisches Erscheinungsbild: 	

Plots	Hinweise zur Interpretation	Typisches Erscheinungsbild (vereinfacht)
	<p>In Abhängigkeit der Nutzung des Brennstoffs kann das Muster ähnlich zu dem der Fernwärme oder Fernkälte sein. Wird der Brennstoff jedoch z.B. in einer Anlage zur Kraft-Wärme-Kopplung oder für andere thermische Prozesse eingesetzt, ist zur Interpretation des Musters eine genaue Betrachtung des Systems notwendig.</p>	
Strom	<ul style="list-style-type: none"> ○ Typisches Erscheinungsbild: Das typische Muster des Stromverbrauchs für Nichtwohngebäude ist ein klares Wochenmuster (A). Der Stromverbrauch außerhalb der Nutzungszeit ist deutlich geringer. Daher erlaubt der Carpetplot des Stromverbrauchs einen Rückschluss auf die Anwesenheit von Personen. Abweichungen von diesem Muster können ein Hinweis auf Einsparpotenziale sein. ○ Saisonale Änderungen: Saisonale Änderungen des Stromverbrauchsmusters treten meist auf, wenn es einen klimaabhängigen Anteil des Verbrauchs gibt. Meist ist das Muster über das Jahr sehr konstant. Ferienzeiten sollten klar ablesbar sein. 	<p>A) </p>
Wasser	<ul style="list-style-type: none"> ○ Typisches Erscheinungsbild: Der Wasserverbrauch ist - noch mehr als der Stromverbrauch – ein Indikator für Anwesenheit von Personen (z.B. Toiletten, Kantine). Daher zeigen Nicht-Wohngebäude häufig ein sehr regelmäßiges Wasserverbrauchsmuster. Abweichungen vom Muster können ein Hinweis auf Einsparpotenziale sein (z.B. taucht eine klemmende Toilettenspülung als senkrechte Linie im Plot auf). ○ Saisonale Änderungen: Der Wasserverbrauch ist in den meisten Fällen lediglich nur abhängig von der Belegung des Gebäudes. Daher tauchen Ferienzeiten als Unterbrechungen des Musters auf. Saisonale Effekte können z.B. durch Bewässerung von Gärten oder Gründächern oder auch durch den Betrieb von nassen Kühltürmen im Sommer entstehen. 	<p>A) </p>
Gesamtplot	<p>Aus einer vergleichenden Betrachtung der einzelnen Plots können folgende Informationen generiert werden:</p> <ul style="list-style-type: none"> ○ Angepasste Betriebszeiten Ein Vergleich der Muster kann offenbaren, ob Heizung oder Kühlung unnötig betrieben 	

Plots	Hinweise zur Interpretation	Typisches Erscheinungsbild (vereinfacht)
	<p>werden. Häufig ist dies in Ferienperioden zu beobachten. Wasser- und Stromverbrauch zeigen zu diesen Zeiten eine Unterbrechung des regelmäßigen Musters. Falls Heizung oder Kühlung nicht dieselbe Unterbrechung aufweisen, stellt dies ein Einsparpotenzial dar.</p>	

8.5.4. Visualisierung Heiz-/Kühlkreise

Der Mindestdatensatz umfasst die Vor- und Rücklauftemperatur der Heiz- und Kühlkreise sowie die Betriebsrückmeldung der entsprechenden Pumpen, falls diese verfügbar ist.

Für die Analyse der Daten muss die hydraulische Schaltung der Kreise bekannt sein (z.B. Leistungsanpassung mit Vorlauftemperaturregelung über ein Mischventil oder mittels Anpassung des Massenstroms über ein Zweiwegeventil). Weiterhin muss bekannt sein, ob sich die Messpunkte auf der Primär- oder Sekundärseite des Kreises befinden.

An dieser Stelle werden die Datenvisualisierungen der Schaltungen dargestellt, die bei den Demonstrationsgebäuden am häufigsten anzutreffen waren.

Für Heizkreise ist dies eine Mischerschaltung mit einem Drei-Wege-Verteilventil und einer Pumpe auf der Sekundärseite.

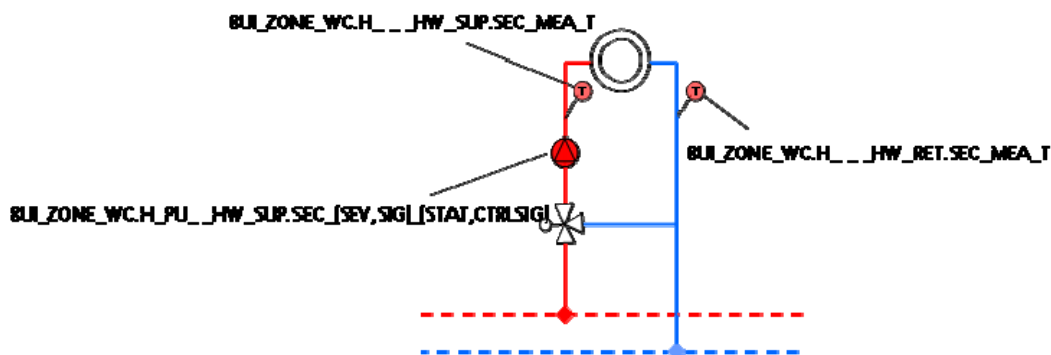


Abbildung 47 Schema eines typischen Heizkreises mit den Datenpunkten des Mindestdatensatzes in der Notation der einheitlichen Datenpunktbezeichnung (siehe H)

Bei Kühlkreisläufen werden die Messpunkte oft auf der Primärseite platziert. Daher wird sich dieser Abschnitt auf diese Art der Messdatenerfassung konzentrieren.

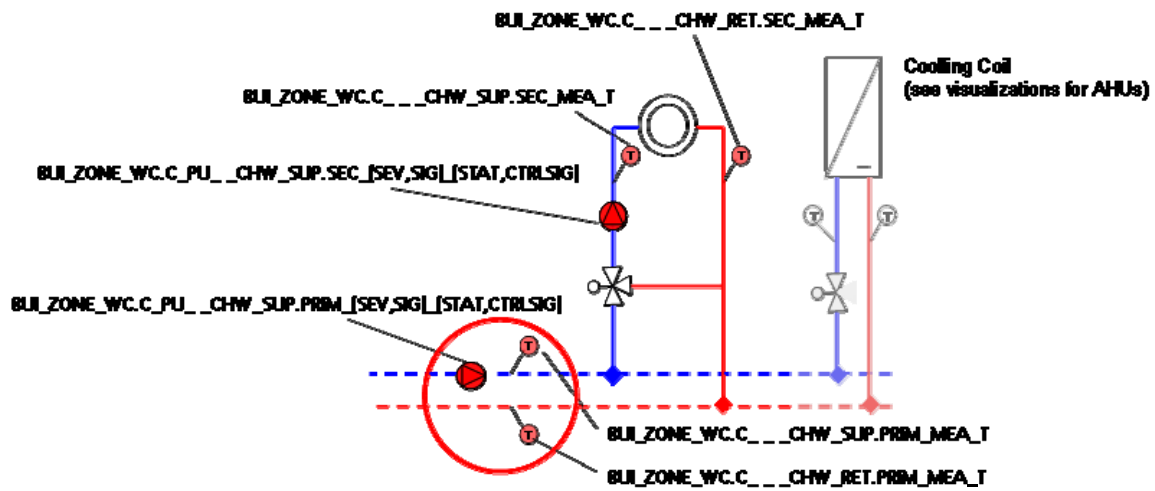


Abbildung 48 Schema eines typischen Kühlkreises mit den Datenpunkten des Mindestdatensatzes in der Notation der einheitlichen Datenpunktbezeichnung (siehe H). Die rote Markierung zeigt die Messpunkte, die in diesem Kapitel betrachtet werden.

Scatterplots (Signaturen)

Der Scatterplot der Heiz- und Kühlkreise zeigt die Tagesmittel der Systemtemperaturen (Vor- und Rücklauf) und die Spreizung über dem Tagesmitte der Außentemperatur. Falls die Betriebsrückmeldung bzw. das Stellsignal der Pumpe erfasst wird, wird die Spreizung jeweils für den Betriebszustand „Pumpe an“ und „Pumpe aus“ dargestellt. Die Daten werden gruppiert nach Werktagen und Wochenenden. Weiterhin werden alle Daten mit dem Betriebssignal der Pumpe gefiltert, d.h. die Tagesmittelwerte der Systemtemperaturen werden nur für den betreffenden Betriebszustand („Pumpe an“, „Pumpe aus“) ermittelt.

Die folgende Abbildung zeigt zwei Beispiele.

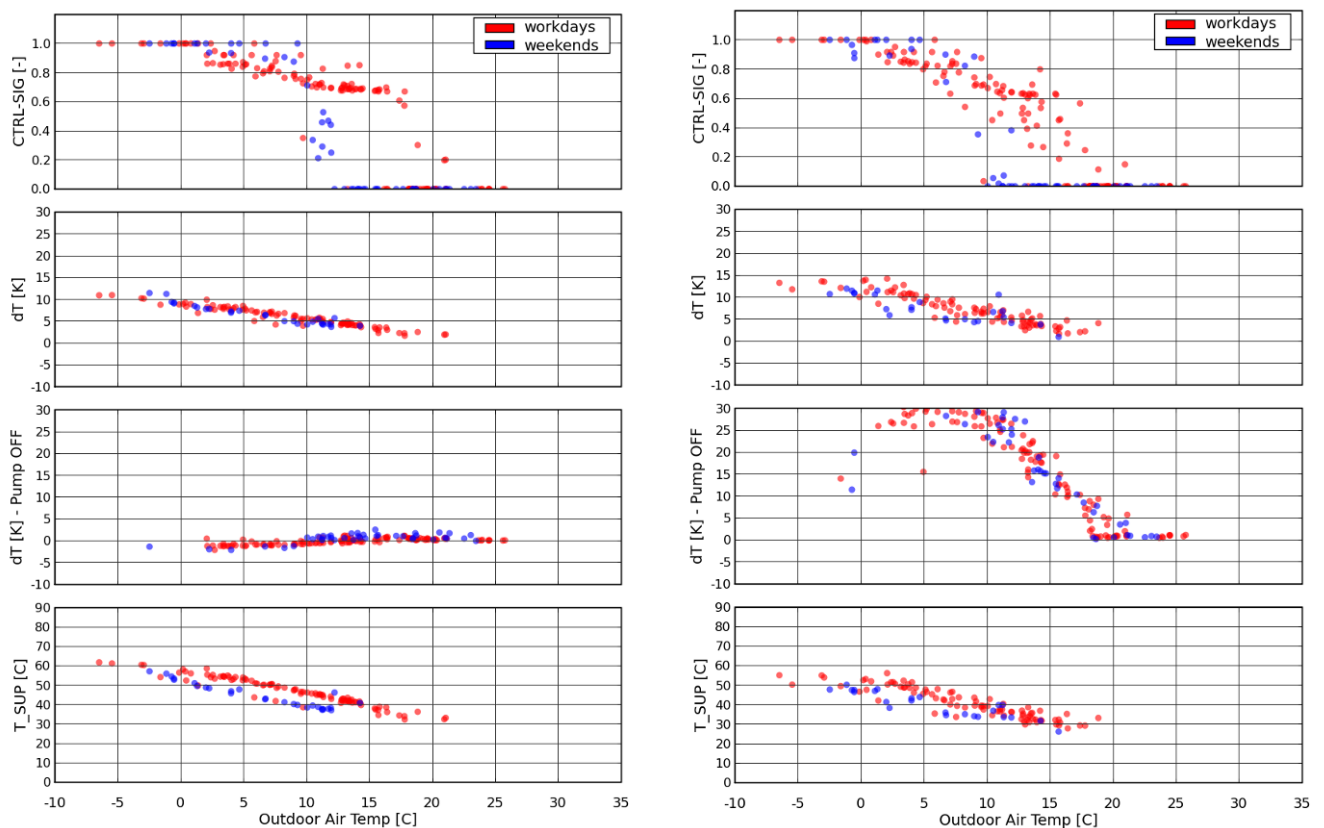
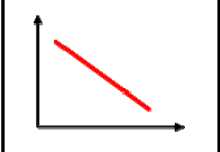
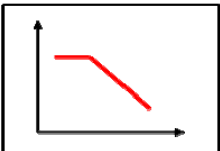
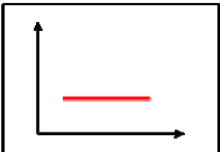

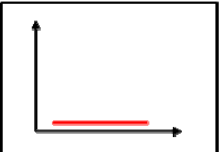
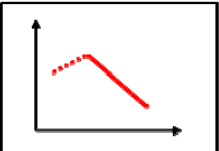
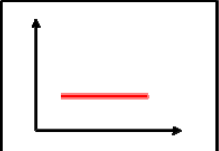


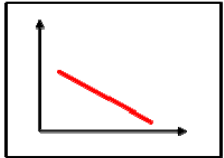
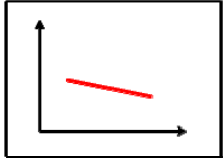
Abbildung 49 Beispiele von Scatterplots für Heizkreise
Links: Beispiel eines Heizkreises ohne größere Mängel
 Vorlauftemperatur (T_SUP) und Spreizung (dT) zeigen einen negative lineare Korrelation zur Außentemperatur. Eine Absenkung der Vorlauftemperur an Wochenenden ist erkennbar. Wenn die Pumpe nicht läuft, ist dT im Bereich +/- 5K
Rechts: Beispiel eines Heizkreises mit Mängeln.
 Vorlauftemperatur (T_SUP) und Spreizung (dT) zeigen einen negative lineare Korrelation zur Außentemperatur aber die Absenkung der Vorlauftemperatur an Wochenenden ist nicht ausgeprägt. Weiterhin hat des Mischventil offensichtlich eine Leckage, da die Spreizung eine deutlich negative Steigung beim Betriebszustand „Pumpe aus“ zeigt.

Tabelle 24 gibt einen Überblick über den generellen Aufbau der Scatterplots für Heiz- und Kühlkreise.

Tabelle 24 Genereller Aufbau der Scatterplots für Heiz- und Kühlkreise
 AT = Außentemperatur
 * **Hinweis:** Die vereinfachten Plots zeigen das typische Erscheinungsbild von Heizkreisen. Die Plots für Kühlkreise entsprechen diesen Darstellungen mit dem Unterschied, dass die Korrelation zur Außentemperatur positiv ist.

Plots	Hinweise zur Interpretation	Typisches Erscheinungsbild (vereinfacht)
<p>Vorlauftemp. über AT</p>	<ul style="list-style-type: none"> ○ Typisches Erscheinungsbild: Die Vorlauftemperatur (T_SUP) von Heizkreisen zeigt eine negative Korrelation zu AT (A). In einigen Fällen wird eine maximale Vorlauftemperatur deutlich oberhalb der Auslegungstemperatur erreicht (B). In diesen Fällen können Komfortprobleme auftreten. Falls dies nicht der Fall ist, kann die Steilheit von T_SUP reduziert werden. Bei Kühlkreisen ist die Temperatur auf der Primärseite häufig konstant (C) ○ Unterschied zwischen Werktagen und Wochentagen: Bei vielen Nichtwohngebäuden beschränkt sich die Nutzung auf die Werktage. Falls eine Wochenendabsenkung implementiert ist, erscheinen Werktage und Wochenenden als zwei separate Punktwolken mit erkennbarem Abstand. Je weiter die Absenkung, desto größer wird der Abstand. Falls kein Abstand erkennbar ist, ist oft ein fehlender oder fehlerhafter Absenkbetrieb Ursache hierfür. Falls das Gebäude an Wochenenden nicht genutzt wird (anhand der Plots der Verbrauchsdaten prüfen), sollte bei T_SUP eine Absenkung erkennbar sein. Werktage und Wochenenden sollten als zwei separate Punktwolken mit erkennbarem Abstand erscheinen. Je größer der Abstand, desto mehr Einsparung kann die Absenkung erzielen. Falls die beiden Falls kein Abstand erkennbar ist, ist oft ein fehlender oder fehlerhafter Absenkbetrieb Ursache hierfür. ○ Changepoint (Heizkreise): Falls die Betriebsrückmeldung der Pumpe verfügbar ist, wird kein Changepoint sichtbar sein. Falls sie jedoch nicht verfügbar ist, kann ein Changepoint bei T_SUP auftreten, weil dann die Temperaturen auch für den Betriebszustand „Pumpe aus“ gemittelt werden (siehe unten). ○ Steigung (Heizkreise): Die Steigung ist abhängig vom verwendeten Übergangssystem. Bei Heizkreisen können die 	<div style="display: flex; flex-direction: column; align-items: center;"> <div style="margin-bottom: 10px;"> <p>A) </p> </div> <div style="margin-bottom: 10px;"> <p>B) </p> </div> <div style="margin-bottom: 10px;"> <p>Cooling circuits (primary side)</p> </div> <div> <p>C) </p> </div> </div>

Plots	Hinweise zur Interpretation	Typisches Erscheinungsbild (vereinfacht)
	<p>Auslegungstemperaturen zwischen 60-80°C (Heizkörper, Konvektoren) und 30-50°C (z.B. Fußbodenheizung) variieren. Für Kühlkreise sind in der Auslegung Vorlauftemperaturen im Bereich von 6°C (z.B. Ventilatorkonvektor) bis 18°C (z.B. Betonkernaktivierung) üblich. Dementsprechend kann die Steigung überprüft werden, soweit der Typ des Übergabesystems bekannt ist.</p> <ul style="list-style-type: none"> ○ Streuung: Falls der Plot eine große Streuung bzw. Varianz der Punkte zeigt, könnte eine fehlerhafte Regelung aber auch manuelle Eingriffe der Grund dafür sein. IN jedem Fall sollte in diesem Fall eine Ursachenermittlung erfolgen. 	
<p>Rücklauftemp. Über AT</p>	<ul style="list-style-type: none"> ○ Typisches Erscheinungsbild: Für Heizkreise verhält sich die Rücklauftemperatur (T_RET) analog zu T_SUP. Für Kühlkreise zeigt T_RET eine negative Steigung. ○ Streuung: Die Ursache für eine große Streuung bzw. Varianz kann eine stark wechselnden Last oder in eine fehlerhafte Regelung sein. 	<p>Cooling circuits (primary side)</p> <p>A) </p>
<p>Spreizung über AT wenn Pumpe AUS</p>	<ul style="list-style-type: none"> ○ Typisches Erscheinungsbild: Wenn die Pumpe eines Heiz- oder Kühlkreises ausgeschaltet ist, sollte die Spreizung konstant (nahe 0) sein, falls es keinen äußeren Einfluss gibt (A). Eine Leckage des Mischventils liegt mit hoher Wahrscheinlichkeit vor, wenn eine signifikante negative Steigung bei dT erkennbar ist (B). In diesem Fall verursacht häufig eine Pumpe auf der Primärseite des Kreises einen Fehlmassestrom im Kreis, der zu einer merklichen Spreizung führt. Bei Kühlkreisen ist die Spreizung konstant, wenn die Pumpe nicht in Betrieb ist. 	<p>Heating circuits (secondary side)</p> <p>A) </p> <p>B) </p> <p>Cooling circuits (primary side)</p> <p>C) </p>

Plots	Hinweise zur Interpretation	Typisches Erscheinungsbild (vereinfacht)
<p>Spreizung über AT wenn Pumpe AN</p>	<ul style="list-style-type: none"> ○ Typisches Erscheinungsbild: Für Heizkreise sollte dT eine erkennbar negative Steigung aufweisen, wenn die Pumpe in Betrieb ist (A). Kühlkreise zeigen ebenfalls eine negative Steigung, aufgrund der konstanten Vorlauftemperatur (B). ○ Steigung / maximales dT: Die Steigung bzw. die maximale Spreizung (bei niedrigen AT für Heizkreise und bei hohen AT für Kühlkreise) kann zur Bewertung der Hydraulik herangezogen werden. Wenn z.B. die maximale Spreizung eines Heizkreises, der Heizkörper versorgt sehr niedrig erscheint (z.B. 5K bei AT -5 °C), ist der Massenstrom im Kreis für die aktuelle Last zu hoch. D.h. elektrische Antriebsenergie kann eingespart werden Dies kann in vielen Systemen beobachtet werden. Insbesondere beträgt die Spreizung in Kühlkreisen oft nur 1K oder weniger. 	<p>Heating circuits (secondary side)</p> <p>A) </p> <p>Cooling circuits (primary side)</p> <p>C) </p>
<p>Gesamtplot</p>	<p>Aus einer vergleichenden Betrachtung der einzelnen Plots können folgende Informationen generiert werden:</p> <ul style="list-style-type: none"> ○ Abhängigkeiten der Sensoren Um dT bewerten zu können, muss die Charakteristik von T_{SUP} beachtet werden. Je niedriger (Heizkreise) bzw. höher (Kühlkreise) T_{SUP} ist, desto geringer wird dT ausfallen. Auch der Vergleich von dT wenn die Pumpe An bzw. AUS ist, kann wertvolle Information für die Analyse liefern. 	

Carpetplots

Die Carpetplots für Heiz- und Kühlkreise zeigen die Systemtemperaturen und die Betriebsrückmeldung der Pumpen oder Ventile in stündlicher Auflösung. Weiterhin werden die Außentemperatur und die Globalstrahlung als Referenz mit angezeigt.

Die Hauptanwendung von Carpetplots ist die Identifizierung von Betriebszeiten.

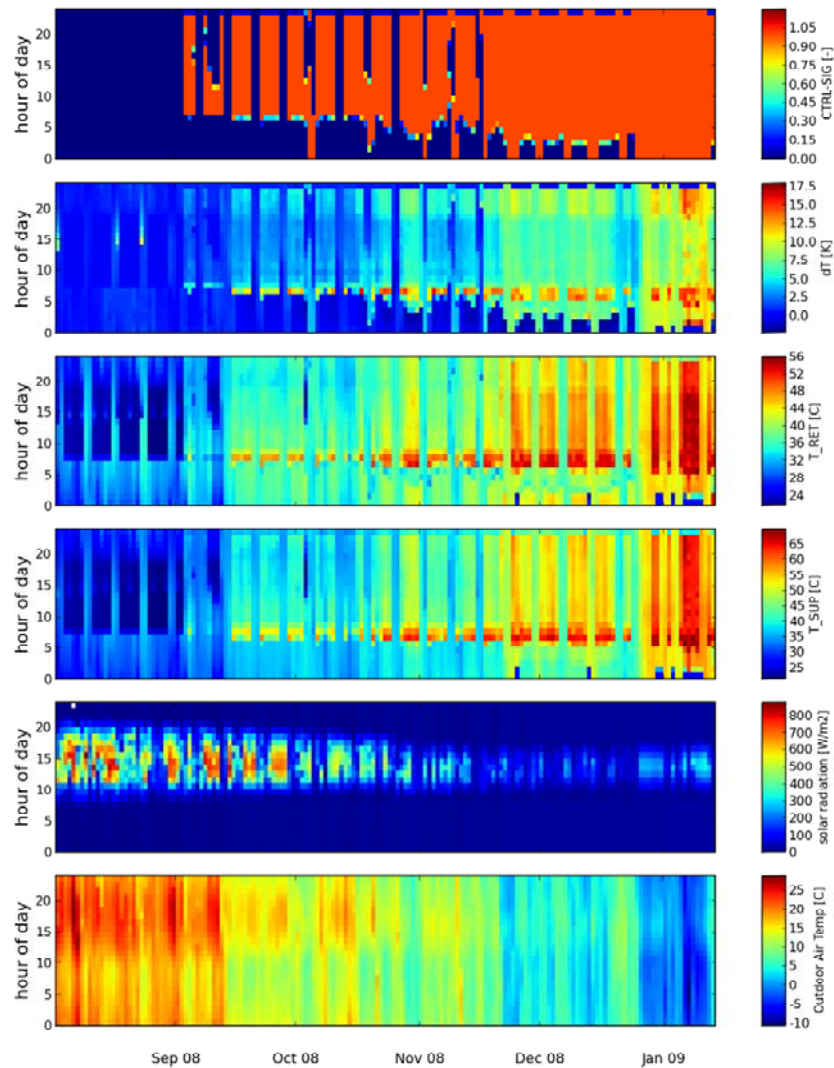
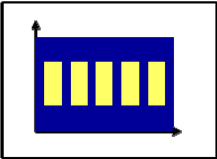
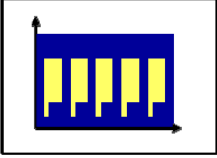
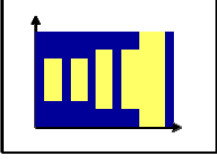
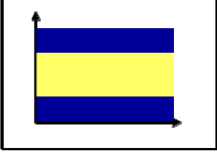
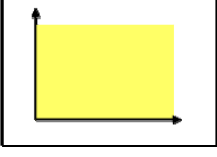


Abbildung 50 Beispiel eines Carpetplots für einen Heizkreis
 Dargestellt sind die Wetterdaten (AT und Globalstrahlung) als Referenz, Vor- und Rücklauftemperatur (T_{SUP} , T_{RET}), die Spreizung (dT) und die Betriebsrückmeldung der Pumpe (CTRL-SIG).

Der Plot zeigt, dass der Pumpenbetrieb (CTRL-SIG) sich von Wochenmustern im September / Oktober zu Dauerbetrieb im Dezember entwickelt
 Der Grund dafür ist eine außentemperaturabhängige Steuerung der Betriebszeiten.
 Gleichzeitig kann an Anheizbetrieb in den Morgenstunden beobachtet werden, da T_{SUP} und dT hier erhöhte Werte zeigen.

Tabelle 25 gibt einen Überblick über den generellen Aufbau der Carpetplots für Heiz- und Kühlkreise.

Tabelle 25 Genereller Aufbau der Carpetplots für Heiz- und Kühlkreise
AT = Außentemperatur

Plots	Hinweise zur Interpretation	Typisches Erscheinungsbild (vereinfacht)
Wetterdaten (AT und Globalstrahlung)	<ul style="list-style-type: none"> ○ Diese Daten werden nur als Referenz gezeigt. 	
Vorlauftemp. (T_SUP)	<ul style="list-style-type: none"> ○ Typisches Erscheinungsbild: Die Vorlauftemperatur zeigt ähnliche Muster wie Fernwärme, Kälte oder Brennstoffe (siehe 8.5.3) Typische Muster zeigen z.B. eine reine Zeitabhängigkeit (A), verlängerte Aufheizphasen nach einer Absenkung am Wochenende (B), Ausdehnung der Betriebszeiten in kalten Perioden (C), keine Absenkung am Wochenende (D) oder durchgehenden Betrieb (E). Im Fall von durchgehendem oder sehr ausgedehntem Betrieb sollte auf jeden Fall die Notwendigkeit geprüft werden. Weiterhin kann es vorkommen, dass T_SUP im Absenkbetrieb höher (Heizkreise) bzw. niedriger (Kühlkreise) liegt als in normalen Betriebsphasen. Undichtigkeiten an Ventilen können ein Grund hierfür sein. ○ Saisonale Änderungen: Typischerweise ist das Muster während Zeiten mit hoher Anforderung (im Winter: Heizkreise, Im Sommer: Kühlkreise) besser erkennbar. 	<p>A) </p> <p>B) </p> <p>C) </p> <p>D) </p> <p>E) </p>
Rücklauftemp. (T_RET)	<ul style="list-style-type: none"> ○ Typisches Erscheinungsbild: analog zu T_SUP ○ Saisonale Änderungen: analog zu T_SUP 	
Spreizung (dT)	<ul style="list-style-type: none"> ○ Typisches Erscheinungsbild: dT zeigt dieselben Muster wie T_SUP jedoch häufig in stärkerer Ausprägung Wenn die Pumpe im Kreis konstantem Massenstrom betrieben wird, steht dT in direktem Verhältnis zur Leistung die Übertragen wird. Im Falle einer drehzahlregelten Pumpe mit 	

Plots	Hinweise zur Interpretation	Typisches Erscheinungsbild (vereinfacht)
	<p>variablen Massenstrom sind die Muster oft weniger deutlich</p> <ul style="list-style-type: none"> ○ Saisonale Änderungen: analog zu T_SUP 	
Betriebsrückmeldung Pumpe oder Ventil (CTRLSIG)	<ul style="list-style-type: none"> ○ Typisches Erscheinungsbild: Grundsätzlich kann CTRLSIG dieselben Muster zeigen wie T_SUP. Die Betriebsrückmeldungen geben direkten Aufschluss über die Betriebszeiten des betreffenden Kreises. 	
Gesamtplot	<p>Aus einer vergleichenden Betrachtung der einzelnen Plots können folgende Informationen generiert werden:</p> <ul style="list-style-type: none"> ○ Angepasste Betriebszeiten Der Carpetplot kann verwendet werden, um zu prüfen, ob die Betriebszeiten von Pumpen und Ventilen an den Bedarf angepasst sind. Dazu ist auch ein Vergleich mit dem Carpetplot der Verbrauchsdaten hilfreich. 	

8.5.5. Visualisierung Lüftungsanlagen

Der Mindestdatensatz umfasst die Temperaturen an Ein- und Ausgang des Geräts (luft- und wasserseitig) sowie die Betriebsrückmeldungen der Antriebe.

Um die Daten analysieren zu können, muss die Konfiguration des Lüftungsgeräts bekannt sein. Abbildung 51 zeigt die "Maximalkonfiguration" einer Lüftungsanlage mit Kühlregister, Heizregister und Vorheizregister sowie einer Wärmerückgewinnung.

Die Heiz- und Kühlregister werden bezüglich der Datenvisualisierung wie Heiz- und Kühlkreise behandelt (siehe Kapitel 8.5.4). Daher werden hier nur die Plots für die Luftseite der Lüftungsanlage vorgestellt.

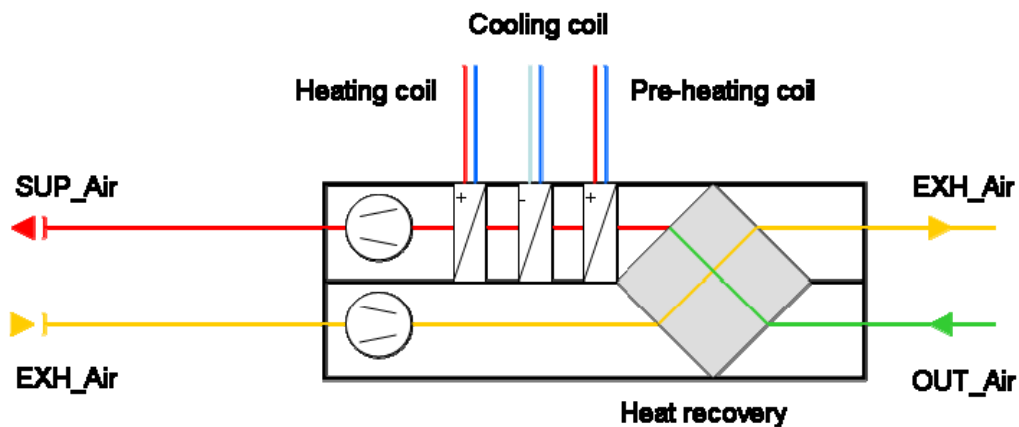


Abbildung 51 Vereinfachtes Schema der Maximalkonfiguration einer Lüftungsanlage (jedoch ohne Befeuchtung)

Scatterplots (Signaturen)

Der Scatterplot für Lüftungsanlagen zeigt die Tagesmittel der Systemtemperaturen auf der Luftseite (Zuluft, Abluft, Differenz zwischen Zu- und Abluft) und die Temperaturdifferenzen (Spreizung) auf der Wasserseite der Register über dem Tagesmittel der Außentemperatur.

Die Lufttemperaturen werden - falls vorhanden – mit der Betriebsrückmeldung bzw. dem Stellsignal der Ventilatoren gefiltert, so dass nur Temperaturen während Betrieb der Anlage dargestellt werden. Entsprechendes gilt für die wasserseitigen Temperaturen im Bezug auf die betreffenden Pumpen. Die Daten werden gruppiert nach Werktagen und Wochenenden. Die folgende Abbildung zeigt ein Beispiel.

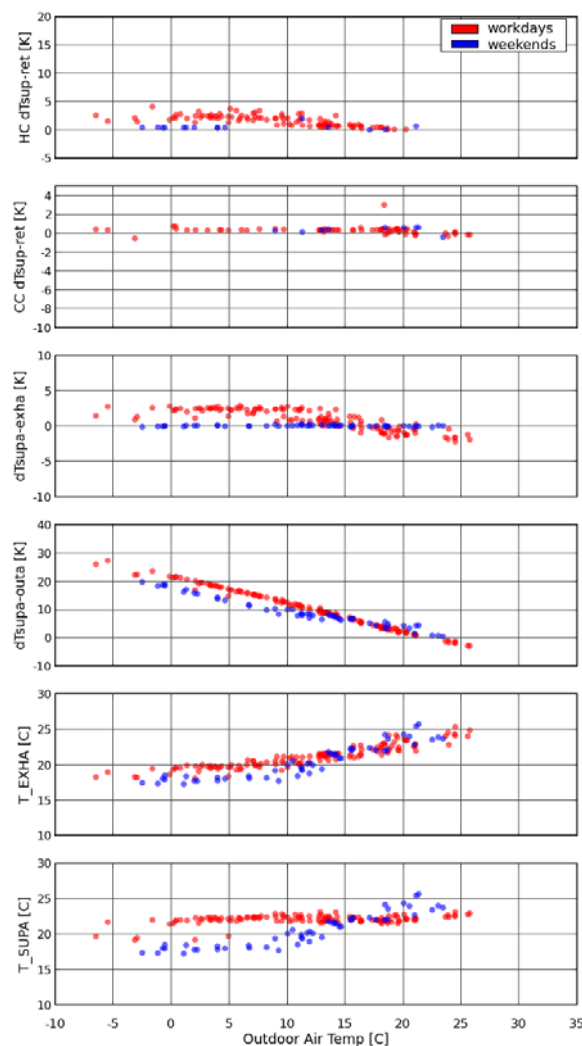
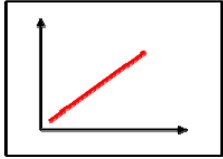
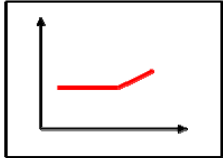
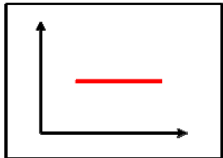
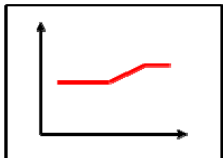
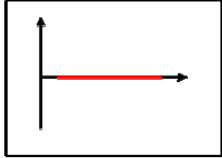
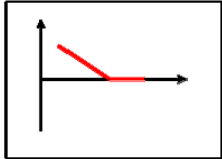
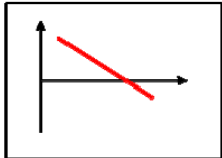
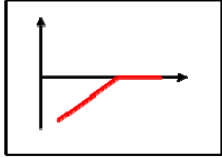
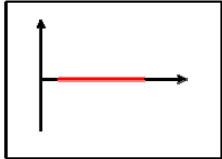
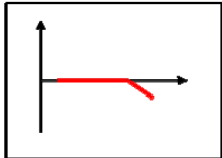
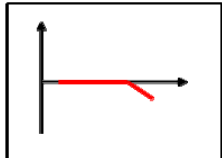


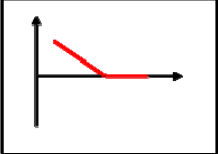
Abbildung 52 Beispiel eines Scatterplot für Lüftungsanlagen
Die Lüftungsanlage ist mit einem Heiz und einem Kühlregister ausgestattet. Die Differenz zwischen Zu- und Ablufttemperatur ($dT_{\text{supa-exha}}$) zeigt, ob die versorgte Zone über die Zuluft beheizt oder gekühlt wird. Wenn die differenz größer als 0 ist wird die Zone beheizt um umgekehrt. Die Signaturen der Zu- und Abluft zeigen ein entsprechendes Verhalten. Die Spreizung auf der Wasserseite der Register ($CC\ dT_{\text{sup-ret}}$ and $HC\ dT_{\text{sup-ret}}$) zeigt, wann die Register zur Konditionierung der Zuluft eingesetzt werden. Während das Heizregister bei Außentemperaturen unter 15°C zum Einsatz kommt, wird das Kühlregister erst ab Außentemperaturen über 22°C eingesetzt.

Tabelle 26 gibt einen Überblick über den generellen Aufbau der Scatterplots für raumluftechnische Anlagen.

Tabelle 26 Genereller Aufbau von Scatterplots für raumluftechnische Anlagen
AT = Außentemperatur

Plots	Hinweise zur Interpretation	Typisches Erscheinungsbild (vereinfacht)
<p>Zulufttemp. über AT</p>	<ul style="list-style-type: none"> ○ Typisches Erscheinungsbild: Das Erscheinungsbild der Zulufttemperatur (T_{SUPA}) ist abhängig vom Aufbau der Lüftungsanlage. Wenn die Zuluft weder geheizt noch gekühlt wird, folgt sie der Außentemperatur. (A). Falls eine Wärmerückgewinnung verwendet wird, liegt die Steigung im Bereich kleiner 1, bei einer sehr effizienten Wärmerückgewinnung auf deutlich unter 1. Wenn die Zuluft im Winter geheizt wird, jedoch im Sommer nicht gekühlt, zeigt T_{SUP} Muster (B). Wenn die Zulufttemperatur konstant gehalten wird (Heizen im Winter und Kühlen im Sommer) ergibt sich Muster (C). Wenn unterschiedliche Solltemperaturen für die Zulufttemperatur im Winter und Sommer eingestellt sind, zeigt sich Muster (D). ○ Unterschied zwischen Werktagen und Wochentagen: Wenn die Ventilatoren nur an Werktagen betrieben werden, erscheinen keine Daten für die Wochenenden in der Signatur, da die Temperaturen mit dem Betriebssignal der Ventilatoren gefiltert werden. Wenn die Ventilatoren an Wochenenden betrieben werden, hängt das Muster von der Art des Betriebs a und kann allen oben beschriebenen Mustern entsprechen. Bei Nichtwohngebäuden sollte Wochenendbetrieb von raumluftechnischen Anlagen am Wochenende jedoch immer kritisch hinterfragt werden. ○ Changepoint Die genaue Position des Changepoints in Muster (B) and (D) ist abhängig vom energetischen Standard des Gebäudes und von den internen Gewinnen. Je höher die internen Gewinne und je besser der energetische Standard, desto geringer ist die AT an der Position des Changepoint. 	<div style="display: flex; flex-direction: column; align-items: center;"> <div style="margin-bottom: 10px;">A) </div> <div style="margin-bottom: 10px;">B) </div> <div style="margin-bottom: 10px;">C) </div> <div style="margin-bottom: 10px;">D) </div> </div>
<p>Ablufttemp. über AT</p>	<ul style="list-style-type: none"> ○ Typisches Erscheinungsbild: Die Ablufttemperatur zeigt Muster (B), (C) or (D) (siehe oben) in Abhängigkeit des Betriebszustands. 	

Plots	Hinweise zur Interpretation	Typisches Erscheinungsbild (vereinfacht)
<p>Temperaturdifferenz Zuluft – AT über AT</p>	<ul style="list-style-type: none"> ○ Typisches Erscheinungsbild: Wenn die Zuluft nicht thermisch behandelt, ergibt sich für die Differenz zwischen Zu- und Außenlufttemperatur ($dT_{\text{supa-oua}}$) Muster (A). Wenn die Zuluft lediglich geheizt wird, ergibt sich Muster (B), wenn sie geheizt und gekühlt wird Muster (C). (Hinweis: Wenn die versorgte Zone mehrere Übergabesysteme für Heizung und Kühlung besitzt, können die Muster in Abhängigkeit der Regelstrategie und der Deckungsanteile dieser Übergabesysteme abweichen) Grundsätzlich wird die Zuluft geheizt (über Heizregister, Wärmerückgewinnung oder auch über den Ventilator) wenn dT positiv ist und gekühlt (Wärmerückgewinnung, Kühlregister oder adiabatische Kühlung) wenn dT negativ ist. ○ Unterschied zwischen Werktagen und Wochentagen: Ähnlich wie bei der Zulufttemperatur können die Muster außerhalb der Anwesenheitszeiten in Abhängigkeit der Betriebsweise deutlich abweichen. 	<p>A) </p> <p>B) </p> <p>C) </p>
<p>Temperaturdifferenz Zuluft – Abluft über AT</p>	<ul style="list-style-type: none"> ○ Typisches Erscheinungsbild: Wenn die Zuluft nicht thermisch behandelt wird, zeigt die Temperaturdifferenz zwischen Zu- und Abluft ($dT_{\text{supa-exha}}$) Muster (A). Wenn die Zuluft lediglich geheizt wird, zeigt sich Muster (B). Wenn die Zuluft geheizt und gekühlt wird, zeigt sich bei hohen AT eine negative Steigung, wie in (C). (Hinweis: Wenn die Zone mehrere Übergabesysteme für Heizung und Kühlung besitzt, können die Muster in Abhängigkeit der Regelstrategie und der Deckungsanteile dieser Übergabesysteme abweichen) Grundsätzlich wird die Zuluft geheizt, wenn dT positiv ist und gekühlt, wenn dT negativ ist. ○ Unterschied zwischen Werktagen und Wochentagen: Ähnlich wie bei der Zulufttemperatur können die Muster außerhalb der Anwesenheitszeiten in Abhängigkeit der Betriebsweise deutlich abweichen. 	<p>A) </p> <p>B) </p> <p>C) </p>
<p>Temperaturspreizung Wasserseite Kühlregister über AT</p>	<ul style="list-style-type: none"> ○ Typisches Erscheinungsbild: Die Temperaturspreizung auf der Wasserseite des Kühlregisters zeigt eine negative Steigung bei hohen AT. ○ Changepoint/Steigung Die Steigung und die Position des Changepoint sind Abhängig vom energetischen Standard des Gebäudes und den internen Gewinnen. Typischerweise liegt der 	<p>A) </p>

Plots	Hinweise zur Interpretation	Typisches Erscheinungsbild (vereinfacht)
	<p>Changepoint zwischen 15 und 20°C AT. Wenn die Spreizung im Bereich hoher AT gering ist ($\leq 1\text{K}$), kann das ein Hinweis auf einen überhöhten Massenstrom im Register sein.</p>	
<p>Temperatur spreizung Wasserseite Heizregister über AT</p>	<ul style="list-style-type: none"> ○ Typisches Erscheinungsbild: Die Temperaturspreizung auf der Wasserseite des Heizregisters zeigt eine negative Steigung bei niedrigen AT. ○ Changepoint/Steigung Typischerweise liegt der Changepoint zwischen 10 and 15°C AT. Wenn die Spreizung im Bereich niedriger AT gering ist ($\leq 5\text{K}$), kann das ein Hinweis auf einen überhöhten Massenstrom im Register sein 	<p>A) </p>
<p>Gesamtplot</p>	<p>Aus einer vergleichenden Betrachtung der einzelnen Plots können folgende Informationen generiert werden:</p> <p>Abhängigkeiten der Sensoren: Da die Abhängigkeit der verschiedenen Variablen im physikalischen Sinn hoch ist, liefert eine Vergleichende Betrachtung gute Hinweise für die Betriebsanalyse (z.B. ob das Betriebsmuster des Kühlregisters mit dem Verhalten der Zulufttemperatur übereinstimmt)</p>	

Carpetplots

Neben den Systemtemperaturen auf der Luft- und Wasserseite zeigt der Carpetplot für Lüftungsanlagen die Betriebsrückmeldungen bzw. Stellsignale der Antriebe.

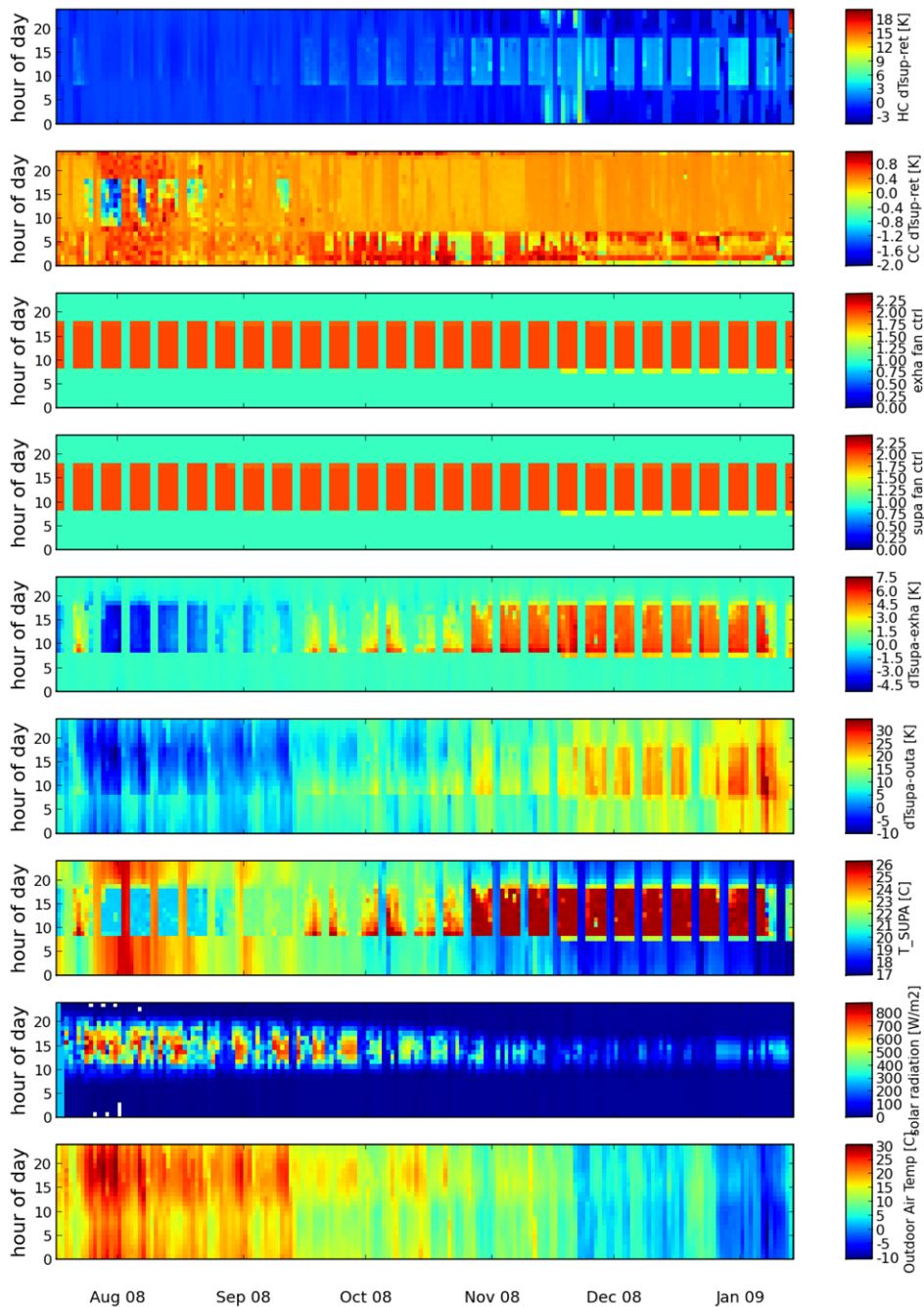
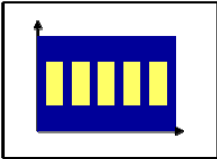
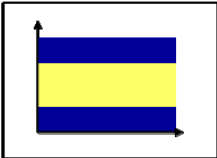
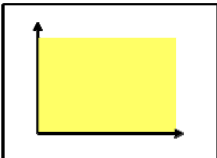


Figure 1 Beispiel eines Carpetplot für eine Lüftungsanlage
 Dargestellt sind die Wetterdaten (AT und Globalstrahlung) als Referenz, Die Zulufttemperatur (T_SUPA), Die Temperaturdifferenz zwischen Zuluft und Außenluft (dTSupa-out), Die Temperaturdifferenz zwischen Zuluft und Abluft (dTSupa-exha), Die Stellsignale der Ventilatoren und die Spreizung der wasserseitigen Temperaturen im Heiz- und Kühlregister.
 Das Stellsignal der Ventilatoren zeigt ein regelmäßiges Wochenmuster. Die luftseitigen Temperaturen zeigen den Übergang vom Kühlbetrieb im Sommer zum Heizbetrieb im Winter. Die wasserseitige Temperaturspreizung der Register gibt einen Hinweis auf deren Betriebszeiten.

Tabelle 27 gibt einen Überblick über den generellen Aufbau der Carpetplots für raumluftechnische Anlagen.

Tabelle 27 Genereller Aufbau von Carpetplots für raumluftechnische-Anlagen (RLT-Anlagen)
AT = Außentemperatur

Plots	Hinweise zur Interpretation	Typisches Erscheinungsbild (vereinfacht)
Wetterdaten (AT und Globalstrahlung)	<ul style="list-style-type: none"> ○ Diese Daten werden nur als Referenz gezeigt. 	
Zulufttemperatur (T_SUPA)	<ul style="list-style-type: none"> ○ Typisches Erscheinungsbild: Das Muster der Zulufttemperatur ist abhängig von den Betriebszeiten und der Regelstrategie der RLT-Anlage. Wenn die Anlage während der üblichen Geschäftszeiten betrieben wird, ergibt sich Muster (A). Wenn die Anlage auch an tagsüber an Wochenenden betrieben wird, zeigt sich Muster (B), bei durchgehendem Betrieb Muster (C). Allerdings ist das Erscheinungsbild des Musters auf stark abhängig vom Standort der RLT-Anlage bzw. Der entsprechenden Sensoren, da dies die Temperaturen bestimmt, die in Nicht-Nutzungszeiten gemessen werden. Wenn die Anlage bzw. die Sensoren z.B. außerhalb der gedämmten Gebäudehülle auf dem Dach des Gebäudes steht, folgen die gemessenen Zulufttemperaturen in Nicht-Betriebszeiten der Außentemperatur. Umgekehrt zeigen sich bei Anlagen, die in temperierten Innenräumen untergebracht sind, Temperaturen nahe der Raumtemperatur des Aufstellortes. Dies kann sich entscheidend auf die „Sichtbarkeit“ der Muster auswirken, was bei der Analyse beachtet werden muss. ○ Saisonale Änderungen: Auch die saisonalen Änderungen sind eng mit der Steuer- und Regelstrategie verknüpft. Die Änderungen sind am markantesten, wenn die Zuluft entweder gar nicht behandelt wird oder aber intensiv zur Heizung und Kühlung der versorgten Zone eingesetzt wird. Wenn die Zulufttemperatur konstant ganzjährig gehalten wird, ergeben sich natürlich keine saisonalen Änderungen (zumindest in der Betriebszeit) 	<p>A) </p> <p>B) </p> <p>C) </p>
Temperaturdifferenz Zuluft – Außenluft (dTsupa-out)	<ul style="list-style-type: none"> ○ Typisches Erscheinungsbild: Die Muster sind analog zur Zulufttemperatur. Wenn die Temperaturdifferenz positive Werte zeigt, wird die Zuluft geheizt (z.B. durch Wärmerückgewinnung, Heizregister oder auch nur 	

Plots	Hinweise zur Interpretation	Typisches Erscheinungsbild (vereinfacht)
	<p>über die Temperaturerhöhung durch den Ventilator). Wenn die Differenz negativ ist, wird die Zuluft gekühlt (z.B. über Kälterückgewinnung, Kühlregister oder adiabatische Kühlung)</p> <ul style="list-style-type: none"> ○ Saisonale Änderungen: analog zur Zulufttemperatur 	
Temperaturdifferenz Zuluft - Abluft (dTsupa-exha)	<ul style="list-style-type: none"> ○ Typisches Erscheinungsbild: Die Muster sind analog zu denen der Zulufttemperatur. Wenn die Differenz positiv ist, liefert die Zuluft Wärme in die versorgte Zonen, bei negativen Werten wird Kälte bereitgestellt. ○ Saisonale Änderungen: analog zur Zulufttemperatur 	
Betriebsrückmeldung Ventilatoren	<ul style="list-style-type: none"> ○ Typisches Erscheinungsbild: Die Muster sind analog zu denen der Zulufttemperatur. Wenn die Ventilatoren durchgängig betrieben werden, sollte die Notwendigkeit dazu geprüft werden. In vielen Fällen ist der Betrieb nachts und am Wochenende nicht notwendig. Der Carpetplot des Energieverbrauchs (siehe 8.5.3) kann bei der Analyse hilfreich sein, da er über die Signale des Strom- und Wasserverbrauchs Informationen zur Belegung des Gebäudes mit Personen liefern kann. 	
Temperaturspreizung Wasserseite Kühlregister (CC dTsup-ret)	<ul style="list-style-type: none"> ○ Typisches Erscheinungsbild: Die Muster sind analog zu denen der Zulufttemperatur sind in der Regel jedoch nur in der Kühltperiode sichtbar. Treten die Muster ebenfalls im Winter auf, sollte die Regelung überprüft werden. ○ Saisonale Änderungen: Die Muster sollten nur in der Kühlperiode im Sommer auftauchen 	
Temperaturspreizung Wasserseite Heizregister (HC dTsup-ret)	<ul style="list-style-type: none"> ○ Typisches Erscheinungsbild: Die Muster sind analog zu denen der Zulufttemperatur, sind in der Regel jedoch nur in der Heizperiode sichtbar. Treten die Muster ebenfalls im Sommer auf, sollte die Regelung überprüft werden. ○ Saisonale Änderungen: Die Muster sollten nur in der Heizperiode im Winter auftauchen. 	
Gesamtplot	<p>Aus einer vergleichenden Betrachtung der einzelnen Plots können folgende Informationen generiert werden:</p> <ul style="list-style-type: none"> ○ Angepasste Betriebszeiten: 	

Plots	Hinweise zur Interpretation	Typisches Erscheinungsbild (vereinfacht)
	<p>Aus dem Carpetplot können die Betriebszeiten der einzelnen Komponenten wie Ventilatoren und Heiz-/Kühlregister abgelesen werden. Durch einen Vergleich kann leicht festgestellt werden, ob diese abgestimmt sind.</p> <ul style="list-style-type: none"> ○ Gleichzeitiges Heizen und Kühlen Ob gleichzeitiger und ineffizienter Heiz- und Kühlbetrieb vorliegt, kann anhand eines Vergleichs der Temperaturspreizungen der Heiz- und Kühlregister festgestellt werden. Wenn beide zur selben Zeit betrieben werden, sollte die Regelung überprüft werden. ○ Heiz- oder Kühlleistung nicht ausreichend Wenn die Temperaturspreizung am Kühlregister dessen Betrieb anzeigt und aber die Temperaturdifferenz zwischen Zuluft und Abluft positiv ist, sollte die Regelung und die Kapazität des Kühlregisters überprüft werden. Gleiches gilt sinngemäß auch für das Heizregister, wenn die Lüftung einen signifikanten Anteil der Bereitstellung der Heizleistung für die versorgte Zone übernimmt. 	

8.5.6. Implementierung

Die Datenvisualisierung wurde mit dem Tool datastorage umgesetzt (siehe auch 8.4). Die Plots werden dabei persistent in der H5-Datenbank gespeichert. Datastorage bietet eine optimale Umgebung für die Vorprozessierung der Rohdaten.

Von Bedeutung ist, dass die Erstellung der hier vorgestellten Datenvisualisierungen des Energieverbrauchs, der Heizkreise und der Lüftungsanlagen automatisiert, auf Basis der einheitlichen Datenpunktbezeichnung (siehe 8.4) geschieht. Dadurch wird eine einfache und schnelle Anwendbarkeit sichergestellt.

8.5.7. Beispiel / Evaluation in den Demonstrationsgebäuden

Die manuelle Fehlererkennung und Diagnose anhand der standardisierten Datenvisualisierung wurde für alle Gebäude durchgeführt.

Als Beispiel werden hier die Ergebnisse für den Energieverbrauch des Gebäudes EADS 88 in München gezeigt (siehe auch 8.1.3). Die folgenden Abbildungen zeigen den Energie- und Wasserverbrauch des Gebäudes in der Darstellung als Zeitreihenplot, als Carpetplot und als Signatur (XY-Plot).

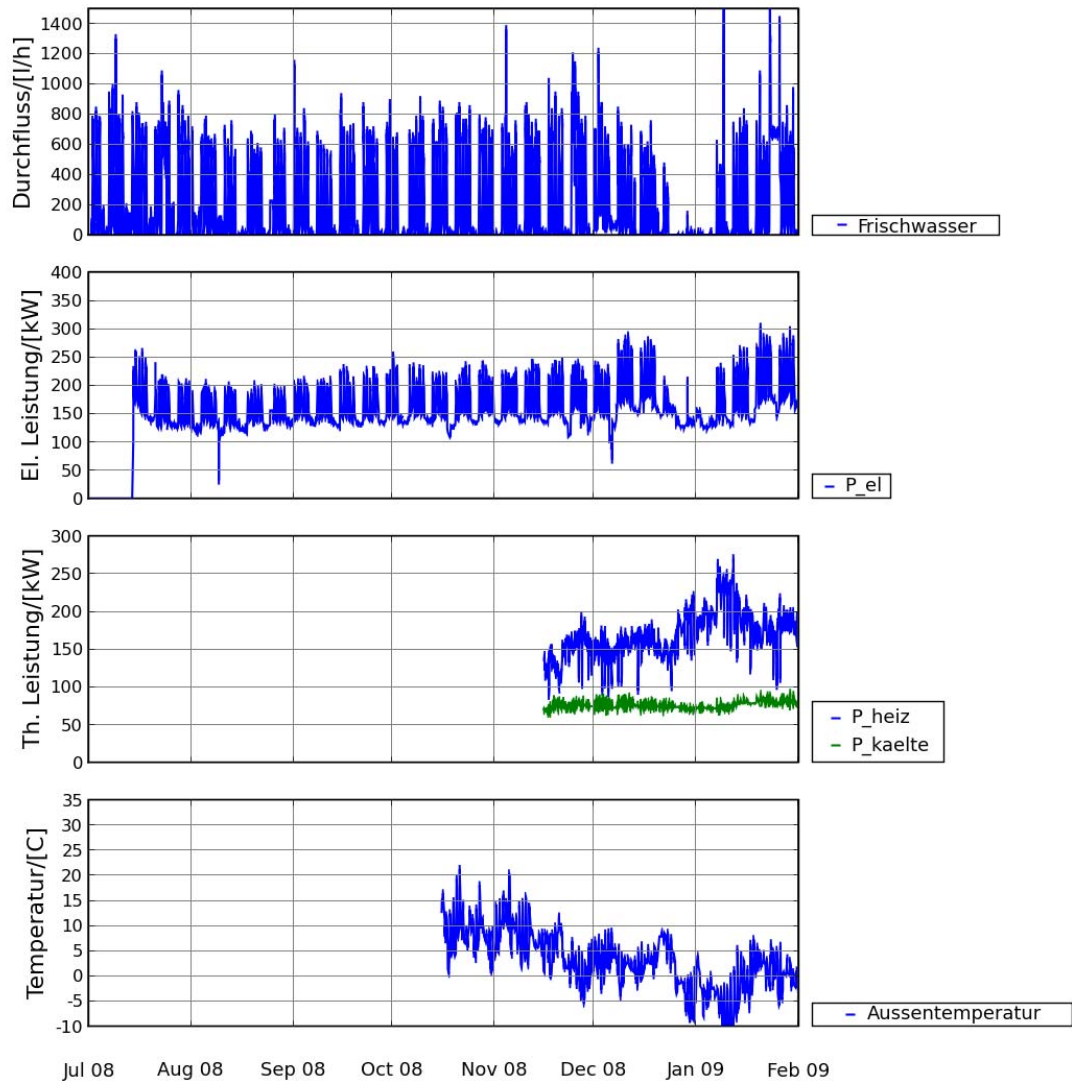


Abbildung 53 Zeitreihenplot des Energie- und Wasserverbrauchs von unten nach oben: Außentemperatur, Fernwärme und Fernkälte, Gesamtstromverbrauch, Kaltwasserverbrauch.

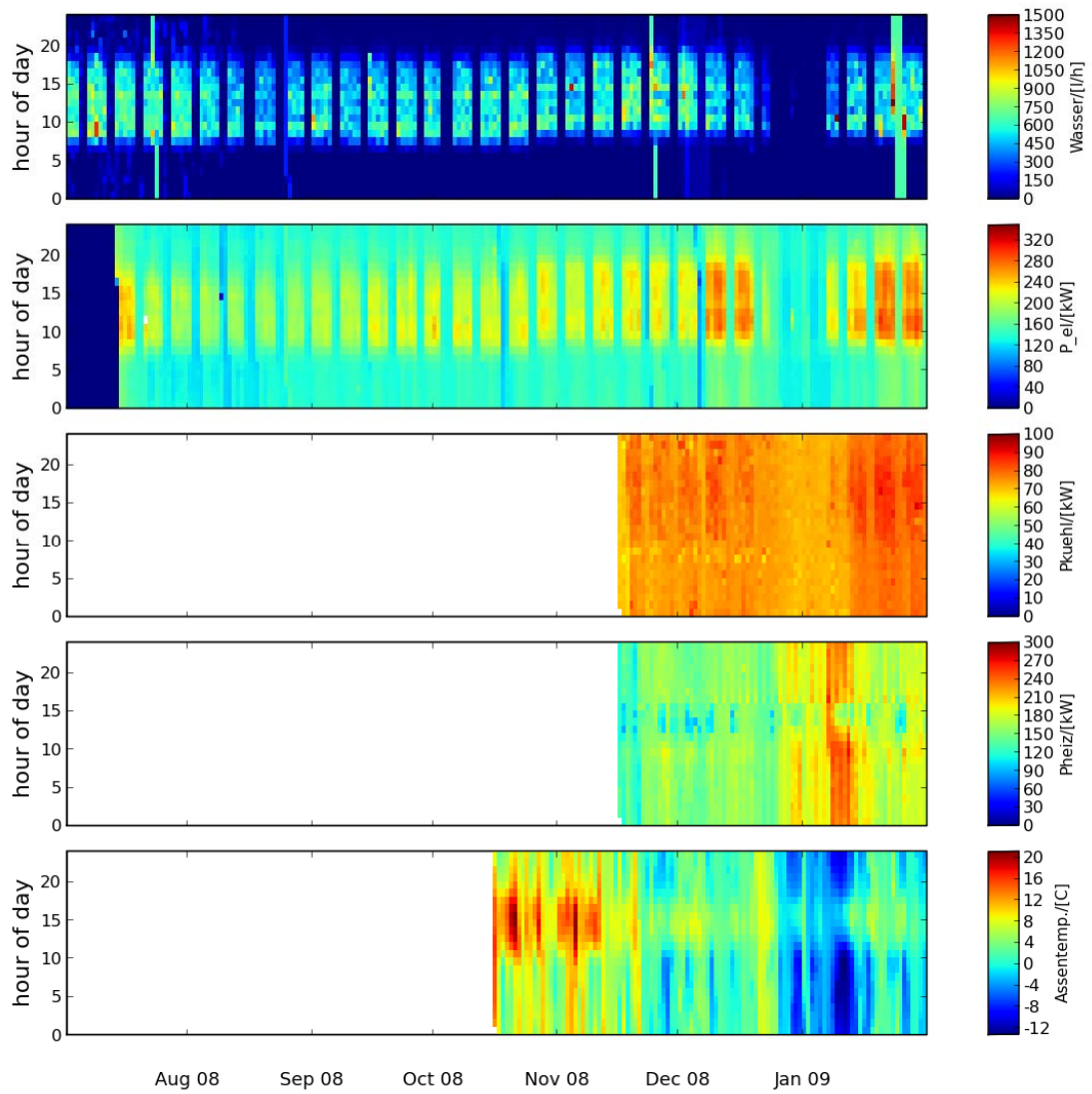


Abbildung 54 Carpetplot Energie- und Wasserverbrauch
 von unten nach oben: Außentemperatur, Fernwärme, Fernkälte,
 Gesamtstromverbrauch, Kaltwasserverbrauch.
 (Weiße Bereiche in der Grafik stellen fehlende Daten dar)

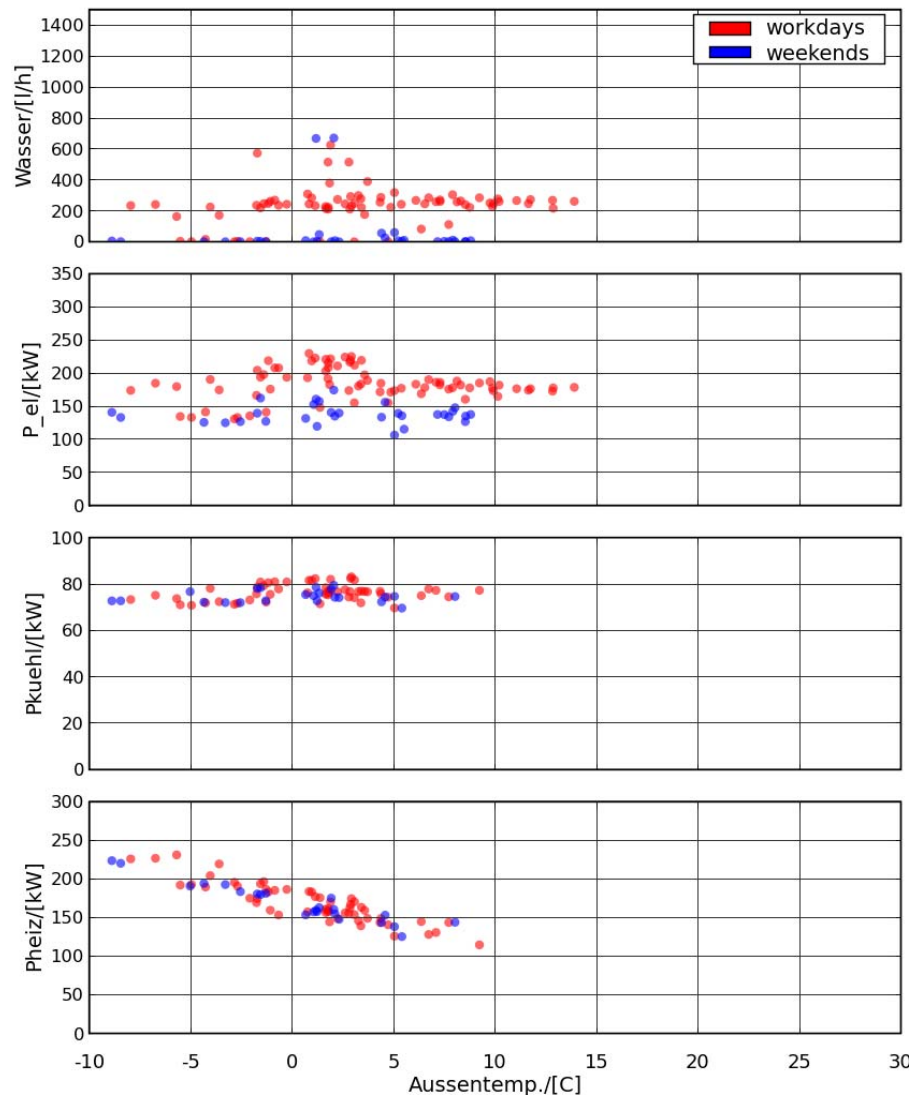


Abbildung 55 Signaturen des Energie- und Wasserverbrauchs (Tagesmittelwerte) gruppiert nach Werktagen und Wochenenden.
von unten nach oben: Fernwärme, Fernkälte, Gesamtstromverbrauch, Kaltwasserverbrauch.

Aus den Visualisierungen sind folgende Dinge zu erkennen:

- Strom- und Wasserverbrauch zeigen ein deutliches Wochenprofil der Nutzung des Gebäudes mit Kernzeiten an Werktagen von ca. 8:00-19:00 Uhr; Sa, So und Feiertage keine Nutzung, s. Abbildung 54). Dieses Profil weist auf eine gleichbleibende Nutzung hin. Allerdings ist beim Stromverbrauch eine deutliche Erhöhung des Verbrauchs ab Mitte Dezember zu erkennen, die mit der Inbetriebnahme von neuen Geräten zu begründen ist
Beim Wasserverbrauch sind einzelne Ausreißer erkennbar mit ganztägig hohem Wasserverbrauch, d.h. auch nachts. Als wahrscheinlichste Fehlerursache wurden blockierte Toilettenspülungen ausgemacht
- Heiz- und Kühllast zeigen kein Wochenprofil und werden offensichtlich durchgängig betrieben.

Bei der Heizlast ist der Nachtbetrieb nicht notwendig. Die Regelung wurde entsprechend umgestellt. Dadurch konnte Heizenergie sowie Antriebsenergie für die Pumpen eingespart werden.

- Die Grundlast für den Stromverbrauch liegt bei ca. 120 kW bzw. bei rund 15 W/m² Nettogrundfläche (Abbildung 55). Dies stellt für Bürogebäude, die üblicherweise um 5 W/m² liegen, einen außerordentlich hohen Wert dar, der mit dem Betrieb der Serverräume zu erläutern ist.
- Die hohe Grundlast erklärt auch die ganzjährig hohe Kühllast von 70-80 kW (ca. 10 W/m²) (Abbildung 55). Die fehlende Klimaabhängigkeit deutet ebenfalls darauf hin, dass die Kühlleistung vor allem für die hohen internen Lasten benötigt wird.
- Aus der Energiesignatur der Fernwärme ist ebenfalls der fehlende Absenkbetrieb an Wochenenden erkennbar (Abbildung 55). Aus den Messwerten kann eine Nennlast von ca. 260 kW extrapoliert werden.

8.6. FED mit Simulation bzw. Modellierung ausgewählter Subsysteme

8.6.1. Begründung für den Ansatz

Gebäude und deren Systeme sind vor allem im Nicht-Wohngebäudebereich sehr individuell. Es gibt kaum zwei gleiche Gebäude. Daher erfordert die Modellierung des Gesamtsystems heute einen hohen manuellen Aufwand. Seit ca. 20 Jahren wird versucht diesen manuellen Aufwand durch Automatisierung zu reduzieren, wobei keine praxistaugliche Lösung gefunden wurde. Es gibt einige Ansätze, wie BIM (Building Information Modelling von engl. Gebäudeinformationsmodelle) und IFC (Industry Foundation Classes), die erfolgversprechend weiterentwickelt werden, die auch im Bereich der Konstruktion als auch der Simulation bereits Anwendung finden, aber noch kein wirklich funktionierendes und vielfach verwendetes Gesamtsystem darstellen. Mit solchen Ansätzen können auch Probleme, wie die zeitliche und organisationsübergreifende Datenkonsistenz adressiert und verbessert oder gelöst werden.

Im Bereich der Fehlererkennung und Diagnose FED, besteht die Hoffnung, dass durch eine Einschränkung auf bestimmte, gut isolierbare, häufig vorkommende Untersysteme der manuelle Modellierungsaufwand sehr stark reduziert werden kann. Mit Blick auf die in der Gebäudeautomation (GA) heute übliche Darstellung der Systeme erscheinen automatische Modellgenerierungen in gewissem Umfang heute schon denkbar, bei denen dann nur noch wenige Parameter abgefragt werden müssen. Allerdings fehlen den heutigen GA-Systemen noch viele Meta-Informationen, die für die Gebäudemodellierung wichtig sind, wie z.B. geometrische Informationen, Nutzerinformationen, aber auch verschiedene Systeme, die in den gleichen Zonen wirksam sind. Hier könnten BIM ergänzende Informationen liefern.

Mit Modellen der Subsysteme, wird bei diesem Ansatz versucht, Abweichungen zwischen tatsächlichem und erwartetem (modelliertem) Verhalten als Indikation für Fehler verwenden zu können. Falls die Modelle sogar in der Lage sind, Fehler zu modellieren, so ist u.U. sogar eine Eingrenzung und Identifizierung möglich.

Um diesen Ansatz im Rahmen von ModBen zu untersuchen, wurde zunächst eine Auswahl der Untersysteme nach Häufigkeit und (energetischer) Relevanz vorgenommen. Dabei ergab sich bei der Auswertung aller Demonstrationsgebäude, dass alle Demogebäude Heizkreise enthalten und bei fast allen Demogebäuden es zu

niedrige Spreizungen in den Heizkreisen gab. D.h. aufgrund der Häufigkeit und der häufigen Fehler erschienen Heizkreise sehr interessant. Allerdings erscheint das Energieeinsparpotential gering wenn lediglich die Spreizung erhöht werden kann. Aufgrund der großen Häufigkeit und großen Ähnlichkeit von Heizkreisen erschien es trotzdem interessant an diesem Subsystem diesen Ansatz zu testen

Die Frage, Hypothese oder der Fehler, der im Rahmen dieses Beispiels geklärt werden soll, kann folgendermaßen in Worte gefasst werden: „Sind die gemessenen Spreizungen fehlerhaft oder nicht?“

Zum Beantworten dieser Frage sind sowohl Simulationsprogramme, als auch einfache Berechnungen geeignet. Damit die Frage beantwortet werden kann, muss jedoch sowohl die Gebäudeseite, als auch die Hydraulik modelliert werden können. Die folgende Tabelle gibt einen Überblick über die hier relevanten Modellierungsfähigkeiten verschiedener Simulationsprogramme:

➤ Heizkreise: Vergleich Simulationsprogramme:

	IDA-ICE	TRNSYS	ESP-R	EnergPlus	Matlab Simulink	Dymola Modelica
Heizung / Kühlung						
Ganzjahressimulationen	x	x	x	x	(x)	x
Ganzes Gebäude	x	x	x	x	(x)	(x) keine validierten Modelle
Fehler sollten modellierbar sein	(x) z.T. noch keine Modelle	(x) nicht bei Standard Bib.	(-?)	(-)	x	(x) z.T. noch keine Modelle
Druckverluste und Masseflüsse modellierbar	x	(x)	(?)	(?)	x	(x)
Flussrichtung reversibel	(x) noch keine Modelle	(-)	(-)	(-)	(x)	(x)

- x** vorhanden / gut möglich
- (x)** teilweise vorhanden / ohne programmieren ergänzbar
- (-)** nur durch programmieren ergänzbar
- ?** nicht gesicherte Aussage

Die Tabelle zeigt, dass kein Simulationstool alle Anforderungen ohne zusätzlichen Aufwand erfüllen kann. Im Projektkontext wurde entschieden, IDA-ICE und einfache Berechnungen zu verwenden.

8.6.2. Beschreibung

Es handelt sich um ein nicht-lineares Problem, u. a. wegen des exponentiellen Zusammenhangs zwischen Systemtemperatur und Leistung eines Heizkörpers. Die Randbedingungen sind in der Praxis nicht exakt messbar; dazu müsste man die Heizlast für jeden einzelnen Heizkörper in einem Heizkreis genau ermitteln. Darüber hinaus besteht ein starker Nutzereinfluss über:

- Luftwechsel
- Wärmequellen (interne, solare)
- Thermostateinstellungen

und zusätzlich bestehen folgende u. U. bedeutende Einflüsse:

- Klima
- Dynamik (Vergangenheit spielt eine Rolle)

An dieser Stelle werden vor allem die einfachen Berechnungen beschrieben, da sie schon heute mit einem im Vergleich zu vollständigen Gebäudesimulationsprogrammen relativ geringerem Aufwand in die GA oder Energie-Management-Systeme (EMS) integriert werden könnten.

Um die Berechnungen so einfach wie möglich zu machen, wurden die folgenden Größen als Eingangsgrößen (zeitliche veränderlich) verwendet:

- Heizlast
(gesamt im Mindestdatensatz enthalten, Aufteilung auf Heizkreise z.B. mit Pumpensignalen und Auslegungsdaten möglich)
- Vorlauftemperatur

Alle Gleichungen wurden entsprechend umgestellt und geschachtelt. Als Parameter (zeitlich konstant) werden dann benötigt:

- Auslegungsdaten Heizkreis gesamt:
- Auslegungsleistung,
- Auslegungsvorlauftemperatur, Auslegungsrücklauftemperatur,
- Auslegungsraumtemperatur,
- Gesamtheizkörperexponent,
- die Anzahl der Heizkörper bzw. evtl. diese Angaben für alle Heizkörper des Heizkreises individuell.

Da Leistungsaufteilung der Gesamtleistung auf die einzelnen Heizkörper unbekannt ist, muss diese durch eine Monte-Carlo Simulation, d.h. mit Annahme über Leistungsverteilung (z.B. Normalverteilung) in einer stochastischen Art und Weise erfolgen. Mit der Heizlast bzw. Heizleistung und der Vorlauftemperatur an jedem Heizkörper, kann dann mit der Heizkörpergleichung die Rücklauftemperatur und der Massefluss an jedem Heizkörper ausgerechnet werden. Unter diesen Bedingungen ist es allerdings nicht möglich die vereinfachte Form der Heizkörpergleichung zu verwenden; man muss mit der logarithmischen Übertemperatur arbeiten.

$$\dot{Q} = \dot{Q}_{Nenn} \cdot \left(\frac{\frac{\theta_{VL,1} - \theta_{RL,1}}{\ln\left(\frac{\theta_{VL,1} - \theta_{Raum,1}}{\theta_{RL,1} - \theta_{Raum,1}}\right)}}{\frac{\theta_{VL,Nenn} - \theta_{RL,Nenn}}{\ln\left(\frac{\theta_{VL,Nenn} - \theta_{Raum,Nenn}}{\theta_{RL,Nenn} - \theta_{Raum,Nenn}}\right)}} \right)^n = \dot{Q}_{Nenn} \cdot \frac{\dot{m}_1}{\dot{m}_{Nenn}} \cdot \frac{\theta_{VL,1} - \theta_{RL,1}}{\theta_{VL,Nenn} - \theta_{RL,Nenn}}$$

Da in diesem Fall keine geschlossen algebraische Lösung möglich ist, muss ein Lösungsalgorithmus verwendet werden. Aus den individuellen Rücklauftemperaturen und Masseflüssen wird dann die Gesamt-rücklauftemperatur der einzelnen Elemente der Monte-Carlo-Simulation berechnet. Damit ergeben sich dann die Verteilung und der Erwartungswert für die Gesamt-rücklauftemperatur.

8.6.3. Implementierung

Diese Methoden wurden in R⁴¹ implementiert. Um die Rücklaufemperatur aus der Vorlaufemperatur, der Leistung und den Heizkörperdaten mit der Heizkörpergleichung auszurechnen, wurde die Funktion `uniroot` aus R zum Finden der Lösung verwendet. Diese Funktion basiert auf einem Goldenen-Schnitt-Suchalgorithmus.

Für das Demonstrationsgebäude Großpösna wurden mit diesen Methoden Nomogramme für den kompletten Heizkreis erstellt (siehe Abbildung 56). An der x-Achse ist jeweils die Heizlast bzw. Heizleistung aufgetragen, an den Kurven die verschiedenen Vorlauftemperaturen, so dass auf der y-Achse Massefluss und Rücklaufemperatur abgelesen werden können. An diesen Nomogrammen ist der nichtlineare Charakter gut erkennbar und daraus kann noch einmal geschlossen werden, dass hier die vereinfachte Heizkörpergleichung (d.h. ohne logarithmische Übertemperatur, und damit wesentlich einfacher lösbar) nicht verwendet werden darf!

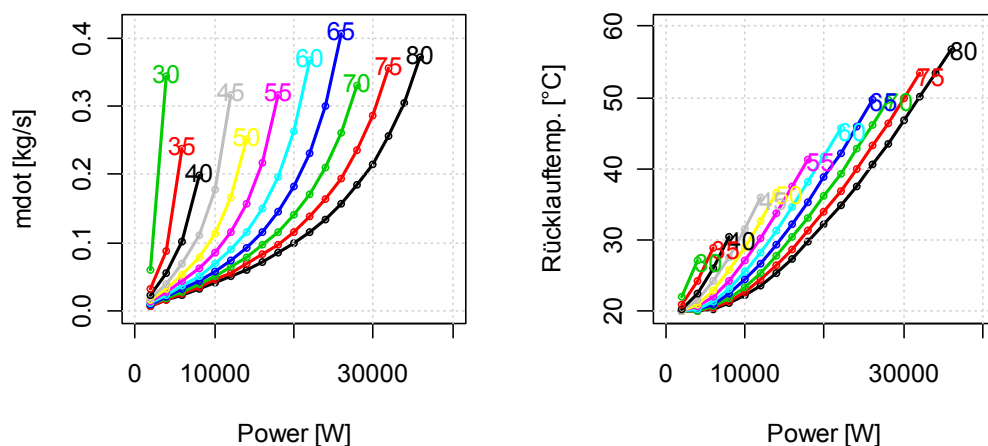


Abbildung 56 Nomogramme der Invertierten Heizkörpergleichung für den Gesamtheizkreis am Demonstrationsgebäude Großpösna

8.6.4. Beispiel / Evaluation in Demonstrationsgebäude

Für das Demonstrationsgebäude in Großpösna wurde die komplette Methode angewendet. Die gemessene Gesamtleistung wurde gemäß den Monte-Carlo-Samples auf alle Heizkörper verteilt. In Abbildung 57 ist für einen bestimmten Heizkörper die Verteilung der Heizleistung dargestellt. Damit die Gesamtheizleistung in der Monte-Carlo-Simulation mit der gemessenen Gesamtheizleistung übereinstimmt, verliert man einen Freiheitsgrad, d.h. es können nur $n-1$ Zufallsvariablen mit der Monte-Carlo-Simulation festgelegt werden, wenn n die

⁴¹ R Development Core Team (2008). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. ISBN 3-900051-07-0, URL <http://www.R-project.org>.

Anzahl der Heizkörper ist. Bei unserer Implementierung wurden jedoch n unabhängige Zufallsvariablen erzeugt, die dann mit der Gesamtleistung normiert wurden, so dass dadurch eine Abhängigkeit erzeugt wurde, die auf $n-1$ unabhängige Variablen hinausläuft, aber wesentlich einfacher normierbar ist.

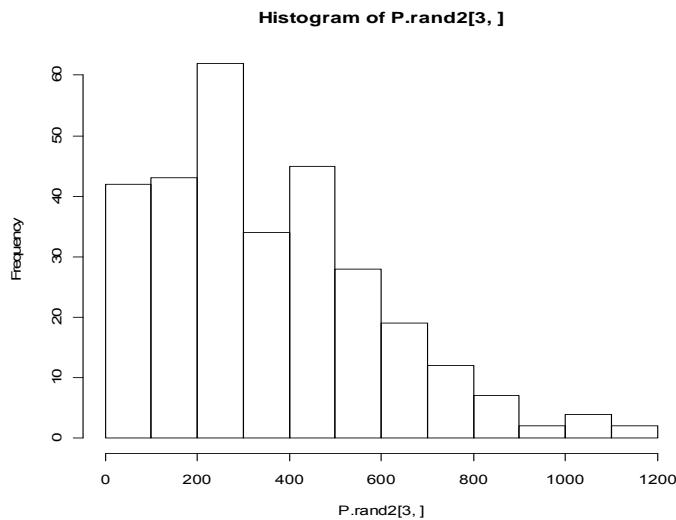


Abbildung 57 Häufigkeitsverteilung der Heizleistung von Heizkörper Nr. 3 in der Monte-Carlo-Stichprobe ($n = 300$)

Damit ergibt sich dann einen Häufigkeitsverteilung der Rücklauftemperatur aus der Monte-Carlo-Simulation (siehe Abbildung 58). Dieses Verfahren kann dann zu verschiedenen (Mess-) Zeitpunkten durchgeführt werden. Der Erwartungswert der Verteilung kann mit den Messwerten verglichen werden.

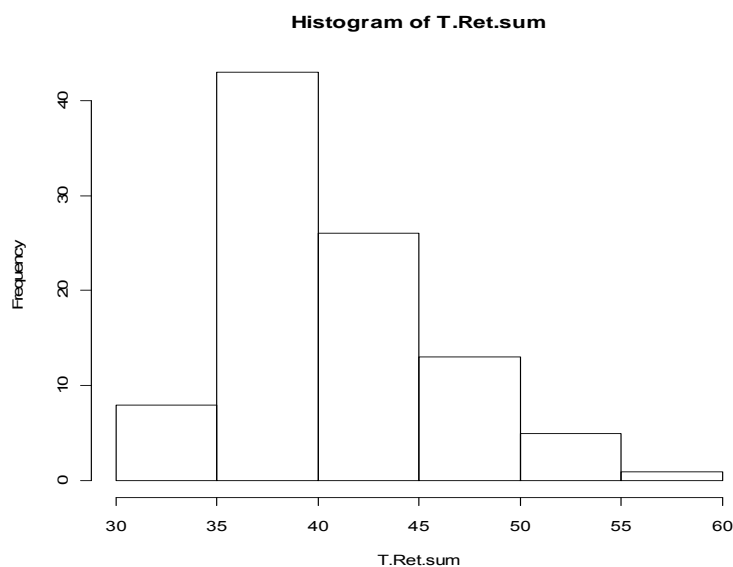


Abbildung 58 Häufigkeitsverteilung der berechneten Rücklauftemperatur aus der Monte-Carlo-Simulation ($n = 300$) zu einem bestimmten Zeitpunkt

Um den Einfluss der Dynamik in den Messwerten zu reduzieren, sollte über eine gewisse Zeitspanne (im Beispiel eine Stunde) gemittelt werden, da sie in den Berechnungen vernachlässigt wurde. Dynamische Effekte in diesem Beispiel rühren von den Wärmekapazitäten im Heizungssystem und den Wasserlaufzeiten im System her. Aufgrund der teilweise starken Nicht-Linearität sind jedoch auch zu lange Mittelungszeiträume zu vermeiden.

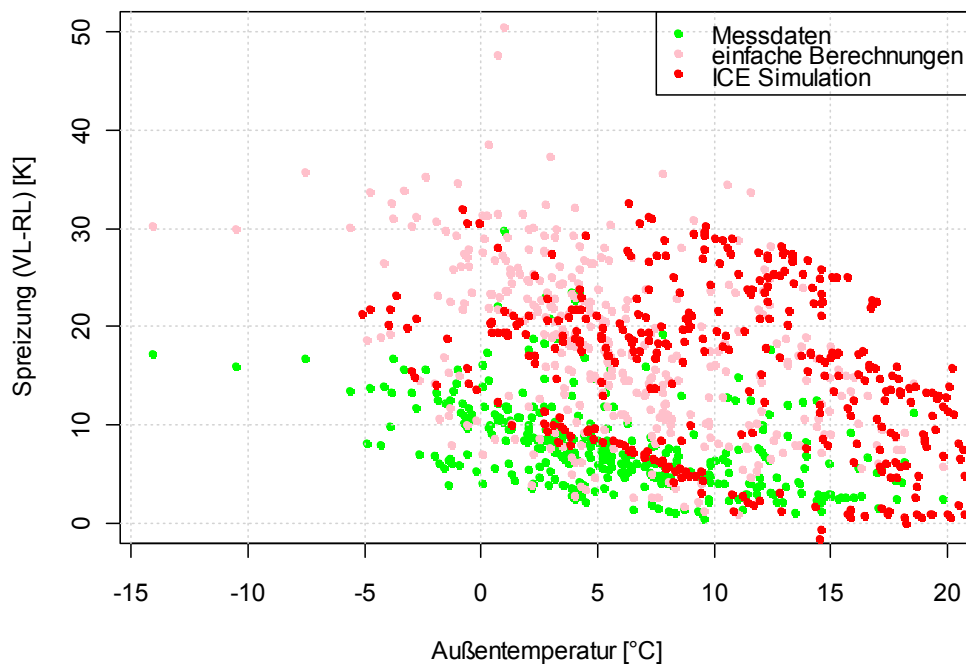


Abbildung 59 Signaturen der gemessenen Spreizung und der berechneten Spreizungen sowohl mit den einfachen Berechnungen als auch mit IDA-ICE Gebäudesimulationen

In Abbildung 59 ist ein Vergleich der Messwerte mit den hier dargestellten einfachen Berechnungen sowie detaillierten IDA-ICE Simulationen (Gebäude und Anlage gekoppelt) dargestellt. Für die detaillierten Simulationen war ein wesentlich höherer manueller Aufwand erforderlich, sie wurden auch für andere Aufgabenstellungen im Rahmen von ModBen verwendet und waren sowieso vorhanden. Beide Berechnungsmethoden zeigen, dass wesentlich höhere Spreizungen zu erwarten sind. Daraus wird geschlossen, dass hier ein Fehler im Heizkreis vorhanden ist.

Fazit: Die einfachen Berechnungen können Fehler bei einem relativ geringem manuellen Modellierungsaufwand erkennen, aber es sind stochastische Methoden notwendig. Das ist ein interessanter Ansatz, bei dem weitere Entwicklungen lohnend erscheinen. Erste Umsetzungen in der Praxis sind denkbar.

Mit detaillierteren IDA-ICE-Simulationen konnte gezeigt werden, dass der Fehler sehr wahrscheinlich von nicht abgeglichenen Rücklaufverschraubungen der WC-Heizkörper herrührt, wobei die WC-Fenster immer oder immer während der Anwesenheit von Nutzern gekippt sind. Eine grobe Abschätzung des Einsparpotentials eines hydraulischen Abgleichs, wodurch geringere thermische Verluste im Rücklauf und u. U. Einsparungen bei der Pumpenenergie möglich sind,

hat jedoch beim betroffenen Gebäude sehr geringe Beträge (im Bereich von 10 EUR/a) ergeben. Deshalb wurde von Seiten des Gebäudebesitzers von der Durchführung eines hydraulischen Abgleichs abgesehen.

8.7. Stufe 3a - FED auf Ebene Gesamtgebäude mit probabilistischen Methoden

8.7.1. Begründung für den Ansatz

Die Motivation zur Verwendung der probabilistischen Methode der Bayes'schen Inferenz ist ihre Allgemeingültigkeit. Bei der Durchführung einer Energiediagnose für ein Gebäude wird nach der Bestimmung des energieeffizientesten Betriebs des Gebäudes und seiner Systeme gestrebt. Da nicht immer die Möglichkeit besteht, Messwerte für jeden Prozess in einem Gebäude zu erfassen, ist es notwendig Rückschlüsse, die auf verfügbare Daten basieren, zu ziehen. Zum Beispiel, wenn der Brenner eines Gaskessels eine Störung hat kann eine Fehlerdiagnose mit der Auswertung der Heizwasservor- und Rücklauftemperaturen und deren Abhängigkeit von dem Gasverbrauch ermöglicht werden. Die Messungen werden auf einer höheren Ebene im Gebäude erfasst, da der nur Kessel einen Teil des hydraulischen Systems darstellt. Mit Bayes'scher Inferenz können solche Fragestellungen in Form von Wahrscheinlichkeiten beantwortet werden: „0“ entspricht einer totalen Unsicherheit und „1“ einer totalen Sicherheit. Wenn irreguläre Temperaturen gemessen werden kann die Frage, ob der Kesselbetrieb fehlerhaft ist wie folgt beantwortet werden: „unter Berücksichtigung der Temperaturschwankungen gibt es eine Wahrscheinlichkeit von 85 %, dass der Kesselbetrieb fehlerbehaftet ist.“

Die gestellten Fragen werden in Abhängigkeit einer Wissensdatenbank beantwortet. Möglicherweise sind keine Messdaten des Gasverbrauchs, der Kesselvor- und Rücklauftemperaturen und der Brenneffizienz vorhanden. In diesem Fall ist die oben erwähnte Inferenz nicht anwendbar. In einem solchen Fall ist die modellbasierte Betrachtungsweise von großer Bedeutung, da sie den normalen und fehlerhaften Kesselbetrieb modelliert. Die Simulationsergebnisse können dann zusammen mit den Messdaten genutzt werden, um die wahrscheinlichste Ursache für das Vorkommen der Messdaten, die auf einen fehlerhaften Betrieb hindeuten, zu bestimmen. Der modellbasierte Ansatz kann verwendet werden, um den normalen Betrieb und auch einen möglichen fehlerhaften Betrieb zu simulieren. Die Datenbank, in der alle Möglichkeiten gespeichert werden, wird verwendet, um die wahrscheinlichste Ursache für die gemessenen Werte des realen Betriebs zu erklären.

Anders erklärt: möglicherweise ist der einzige verfügbare Messwert die Energierechnung für den Monat Februar. Dann stellt sich die Frage, ob der Heizwärmeverbrauch höher oder niedriger als ein „normaler“ Wert ist. Die Antwort kann sich aus dem Vergleich der relativen Verbräuche der Monate Januar und März (Daten nicht vorhanden) ableiten lassen oder aus Verbrauchsdaten eines ähnlichen Gebäudes für den Monat Februar (Daten nicht vorhanden). Eine Reihe von Vergleichen ist denkbar, aber sie scheitert daran, dass nur eine Energierechnung für den Monat Februar vorhanden ist. Die zentrale Frage lautet: Wie hoch ist die Wahrscheinlichkeit, dass der Heizwärmeverbrauch zu hoch oder zu niedrig ist? Die Verwendung des modellbasierten Ansatzes alle Möglichkeiten ermöglicht es verschiedene Szenarien abzubilden und den jeweiligen Einfluss auf den Energieverbrauch zu analysieren. Aus den Ergebnissen kann dann geschlossen werden, was die wahrscheinlichste Erklärung für die gemessenen Daten darstellt.

Bei der Fehlererkennung und -Diagnose geht es darum, den Betriebszustand eines betrachteten Gebäudes zu jeder Zeit zu bestimmen. Mit der Quantifizierung des Betriebszustands kann ausgesagt werden, ob dieser völlig unakzeptabel, viel besser als erwartet oder irgendeinem Wert zwischen diesen beiden Grenzen annimmt. Der energetische Betrieb eines Gebäudes wird durch zahlreiche komplexe energetische Prozesse, nichtlineare Zusammenhänge und stochastische Elemente beeinflusst, die die Diagnose der energetischen Effizienz zu einer hoch komplexen Aufgabe machen. Die Forschungsarbeiten in dem Bereich der Bayes'schen Inferenz sind relativ neu und entsprechende Messdaten sind oft nur begrenzt verfügbar, was die empirische Analyse und Anwendung des Ansatzes bislang unmöglich macht. Ein genereller und globaler Ansatz zur Fehlererkennung und Diagnose erfordert nicht nur mehr Daten sondern auch a priori Wissen (engl. prior knowledge).

A priori Wissen ist definiert als der mathematische Ausdruck festgesetzter Tatsachen und aller Unsicherheit, die nötig sind, um a priori gültigen Informationen zu integrieren. Zum Beispiel könnte man wissen dass der Wirkungsgrad eines Kessels genau 85% beträgt oder man könnte leicht unsicher sein und glauben, dass der Wirkungsgrad in einem Bereich von $85 \pm 5\%$ liegt. Jede Behauptung über den Grad der persönlichen Überzeugung (engl. degree of belief) für das betrachtete Problem hilft bei der Lösung des Problems. Es ist sehr wichtig, dass keine falsche oder irreführende Information berücksichtigt wird. Da der Zweck von ModBen die energetische Diagnose von Gebäuden und deren Subsystemen ist, besteht die Möglichkeit diese Kenntnisse mittels Messungen oder veröffentlichte Daten zu gewinnen. Man kann z.B. über den Wert des Kesselwirkungsgrades völlig unsicher sein, weiß aber, dass dieser Wert weder 0% oder 100% beträgt. Das ist eine Art des Ausdrucks von dem Grad der persönlichen Überzeugung und man weiß, dass sich der reale Wirkungsgrad zwischen diesen beiden Grenzwerten bewegt. In diesem Abschnitt wird eine Strategie benutzt, die empirische Daten verwendet, um die wahrscheinlichsten Parameter (z.B. Kesselwirkungsgrad) und deren zeitabhängige Varianz für den Normalbetrieb zu bestimmen. Weiterhin kann dadurch analysiert werden, ob es sich um eine fehlerhafte Abweichungen zum Normalbetrieb handelt.

Eine reine empirische Analyse würde ausschließlich auf Messdaten basieren und keine Beziehung zwischen den unterschiedlichen Gebäudeenergiesystemen berücksichtigen. Weiterhin würde sie den Grad der persönlichen Überzeugung unberücksichtigt lassen. Diese Methode einer Gebäudeenergiediagnose ist möglich, würde aber eine unendliche Kombination von Systemen benötigen, um das Problem zu lösen. Um FED in einem Gebäude zu implementieren, wäre eine Datenbank mit Messdaten für alle möglichen Anlagenkombinationen und die Fähigkeit die Messungen aus einem Gebäude dieser Datenbank zu vergleichen notwendig. Das Ergebnis gibt an, ob in dem untersuchten Gebäude ein fehlerhafter oder ein normaler Betrieb vorliegt. Dieser Ansatz ist leider für Gebäudeenergiediagnosen nicht anwendbar, da eine solche Datenbank nicht erstellt werden kann und alle vorhandenen Forschungsarbeiten im Bereich der Gebäudeenergiesysteme und der Fehlererkennung und Diagnose vernachlässigen würde.

Der naheliegendere und klarere Weg für eine Gebäudeenergiediagnose erfolgt mittels eines Gebäudeenergiemodells, welches alle vorhandenen Kenntnisse berücksichtigt. Das Model wird in Simulationen benutzt, um den energetischen Gebäudebetrieb vorauszusagen. Messungen können mit Ergebnissen aus dem Gebäudemodel

verglichen werden, um zu untersuchen, ob das Gebäude wie geplant und erwartet betrieben wird oder ob es Fehler enthält. Dieser Ansatz ist dadurch begrenzt, dass er nicht systematisch implementiert werden kann und es keine direkte Herangehensweise gibt, um die Unsicherheiten, die mit jeder Annahme verbunden sind, zu quantifizieren.

In diesem Absatz wird eine Strategie untersucht, bei der beide modell- und messwertbasierte Betrachtungsweisen in einer systematischen Art und Weise mit einer expliziten Quantifizierung von Unsicherheiten kombiniert werden. Somit kann die Abweichung zwischen Messwerten und modellbasierter Vorhersage beobachtet werden. In der Tat sind fast alle physikalische Effekte des Modells richtig beschrieben, sodass angenommen werden kann, dass die energetischen Vorgänge genau dargestellt werden. Dennoch sollten einige Annahmen als unsicher betrachtet werden. Zum Beispiel ist bekannt, dass der gemessene Wirkungsgrad eines neu installierten Kessels 85 % beträgt. Folgende Fragen können dann gestellt werden: Kann nach Inbetriebnahme und während der gesamten Lebensdauer des Kessels, aus Messungen gefolgert werden, ob der Wirkungsgrad mit dem Originalwert immer noch übereinstimmt? Ist der Kesselbetrieb mit Fehlern behaftet, weil aus den Daten der Rückschluss gezogen werden kann, dass sein Wirkungsgrad nun nur 50% beträgt? Das Ziel ist Messwerte in einem modellbasierten Ansatz zu verwenden, um rückschließen zu können, was die wahrscheinlichste Erklärung für die Messwerte darstellt (Fehlerdiagnose). Dieser Ansatz kann als hybrid benannt werden, da er sich weder aus rein empirischen noch rein deterministischen Methoden bedient.

Die probabilistische Theorie ist eine eindeutige Herangehensweise, um mit Unsicherheiten umzugehen. Jedoch ist der traditionelle frequentistische Wahrscheinlichkeitsbegriff, welcher die langfristige relative Häufigkeit von Ereignissen berücksichtigt, aufgrund von zwei Hauptschwächen in realen, komplexen Gebäudeenergiesystemen nur begrenzt anzuwenden: (1) Messungen aus Gebäuden stammen nie aus dem gleichen stationären Betrieb mit kontrollierten Randbedingungen und (2) die funktionale Beziehung zwischen den Messungen verlangt geeignete statistische Kenngröße, um die Wahrscheinlichkeit eines Ereignisses zu bestimmen. Der Bayes'sche Wahrscheinlichkeitsbegriff stellt eine schlüssige Alternative dar, die sich direkt aus der axiomatischen Mengenlehre herleitet und daher auf einer rein logischen und mathematischen Herangehensweise basiert, um Unsicherheiten zu quantifizieren. Die statistischen Methoden werden einmalig definiert und die Bayes'sche Wahrscheinlichkeitstheorie bietet eine optimale Lösung zu Inferenzproblemen. Der Bayes'sche Wahrscheinlichkeitsbegriff ist älter als der frequentistische Wahrscheinlichkeitsbegriff. Moderne Rechner ermöglichen erst heute die Anwendung Bayes'scher Statistik. Parameterschätzungen und Modellvergleiche sind die Schlüsselanwendungen für die Durchführung einer modellbasierten Fehlererkennung und Diagnose. Im Folgenden werden diese beiden Anwendungen anhand einfacher Beispiele erläutert.

8.7.2. Beschreibung

Gebäudeenergiemodelle werden mittels Parametern beschrieben. In einem Gebäudeenergiemodell könnten die Parameter, z.B. den Kesselwirkungsgrad, die Größe einer PV-Anlage, eine Außenwandstärke oder die Lüftungsrate beschreiben. Viele dieser Parameter sind mit einer gewissen Unsicherheit behaftet. Mit Bayes'scher

Inferenz werden Unsicherheiten in diesen Parametern berücksichtigt und es wird durch tausende Simulationen eine Datenbank erzeugt, die dazu verwendet werden kann, die Messdaten bezüglich des Gebäudebetriebs auf Fehler zu untersuchen. In Folgendem Abschnitt wird erläutert, wie das Bayestheorem hergeleitet wird und wie es auf die beschriebene Fragestellung angewendet werden kann.

- Die zwei Äste der Wahrscheinlichkeitstheorie

Die bekannteste Definition der Wahrscheinlichkeitstheorie ist der frequentistische Wahrscheinlichkeitsbegriff. Er wird definiert als die langfristige relative Häufigkeit, mit welcher ein Ereignis auftritt. Das Auftreten eines Ereignisses kann entweder durch eine Sequenz von identisch wiederholten Versuchen oder als Ausgangsgröße aus identischen Systemen stattfinden. Der frequentistische Wahrscheinlichkeitsbegriff wird auch als „klassische“ Sicht bezeichnet. Statistische Methoden basierend auf dem frequentistischen Wahrscheinlichkeitsbegriff sind derzeit besonders im Bereich der Gebäudeforschung am häufigsten verbreitet. Im Gegensatz dazu ist die Bayes'sche Wahrscheinlichkeitstheorie auf eine allgemeinere Definition der Wahrscheinlichkeit gegründet, und damit allgemein anwendbar. Der Grund dafür ist, dass es in Gebäuden nie eine Folge von identisch wiederholten Versuchen oder identische Gebäudetechniksysteme gibt. Die Dynamik, die mit dem Betrieb eines Gebäudes verbunden ist, erlaubt die Verwendung von frequentistischen Statistiken nur in einer begrenzten Anzahl von Fällen.

Aus der Sicht der Bayes'sche Wahrscheinlichkeitstheorie ist die Wahrscheinlichkeit ein als reelle Zahl bewertetes Maß für die Plausibilität einer Aussage, wenn aufgrund unvollständigen Wissens die von Wahrheit oder Falschheit nicht mit Sicherheit festgestellt werden kann. Die Skala wird so geteilt, dass „0“ mit einer absoluten Sicherheit einen falschen Wert und „1“ einen richtigen Wert bedeuten. Die Bayes'sche Wahrscheinlichkeitstheorie ist intuitiver. Im Rahmen dieser Forschungsarbeit liegen keine Sequenzen identisch wiederholter Versuche vor, da ein Gebäude aufgrund der wechselnden Klimabedingungen und Nutzereinflüsse ständig unterschiedlich betrieben wird. Aus diesen Gründen ist die Bayes'sche Wahrscheinlichkeitstheorie für Fehlererkennung und Diagnose in Gebäude am geeignetsten.

- Herleitung des Bayestheorems

Das Bayestheorem kann aus den bekannten Axiomen von Bernoulli und Laplace abgeleitet werden. Die Summenregel legt fest, dass die Summe der Wahrscheinlichkeit, dass ein Ereignis falsch oder wahr ist, gleich eins sein muss. Ein Ereignis befindet sich in der Menge „Z“. Wie hoch ist die Wahrscheinlichkeit, dass dieses Ereignis in der Menge „X“ oder der Menge „Y“, enthalten ist, wenn „X“ und „Y“ Untermengen von „Z“ sind?

Die Summenregel lautet:

$$p(\bar{X}|Z) + p(X|Z) = 1$$

Gleichung 1

Der waagerechte Strich stellt die Negation der Aussage dar. Der vertikale Strich kennzeichnet eine bedingte Wahrscheinlichkeit.

Die Produktregel ist ebenfalls hilfreich. Sie beschreibt die Beziehung zwischen Mengen als Untermengen voneinander. Zum Beispiel: Wie hoch ist die

Wahrscheinlichkeit, dass ein Ereignis in „X“ existiert, wenn bekannt ist, dass das Ereignis eine Untermenge von in „Z“ ist?

$$p(XY|Z) = p(X|YZ)p(Y|Z)$$

Gleichung 2

Alle Beziehungen zwischen den Wahrscheinlichkeiten können aus diesen beiden Gleichungen abgeleitet werden. Zum Beispiel, die Wahrscheinlichkeit, dass ein Ereignis in „X“ oder in „Y“ existiert, wenn bekannt ist, dass das Ereignis eine Untermenge von in „Z“ ist, kann wie folgt berechnet werden:

$$p(X + Y|Z) = p(X|Z) + p(Y|Z) - p(XY|Z)$$

Gleichung 3

Es sollte nicht vergessen werden, dass die Argumente für ein Wahrscheinlichkeitssymbol Aussagen und keine Zahlen sind. Darüber hinaus sind die Operationen in den Klammern logische Operationen: das logische „UND“ ist die Multiplizierung der Wahrscheinlichkeiten und wird mit nebeneinander gestellten Behauptungen dargestellt. Das logische „ODER“ ist die Summe der Wahrscheinlichkeiten und wird mit dem Symbol „+“ dargestellt.

Zur Ableitung Bayes Theorem erkennen wir, dass XY und YX gleich sind. Aus obigen Gleichungen ergibt sich:

$$p(X|YZ) = \frac{p(X|Z)p(Y|XZ)}{p(Y|Z)}$$

Gleichung 4

Das Bayestheorem wird in der Abbildung 60 dargestellt:

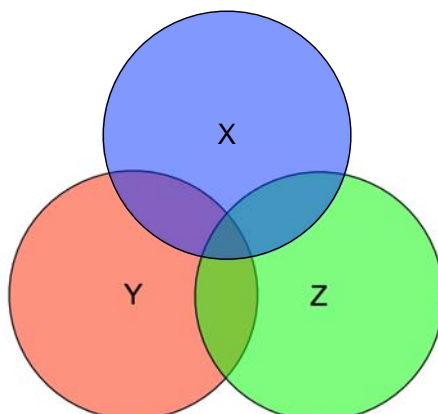


Abbildung 60: Herleitung des Bayestheorems

Das Theorem wird verwendet, um Hypothesen zu testen. Um die Methode zu erklären, nehmen wir an, dass $X=H$ (Hypothese, die getestet werden soll) ist. $Y=D$ und stellt Daten dar, die zum Testen der Hypothese herangezogen werden. Weiterhin ist $Z=K$, was das Wissen bezüglich des Zusammenhangs zwischen H und D darstellt. Das Bayestheorem kann nun wie folgt dargestellt werden:

$$p(H|DK) = \frac{p(H|K) \cdot p(D|HK)}{p(D|K)}$$

Gleichung 5

Dies ermöglicht die kontinuierliche Prüfung der Plausibilität bezüglich der Kenntnisse, sobald neue Daten zur Verfügung stehen. Dies stellt eine Art des „Lernens“ dar. Die a posteriori Wahrscheinlichkeit von H wird aus der Multiplikation der a priori Wahrscheinlichkeit $p(H|K)$ mit der Wahrscheinlichkeit der Daten, die eine wahre Hypothese annehmen $p(D|HK)$, und aus der Division der beiden vorher benannten Operanden durch die Wahrscheinlichkeit, dass die Daten dennoch beobachtet worden wären $p(D|K)$. Dies stellt den Zustand des Basiswissens vor und nach der Beobachtung von Daten und wird in der Abbildung 61 dargestellt.

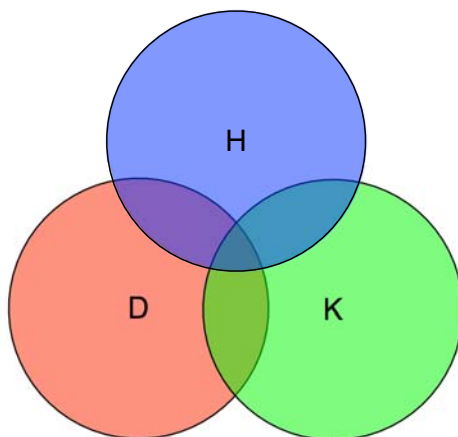


Abbildung 61: Ableitung des Bayes Theorems

Aus der Abbildung ist ersichtlich, dass das Basiswissen „K“ die Menge bildet, in der die untersuchten physikalischen Zusammenhänge geprüft werden. Bei allen physikalischen Zusammenhängen sind wir an der Erkundung der kleinen Menge unbekannter physikalischer Zusammenhänge interessiert – die Hypothesenmenge „H“. Die Daten „D“ verstärken oder negieren die Hypothese, die durch das Bayestheorem formuliert wurde.

8.7.3. Implementierung

Vom vorherigen Abschnitt ist es nicht einfach zu verstehen, wie das Bayestheorem bei Gebäuden angewendet werden kann. Deshalb wird hier noch einmal konkret aufgelistet, welche Komponenten für die Implementierung im Gebäudebereich benötigt werden:

- Es gibt ein Basiswissen mit Informationen über das behandelte Problem, in diesem Fall die Gebäudeenergiediagnose.
 - Physikalische Grundlagen, die beschreiben, wie das System auf Antriebskräfte reagiert.
 - Es gibt eine logische Anordnung der Systeme, d.h. der Rücklauf ist mit dem Kessel verbunden, wird dort geheizt und dann im Vorlauf zu den Wärmeübergabesystemen gebracht.
 - Die Geometrie und die physikalischen Parameter des Gebäudes sind bekannt.
- Es gibt eine Hypothesen-Menge, die alle Hypothesen enthält, die beantwortet werden sollen.
 - Die einfachste Frage ist: „verhält sich das Gebäude wie erwartet?“
 - Sind die Wahrscheinlichkeitsverteilungen bestimmter Parameter wie erwartet?
 - Mit welcher Wahrscheinlichkeit liegt ein bestimmter Fehler vor (z.B. ein kaputter Ventiltrieb)?
- Es werden Messungen am Gebäude durchgeführt, um diese Fragen (bzw. Hypothesen) zu beantworten.
 - Bei unsicheren Parametern ist es mit den Messdaten möglich mehr über diese herauszufinden.
 - Die Messdaten erlauben es, das Gebäudeverhalten zu bewerten.
 - Die Messdaten ermöglichen es, Fragen zu nicht beobachteten Variablen (nicht gemessen) durch Inferenz zu beantworten und sind daher für die vorliegende Aufgabe sehr hilfreich.

In dem folgenden Abschnitt wird gezeigt, wie das Bayestheorem für eine Parameterschätzung an einem einfachen Beispiel eingesetzt werden kann. Für diese Parameterschätzung sind zwei Voraussetzungen notwendig: ein Gebäudemodell und Messdaten von dem Gebäude. Diese Prozedur kann für alle Modellparameter durchgeführt werden, die für die FED-Anwendung interessant sind. Für diese Erläuterung wird ein einfaches Beispiel gewählt, der untersuchte Parameter ist die Wanddicke bzw. die Leitfähigkeit der Wand. An diesem Beispiel wird gezeigt, wie das Bayestheorem verwendet werden kann um diese beiden Parameter des Gebäudemodells an die Messdaten zu kalibrieren. D.h. welche Werte der Parameter sind die wahrscheinlichsten unter den gegebenen Messdaten (Klimadaten und Gebäudetemperatur)?

Bayes'sche Parameter Schätzung

Viele Hypothesen sind möglich und es können Inferenzen mit einem parametrisierten Modell gemacht werden. Die Parameter können sowohl diskret als auch kontinuierlich sein. Als Beispiel wird ein einzelner Parameter θ verwendet. Für das Schätzproblem wird angenommen, dass das Modell für einen unbekanntem Parameterwert richtig ist. Die Hypothesen-Menge ist daher die Menge aller Werte, die dieser Parameter θ annehmen darf. Die Messdaten sind so, dass Inferenzen über den Parameter vorgenommen werden können und es sind Wahrscheinlichkeitsverteilungen für jeden Wert von θ gegeben.

Das Bayestheorem kann nun verwendet werden, um die Wahrscheinlichkeiten direkt zu berechnen. Wenn D die Aussage repräsentiert, dass die Messdaten festgestellt wurden und H die Aussage, dass $\theta = \theta$ feststellt, dass ein möglicher Parameterwert der wahre Wert ist, dann können die Wahrscheinlichkeiten berechnet werden. K repräsentiert das notwendige Basiswissen mit allen notwendigen Beziehungen (z.B. die Physik), Randbedingungen und Vorinformationen. Das Bayestheorem kann damit folgendermaßen geschrieben werden:

$$p(\theta|DK) = \frac{p(\theta|K)p(D|\theta K)}{p(D|K)} \quad \text{Gleichung 6}$$

Um diese Gleichung verwenden zu können, müssen die drei Wahrscheinlichkeiten auf der rechten Seite angegeben werden. Die A-priori-Wahrscheinlichkeit (engl. prior) der Parameter $p(\theta|K)$ und Wahrscheinlichkeit für die Messdaten unter der Bedingung der Parameter (engl. likelihood) $p(D|\theta K)$ müssen vorher festgelegt bzw. bekannt sein. Die A-priori-Wahrscheinlichkeit repräsentiert schon bekannte Informationen über das Problem und kann im Modell als Parameter spezifiziert werden. Die Wahrscheinlichkeit für die Messdaten unter der Bedingung eines gegebenen Parameters wird mit dem Modell berechnet. Das Modell muss für einen Wert seines Parameters (oder seiner Parameter) wahr bzw. richtig sein. Deshalb muss eine Annahme für θ , d.h. $\theta = \theta_1$ oder $\theta = \theta_2$ oder $\theta = \theta_3$ usw. wahr sein. Das kann folgendermaßen geschrieben werden:

$$p(D|\theta_1 + \theta_2 + \dots|K) = p(D|K)p(\theta_1 + \theta_2 + \dots|K) = p(D|K) \quad \text{Gleichung 7}$$

Die linke Seite kann folgendermaßen erweitert werden (Θ disjunkt):

$$\begin{aligned} p(D|\theta_1 + \theta_2 + \dots|K) &= p(D|\theta_1|K) + p(D|\theta_2|K) + \dots \\ p(D|\theta_1 + \theta_2 + \dots|K) &= \sum_i p(D|\theta_i|K) \\ p(D|\theta_1 + \theta_2 + \dots|K) &= \sum_i p(\theta_i|K)p(D|\theta_i|K) \end{aligned} \quad \text{Gleichung 8}$$

Gleichung 7 und Gleichung 8 können folgendermaßen zusammengefasst werden:

$$p(D|K) = \sum_i p(\theta_i|K)p(D|\theta_i|K) \quad \text{Gleichung 9}$$

In Gleichung 9 ist $p(D|K)$ in der gewünschten Form dargestellt, d.h. mit prior und likelihood. In dem Schätzproblem (Gleichung 6) ist der Nenner nur eine Normalisierungskonstante für die A-posteriori-Wahrscheinlichkeit der Parameter

$p(\theta|DK)$ unter der Bedingung der Messdaten und des Basiswissens (engl. posterior). Die Normalisierungskonstante drückt alle möglichen Szenarien für den Parameter aus. Die Berechnung dieser Normalisierungskonstante macht die Implementierung der Bayes'schen Inferenz in der Praxis so schwierig, weil dafür Millionen Gebäudesimulationen notwendig sind, um sicherzustellen, dass die Normalisierungskonstante ausreichend berechnet ist und dass sie konvergiert ist. Monte-Carlo Methoden sind notwendig um sicherzustellen, dass der Parameterraum vollständig exploriert wird. Das Ergebnis wird zusammengefasst durch die so genannte Marginalisierung über den Parameter, d.h. über alle möglichen Werte des Parameters. Für kontinuierliche Parameter wird die Summe durch ein Integral ersetzt:

$$p(D|K) = \int p(\theta|K) p(D|\theta) d\theta \quad \text{Gleichung 10}$$

Um die Inferenzen zusammenzufassen, kann der Posterior visualisiert oder in Tabellenform dargestellt werden. Dies wird erschwert durch die Tatsache, dass der Parameterraum hochdimensional sein kann. Wenn ein Problem mit vielen Parametern behandelt wird, ist es unter Umständen interessant nur eine Teilmenge dieser Parameter zu betrachten. Mit der folgenden Formel kann über Parameter (β kontinuierlich) gemittelt werden:

$$p(\theta|DK) = \frac{1}{p(D|K)} \int p(\beta|K) p(\theta|\beta) p(D|\theta) d\beta \quad \text{Gleichung 11}$$

Damit kann über Parameter marginalisiert werden, an denen wir kein Interesse haben. Das ist der Fall, wenn ein Problem z.B. zwei Parameter θ und β hat, aber wir lediglich an dem Parameter θ interessiert sind. Das hat großen praktischen Nutzen, weil die Dimensionalität der A-posteriori Verteilungen reduziert werden kann. Die Marginalisierung ist ein Vorteil der Bayes'schen Sichtweise, weil sie es erlaubt, Simulationsergebnisse und Inferenzen in einer kompakten Form zusammenzufassen.

8.7.4. Beispiel / Evaluation in den Demonstrationsgebäuden

Wie oben schon kurz beschrieben, sind Inferenzen über Modell-Parameter (d.h. Kalibrierungen) genauso einfach wie Inferenzen über Parameter die mit Fehlern im Gebäude assoziiert sind. Das folgende Beispiel zeigt, wie ein einfaches Zustandsraum-Gebäude-Energiemodell mit (realen) Messdaten kalibriert werden kann. Das kann ein hochdimensionales Problem sein, ist hier aber so einfach gehalten, dass Tabellen und Graphiken zweidimensional gezeigt werden können, um den Prozess besser darstellen zu können. Das thermische Netzwerk könnte umfangreicher dargestellt werden, was aber unter Umständen von der eigentlichen Thematik ablenken würde.

Bayes'sche Wahrscheinlichkeits Kalibrierung

In diesem Abschnitt wird das verwendete Gebäudemodell kurz dargestellt. Die Modellierung der Gebäudehülle erfolgte mit zusammengefassten Parametern. Die dynamische Wärmeübertragung durch mehrschichtige opake Bauteile wurde deshalb

mit folgendem äquivalentem thermischen Widerstands-Kapazitätsmodell berechnet (Abbildung 62):

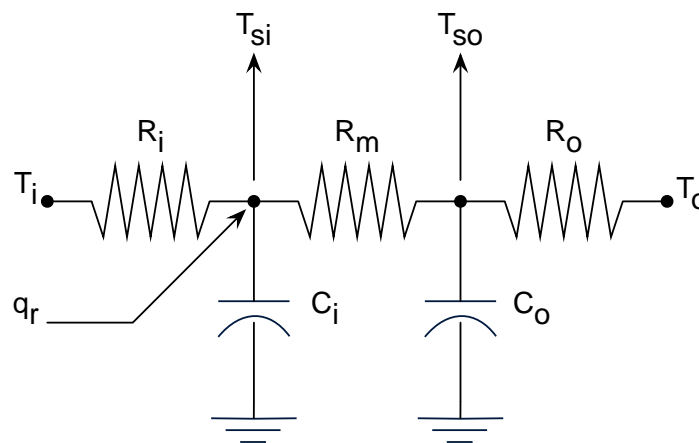


Abbildung 62 äquivalentes Ersatzmodell für opake Bauteile.

Alle schweren Elemente der Gebäudehülle werden durch zwei thermische Kapazitäten C_i und C_o und drei thermische Widerstände R_i , R_m und R_o repräsentiert. Dieser 3R2C Ansatz zweiter Ordnung hat sich als effektive Modellierungsmethode für schwere Bauteile erwiesen. Mit Optimierungsmethoden konnte gezeigt werden, dass folgende Werte typischerweise gute Ergebnisse liefern, obwohl das nicht immer gilt:

$$R_i = 0.10 R_T; \quad R_m = 0.40 R_T \quad \text{und} \quad R_o = 0.50 R_T$$

$$C_i = 0.15 C_T; \quad C_o = 0.85 C_T$$

Dabei sind R_T und C_T Gesamtwiderstand und Gesamtkapazität berechnet aus den Konstruktionsdaten. Der Term q_r (in Abbildung 3) ist ein Strahlungsquelleterm, z.B. für solare und langwellige (interne Quellen) Strahlung.

Aus der Energiebilanz für die inneren Temperaturknoten (Temperaturen der Wärmekapazitäten) ergibt sich folgendes Gleichungssystem:

$$0.15 C_T \dot{T}_{si} = q_r + \frac{T_i - T_{si}}{0.1 R_T} - \frac{T_{si} - T_{so}}{0.4 R_T}$$

$$0.85 C_T \dot{T}_{so} = \frac{T_{si} - T_{so}}{0.4 R_T} - \frac{T_{so} - T_o}{0.5 R_T}$$

Gleichung 12

umgestellt:

$$\begin{aligned} \dot{T}_{si} &= \frac{q_r}{0.15R_T C_T} + \frac{T_i}{0.015R_T C_T} + \frac{-0.075}{0.0009R_T C_T} T_{si} + \frac{1}{0.06R_T C_T} T_{so} \\ \dot{T}_{so} &= \frac{T_{si}}{0.34R_T C_T} + \frac{-0.765T_{so}}{0.1445R_T C_T} + \frac{T_o}{0.425R_T C_T} \end{aligned} \quad \text{Gleichung 13}$$

Die Outputvariablen T_{si} , T_{so} sind gleichzeitig Zustandsvariablen, \dot{T}_{si} , \dot{T}_{so} ihre Ableitungen. T_i , T_o und q_r sind Inputvariablen und R_T , C_T sind Parameter. Diese Gleichung kann in der so genannten Zustandsraumdarstellung⁴² in Matrixdarstellung folgendermaßen dargestellt werden:

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{x}} &= \mathbf{Ax} + \mathbf{Bu} \\ \mathbf{y} &= \mathbf{Cx} + \mathbf{Du} \end{aligned} \quad \text{Gleichung 14}$$

$\dot{\mathbf{x}}$ ist der Vektor der Zustandsableitungen, \mathbf{x} und \mathbf{u} sind Vektoren der Zustands- und Inputvariablen. \mathbf{y} ist der Vektor der Outputvariablen. \mathbf{A} , \mathbf{B} , \mathbf{C} und \mathbf{D} sind Matrizen der Parameter. \mathbf{A} wird Systemmatrix genannt, \mathbf{B} Eingangsmatrix, \mathbf{C} Ausgangsmatrix und \mathbf{D} Durchgangsmatrix. Im Beispiel ergibt sich damit konkret folgendes System:

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} \dot{T}_{si} \\ \dot{T}_{so} \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} \frac{-0.075}{0.0009R_T C_T} & \frac{1}{0.06R_T C_T} \\ \frac{1}{0.34R_T C_T} & \frac{-0.765}{0.1445R_T C_T} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} T_{si} \\ T_{so} \end{pmatrix} + \\ &+ \begin{pmatrix} \frac{1}{0.015R_T C_T} & \frac{1}{0.15C_T} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{0.425R_T C_T} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} T_i \\ q_r \\ T_o \end{pmatrix} \\ \begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} T_{si} \\ T_{so} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} T_i \\ q_r \\ T_o \end{pmatrix} \end{aligned} \quad \text{Gleichung 15}$$

Viele Modellierungs- und Simulationsprobleme, die hunderte oder sogar tausende Gleichungen enthalten können in einer ähnlichen Art und Weise reduziert werden. Zustandsraum Techniken sind hilfreich, weil sie zu numerisch effizienten Lösungen solcher Gleichungssysteme führen.

⁴² aus der Regelungstechnik
(http://de.wikipedia.org/wiki/Zustandsraumdarstellung#Normalformen_im_Zustandsraum)

Kalibrierung der Temperaturantwort

Das Demonstrationsgebäude Hauptsitz der Firma ennovatis in Großpösna wurde im Rahmen des Projekts unter der Berücksichtigung der soeben eingeführten Methode modelliert. Dafür wurde Matlab/Simulink verwendet und Abbildung 63 zeigt die Darstellung des Modells innerhalb der Software.

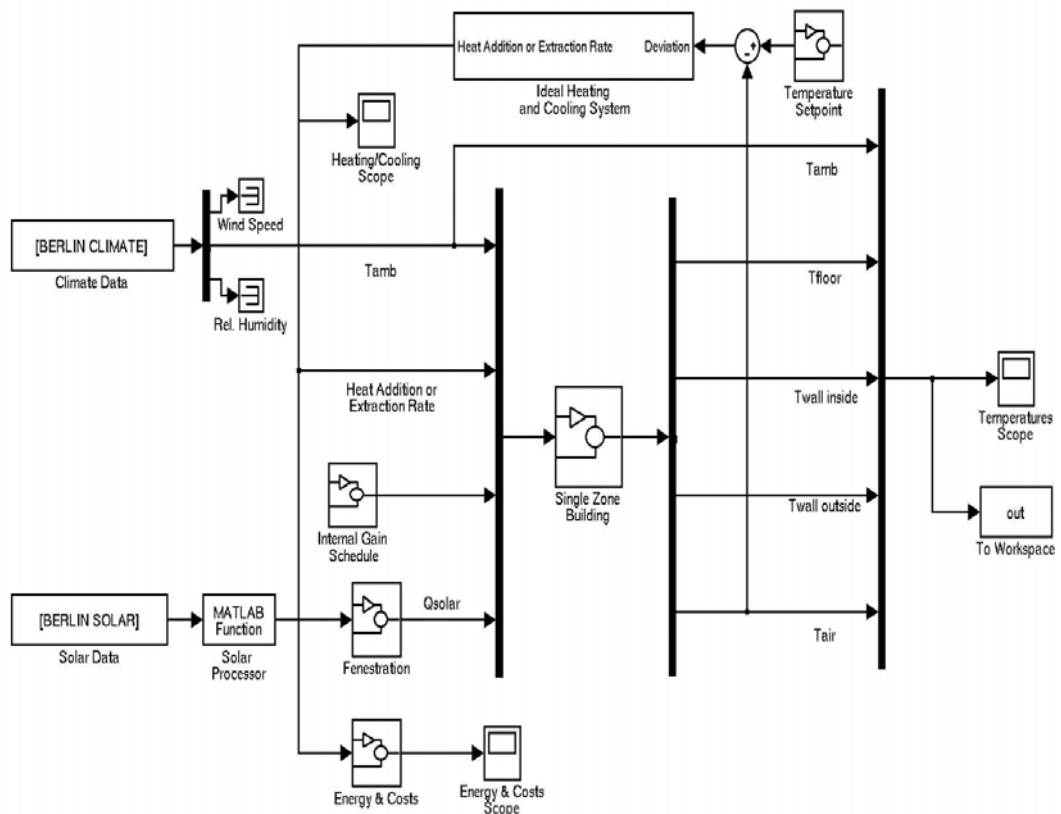


Abbildung 63: Darstellung des Modells innerhalb von Matlab/Simulink

Für das Demonstrationsgebäude wurde eine Parameterbestimmung durchgeführt, wobei die Kalibrierung auf der Grundlage der Temperaturantwort, die aus den Messdaten hervorging, durchgeführt wurde. Das Ziel der Kalibrierung war die Bestimmung der Dicke und Leitfähigkeit der Außenwände. Prinzipiell ist das Verfahren auch für die gleichzeitige Ermittlung von mehr als zwei Parametern geeignet. Die Temperaturantwort eines typischen Tages ist in Abbildung 64 dargestellt. Das Ziel ist die Bestimmung jener Werte der zwei Parameter, die die Temperaturantwort mit der höchsten Wahrscheinlichkeit erklären.

Die Wahrscheinlichkeit der gemessenen Temperaturantwort wurde zu jedem Zeitschritt bestimmt. Die Gesamtwahrscheinlichkeit wurde durch die Multiplikation der einzelnen Wahrscheinlichkeiten ermittelt. Ziel war es, die gesamte Temperaturantwort richtig zu bestimmen, da so die Parameter mit der höchsten Wahrscheinlichkeit ermittelt werden können.

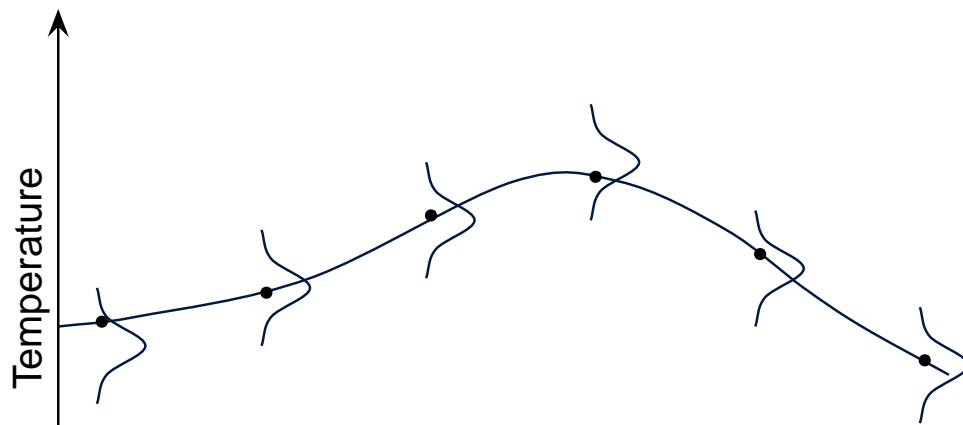


Abbildung 64: Probabilistische Temperaturantwort des Demonstrationsgebäudes Großpösna

Um den gesamten Parameterraum zu untersuchen war es nötig eine Markow-Ketten Monte-Carlo-Simulation durchzuführen. Die Abbildung 65 stellt den Verlauf dieser Simulation dar. Auf der x-Achse sind die Simulationsdurchläufe aufgetragen und die y-Achse zeigt einmal die Wärmeleitfähigkeit R [(m²K) / W] und einmal die Bauteildicke C [m]. Insgesamt sind lediglich 2500 Durchläufe der Monte-Carlo-Simulation dargestellt.

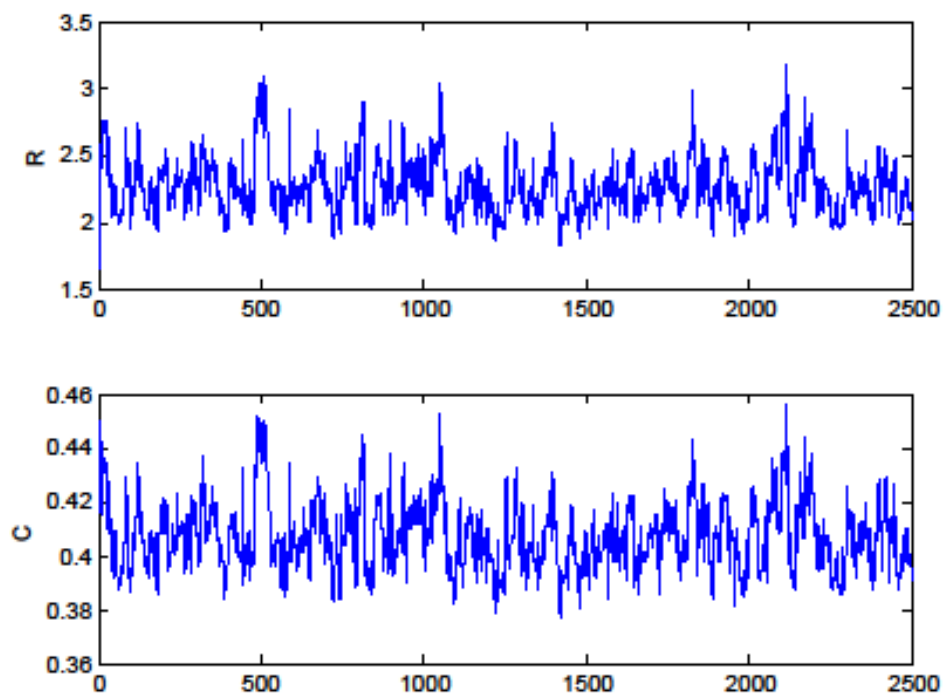


Abbildung 65: Markow-Ketten Monte-Carlo Simulationen des Demonstrationsgebäudes Großpösna

Als Ergebnis aus den Simulationen erhält man die A-posteriori Verteilung der Parameterwerte. In diesem Beispiel beträgt die wahrscheinlichste Wärmeleitfähigkeit $R = 2,15$ (m²K) / W und die wahrscheinlichste Bauteildicke $C = 0,4$ m, was dem realen Eigenschaften der Bauteile entspricht. In Abbildung 66 und Abbildung 67 sind die A-posteriori Histogramme dargestellt.

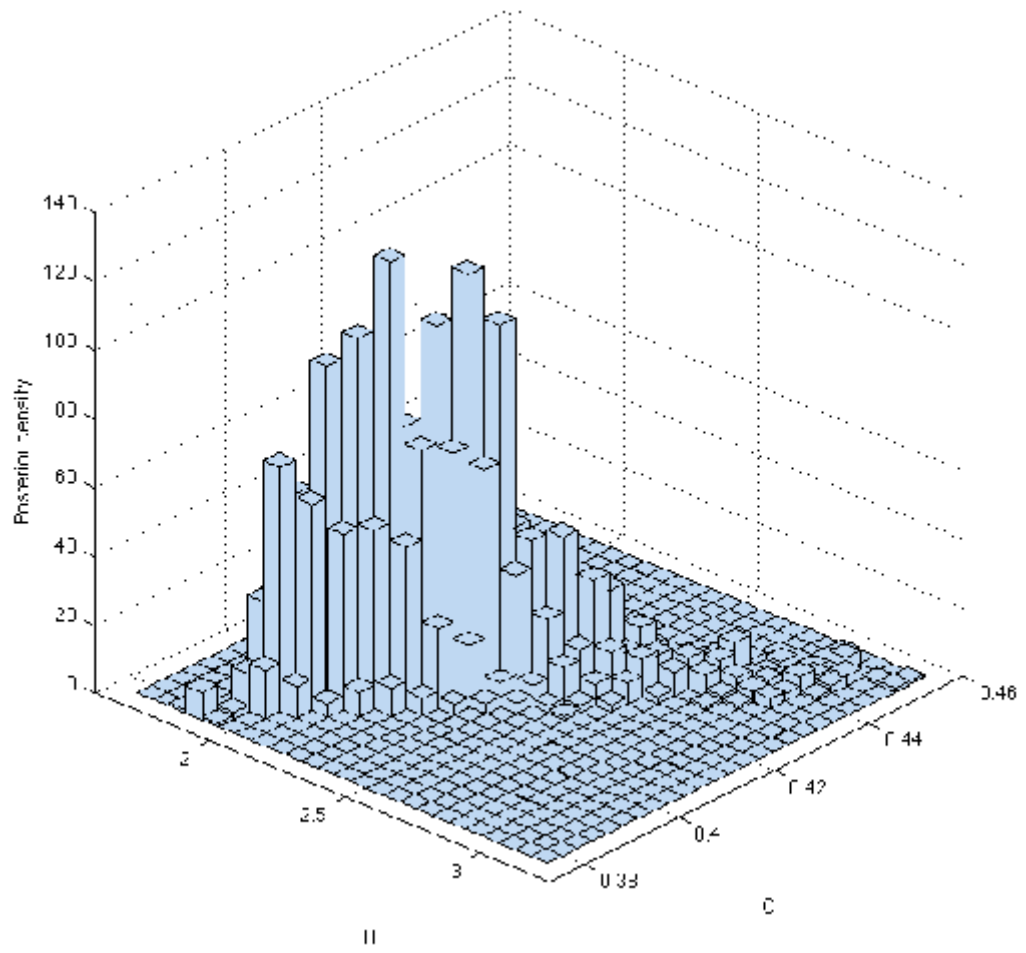


Abbildung 66: Dreidimensionales Histogramm der Parameterbestimmung

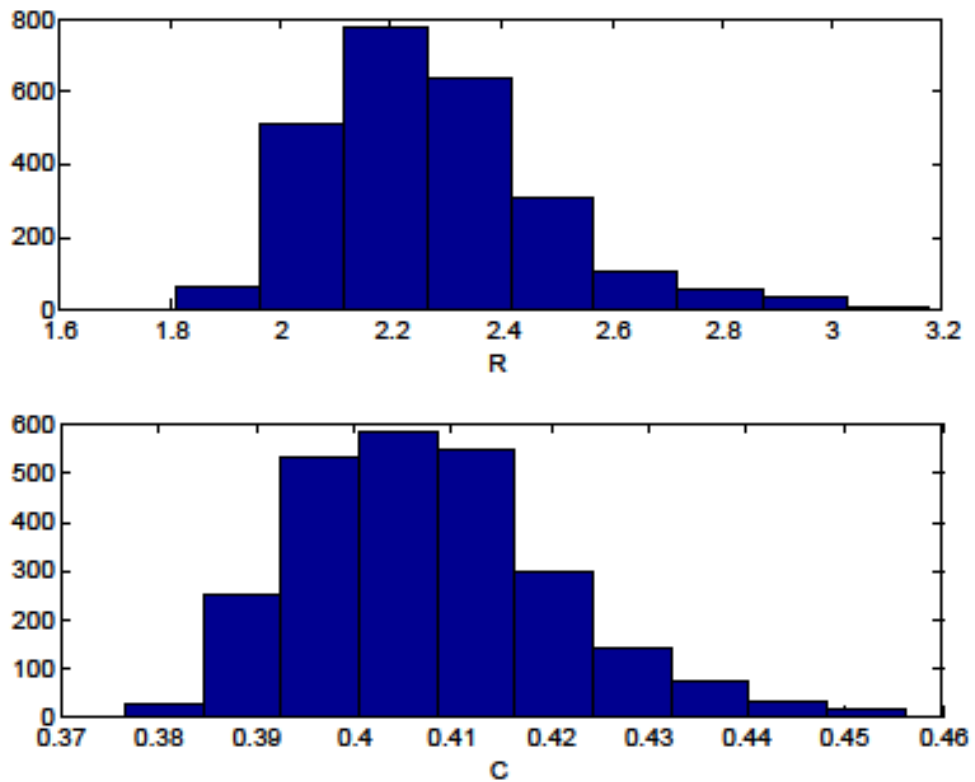


Abbildung 67: Histogramme der Parameterbestimmung

Die A-posteriori-Wahrscheinlichkeitsverteilung enthält viele Informationen bezüglich des Kalibrierungsproblems. In Abbildung 68 ist diese A-posteriori Wahrscheinlichkeitsverteilung als Funktion der Wanddicke und der Leitfähigkeit dargestellt.

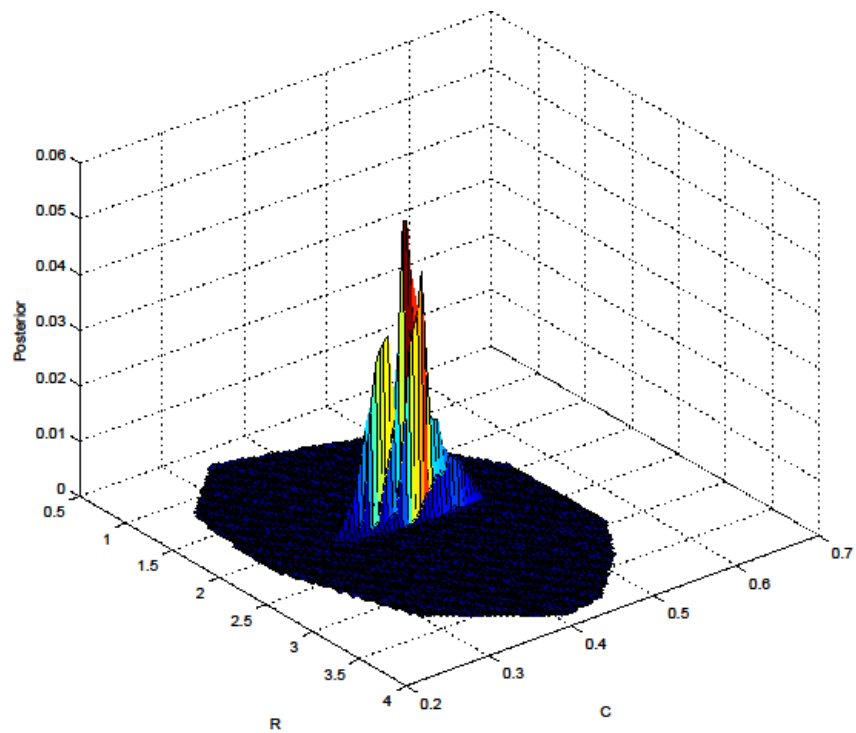


Abbildung 68: A-posteriori-Wahrscheinlichkeitsverteilung der Parameterbestimmung

Stellt man die dreidimensionale Abbildung in zwei Dimensionen dar, erhält man eine Niveauliniendarstellung (Abbildung 69).

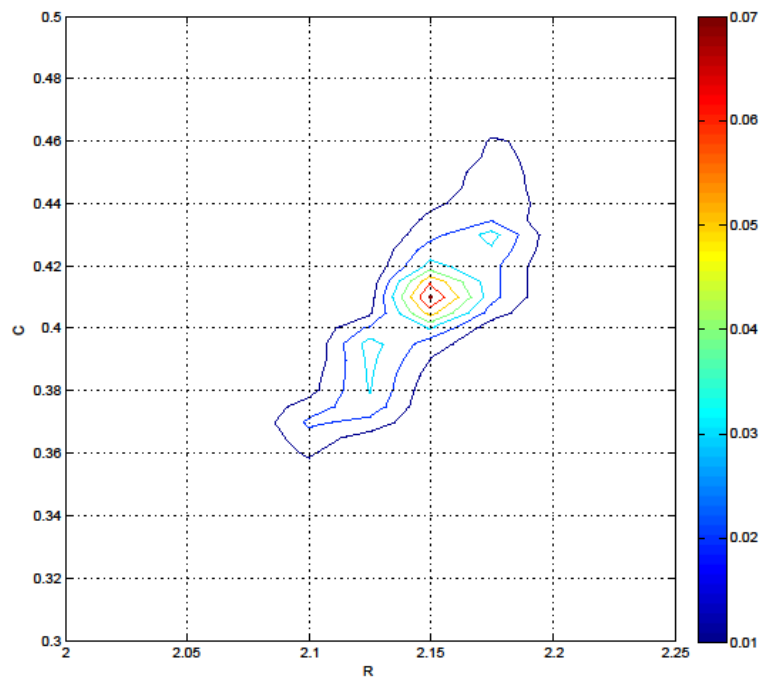


Abbildung 69: A-posteriori Niveauliniendarstellung

Anhand der A-posteriori Niveauliniendarstellung wird die Korrelation der Parameter ersichtlich: Mit einer hohen Wärmeleitfähigkeit und dicken Außenwänden erhält man fast die gleichen Ergebnisse, wie mit geringen Wärmeleitfähigkeit und dünnen Außenwänden.

Generell können verschiedenartige Parameteridentifikationen mit der vorgestellten Methode durchgeführt werden. Eine solche Parameteridentifikation kann zur Kalibrierung, Vorhersage und Bestimmung des Wertes der Information (engl. value of information) verwendet werden. Auch eine Fehlererkennung und –Diagnose kann mit der Methode durchgeführt werden. Dazu müssen die Bereiche im Parameterraum identifiziert werden, in denen man von einem fehlerhaften Betrieb ausgehen kann. Mit der Methode können die wahrscheinlichsten Parameterwerte ermittelt werden. Danach muss entschieden werden, ob dieser Wert einen fehlerhaften Betrieb darstellt. Je nach dem Einfluss des Fehlers auf den Gebäudebetrieb (z.B. Energieverbrauch) kann dann entschieden werden ob es wirtschaftlich ist den Fehler zu beheben oder ob der Fehler einen zu vernachlässigenden Einfluss hat.

Bayes'sche Modellvergleiche

Bei den Bayes'schen Methoden bisher wurde davon ausgegangen, dass das zu Grunde liegende Modell richtig war. Es kann allerdings der Fall sein, dass verschiedenste Modelle dazu geeignet sind das physikalische Verhalten des Systems abzubilden. Dann ist es von Interesse zu analysieren, welches der Modelle das am Besten geeignete ist. Die Auswahl erfolgt nach dem Prinzip von Ockhams Rasiermesser: Das einfachste Modell ist zu bevorzugen solange kompliziertere Modelle das System nicht besser beschreiben können.

Um das Bayestheorem zum Modellvergleich benutzen zu können muss angenommen werden, dass eines der betrachteten Modelle das „wahre“ Modell ist. Für m Modelle ($m=1$ bis M) kann das Bayestheorem benutzt werden, um die Wahrscheinlichkeit zu berechnen, dass ein Modell das „wahre Modell“ ist:

$$p(m|K) = \frac{p(m|K) \cdot p(D|mK)}{p(D|K)} \quad \text{Gleichung 16}$$

Wobei die Wahrscheinlichkeit, dass ein Modell das "wahre" ist als gleichverteilte A-priori-Verteilung angenommen wird, wenn kein Modell bevorzugt wird.

Um $p(D|mK)$ zu berechnen, muss die marginale Wahrscheinlichkeit für Modell m berechnet werden. Die Parameter des Modells m sind zuvor bekannt:

$$p(D|mK) = \int p(\theta_m|K_m) \cdot p(D|\theta_m, K_m) d\theta_m \quad \text{Gleichung 17}$$

Um nun $p(D|K)$ berechnen zu können muss über die m Modelle marginalisiert werden:

$$p(D|K) = \sum_m p(m|K) \cdot p(D|mK) \quad \text{Gleichung 18}$$

Wobei $p(D|K)$ die Normalisierungskonstante darstellt. Auf eine Berechnung dieser Konstante kann verzichtet werden, wenn das Verhältnis der Modellwahrscheinlichkeiten verwendet wird. Dieses Verhältnis wird Quotenverhältnis (engl. odds ratio) genannt. Das Quotenverhältnis für die Bevorzugung des Modells m_1 über das Modell m_2 kann mit folgender Gleichung berechnet werden:

$$O_{m_1 m_2} = \frac{[p(m_1|K)] \int p(\theta_{m_1}|K_{m_1}) p(D|\theta_{m_1}, K_{m_1}) d\theta_{m_1}}{[p(m_2|K)] \int p(\theta_{m_2}|K_{m_2}) p(D|\theta_{m_2}, K_{m_2}) d\theta_{m_2}} \quad \text{Gleichung 19}$$

$$O_{m_1 m_2} = \frac{[p(m_1|K)]}{[p(m_2|K)]} B_{m_1 m_2}$$

Wobei der Faktor in Klammern a-priori Quote genannt wird und $B_{m_1 m_2}$ als sogenannter Bayes-Faktor bezeichnet wird, der das Verhältnis der a-priori Vorhersagewahrscheinlichkeiten ausdrückt.

Diese Methode unterscheidet sich von der Parameterbestimmung, ist aber nötig wenn man neben der Parameterbestimmung auch eine Bestimmung des Modells, welches verwendet wird, durchführen will. Bei der Verwendung von sowohl der Parameterbestimmung als auch der Modellbestimmung kann sichergestellt werden, dass die richtigen Modelle mit den richtigen Parametern verwendet werden. Einzige Voraussetzung ist das Vorhandensein von geeigneten Messdaten.

8.8. Stufe 3b - Optimierung mit Simulation des Gesamtgebäudes

8.8.1. Begründung für den Ansatz

In der Praxis erfolgt die Energieoptimierung von Gebäuden meist auf Grundlage einfacher Abschätzungen und Berechnungen und der Erfahrung des jeweiligen Gutachters. Diese Herangehensweise beschränkt sich oft auf nur weniger Parameter, die „manuell“ optimiert werden.

Im Rahmen dieses Projekts wird die modellbasierte Energieoptimierung betrachtet. Diese Methode hat den Vorteil, dass eine (automatisierte) numerische Optimierung ausgewählter Parameter erfolgt, bei der zahlreiche Einflussfaktoren berücksichtigt werden können. Weiterhin können Parameter geändert werden, ohne dass es zu Beeinträchtigungen der Nutzer z.B. aufgrund von Komfortmängeln kommt. Die Anzahl der Szenarien, die betrachtet werden können, ist größer als bei der manuellen Veränderung des Betriebs im realen Gebäude.

Ein kritischer Punkt bei der numerischen Optimierung ist allerdings der Aufwand für die Modellerstellung und die notwendige Rechenzeit bzw. die notwendigen Iterationen. Daher wurden im Rahmen von ModBen gezielt nach Lösungen im Bereich der Modellbildung und der Optimierungsalgorithmen gesucht, die den Einsatz der simulationsgestützten Optimierung in der Praxis ermöglichen.

8.8.2. Beschreibung

Bei der numerischen Optimierung werden ausgewählte Modellparameter automatisiert (über einen entsprechenden Optimierungsalgorithmus) verändert, bis sich ein optimierter Betrieb einstellt. Dafür muss zunächst eine geeignete Zielfunktion

ausgewählt werden, die von dem Optimierungsalgorithmus minimiert (u. U. auch maximiert) wird.

Mögliche Zielfunktionen sind die Betriebskosten, der Primär- oder der Endenergiebedarf, Lebenszykluskosten oder die Emission von Treibhausgasen. Dabei müssen ggf. bestimmte Randbedingungen wie z.B. Raumsolltemperaturen und Mindestluftwechsel eingehalten werden.

Bei der Auswahl der Optimierungsalgorithmen müssen die Eigenschaften der Zielfunktion beachtet werden. Die wichtigsten Eigenschaften sind die Dimension und die Differenzierbarkeit. Im Gebäudebereich handelt es sich in der Regel um nicht stetig differenzierbare und mehrdimensionale Zielfunktionen. Aus diesem Grund wurden im Rahmen des Projekts nur Algorithmen betrachtet, die für das Suchen von Minima solcher Funktionen geeignet sind.

Wie in Kapitel 4.2 beschrieben, sind zur Optimierung physikalisch basierte Modelle (White Box oder Gray Box Modelle) notwendige Voraussetzung. Ein zu hoher Detaillierungsgrad der Modelle ist allerdings nicht sinnvoll, da große Unsicherheiten bezüglich der Nutzereinflüsse in den Gebäuden vorliegen. Diese Unsicherheiten können nicht durch eine hohe Detaillierung der Modelle ausgeglichen werden (vgl. [62]). Vereinfachte Modelle bedeuten gleichzeitig eine erhebliche Zeitersparnis bei der Modellierung des Gebäudes und eine Verkürzung der Simulationszeiten. Aus diesem Grund lag der Fokus des Projekts auf vereinfachten Simulationsmodellen, die dennoch die realen und in der Praxis veränderbaren Parameter als Grundlage besitzen. Solche Parameter sind beispielsweise der Luftwechsel, die Belegung des Gebäudes, die Verschattungssteuerung, die Außentemperaturabhängige Vorlauftemperaturregelung und Pumpenlaufzeiten.

Im Rahmen von ModBen wurden verschiedene Modell und Optimierungsalgorithmen untersucht, die im Folgenden beschrieben werden.

8.8.3. Implementierung

Zur Modellierung wurde die Simulationssoftware *IDA-ICE* verwendet (siehe auch Kapitel 4.2.6). Mit dem Programm können grundsätzlich Modelle von Gebäude und Anlage mit beliebigem Detaillierungsgrad erstellt werden.

Das Programm bietet ein 3-D Modell für die visuelle Kontrolle der eingegebenen Gebäudegeometrie. Die Spezifikation der anlagentechnischen Ausstattung erfolgt über eine grafische Benutzeroberfläche.



Abbildung 70: Beispiel eines 3-D Modells des Demonstrationsgebäudes Großpösna in *IDA-ICE*

Die Abbildung 71 zeigt das *Schema*⁴³ des Gebäudemodells. Die abgebildeten Symbole stehen jeweils für Komponenten oder Subsysteme des Modells.

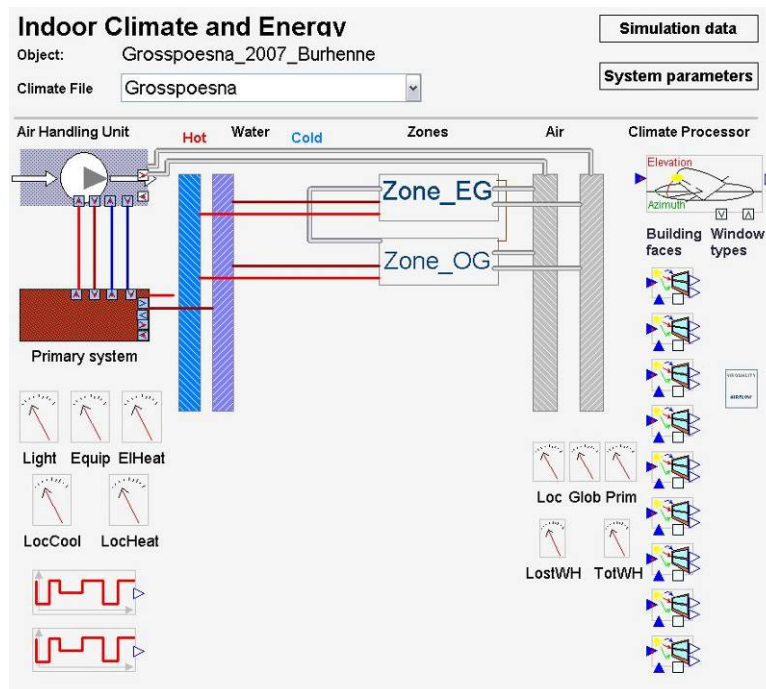


Abbildung 71: Schematische Darstellung des Simulationsmodells (Bildschirmarschnitt IDA-ICE)

Neben den detaillierten Modellen von Gebäude und Anlage können auch beliebige Modelle selbst erstellt werden. Um gezielt die Rechenzeit zu reduzieren und so die Anwendbarkeit von Optimierungsalgorithmen zu verbessern wurde im Rahmen des Projekts die Simple Hourly Method (SHM) nach der ISO 13790 (Energy performance of buildings - Calculation of energy use for space heating and cooling) implementiert. Ein Vorteil dieses Modells ist seine einfache Struktur, die Einbindung in die Europäische Normenwelt, und dass die erforderlichen Simulationsparameter größtenteils aus der Zertifizierung nach DIN V 18599 entnommen werden können. Aus diesen Gründen wurde dieses Modell zur Vereinfachung herangezogen.

Das Modell lässt sich als Netzwerk aus fünf Widerständen und einer Kapazität darstellen. Das Modell enthält drei so genannte Knotenpunkte, die idealisiert mittlere Luft-, Oberflächen- und Bauteilmassetemperatzen der Zone repräsentieren. Diese Knotenpunkte sind über Widerstände, die mittels Transmissionskoeffizienten (H_{tr}) beschrieben werden, miteinander verbunden.

⁴³ Bezeichnung der Ansicht innerhalb von IDA-ICE.

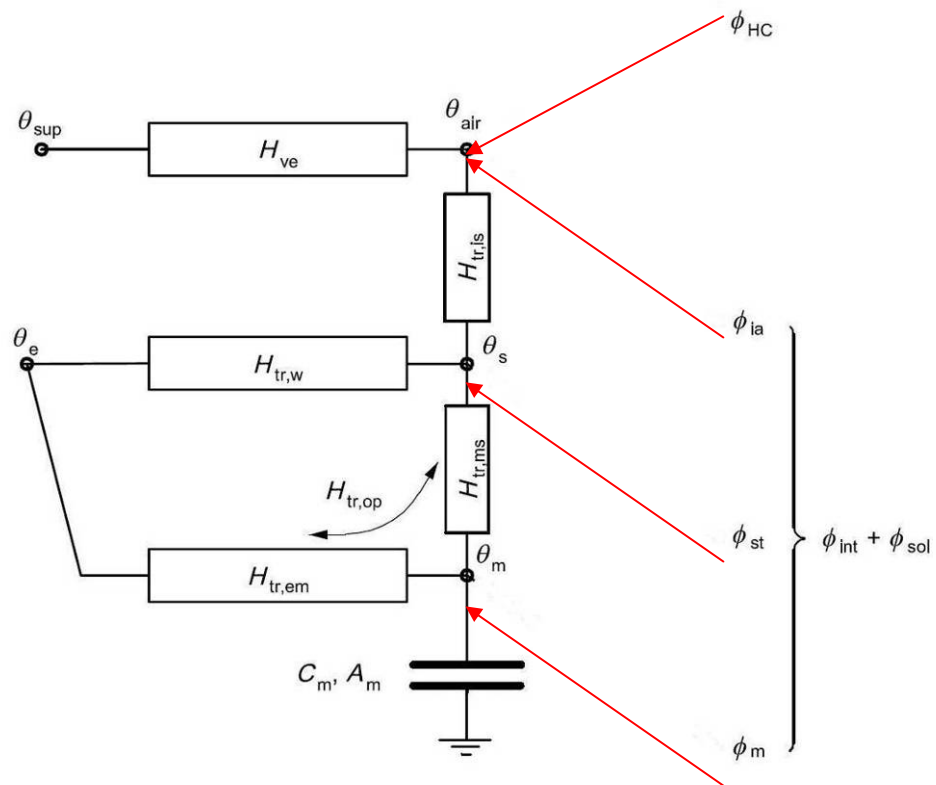


Abbildung 72: Aufbau der Simple Hourly Method
(überarbeitete Darstellung nach ISO 13790:2008, S. 93)

Zur Optimierung wurde im Rahmen des Projekts das generische Optimierungsprogramm *GenOpt* verwendet. Das Programm ist in der Lage eine Zielfunktion, die durch ein Simulationsprogramm berechnet wird, zu minimieren.

Abbildung 73 zeigt eine schematische Darstellung der Interaktion zwischen *IDA* und *GenOpt*.

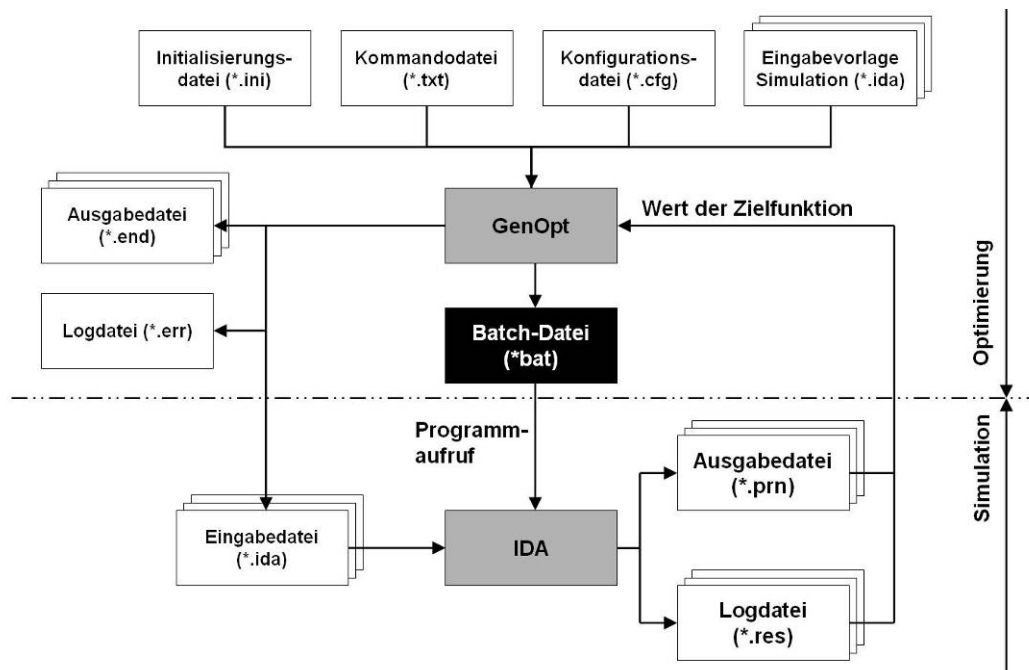


Abbildung 73: Interaktion zwischen IDA und GenOpt
(eigene Darstellung nach Wetter 2008, S. 73)

8.8.4. Beispiel / Evaluation in den Demonstrationsgebäuden

Als Beispiel wird hier die Optimierung der Betriebszeiten der Umwälzpumpe eines Heizkreises im Demonstrationsgebäude in Großpösna vorgestellt.

Ziel war es, die Zeiträume zu identifizieren, in denen die Pumpe (und der Kessel) nachts ausgeschaltet werden kann, unter der Maßgabe, dass die Raumsolltemperaturen während der Anwesenheit der Nutzer eingehalten werden. Die Umwälzpumpe lief in der Realität 24 Stunden pro Tag.

Als Zielfunktion diente der Nutzenergiebedarf des Gebäudes. Die Nebenbedingung war die Einhaltung der Raumsolltemperaturen, wenn Nutzer im Gebäude anwesend sind. Dafür wurde eine sogenannte Bestrafungsfunktion (*penalty function*) definiert. Diese Funktion erhöht die benötigte Heizleistung um einen bestimmten Wert, wenn die Solltemperatur nicht eingehalten werden kann. Der Wert dieser Funktion wird nach folgender Gleichung berechnet:

$$penalty = \begin{cases} 4000 \Delta\theta; & \text{für } \Delta\theta \geq 0 \wedge \theta_{int,set,H} > 20^{\circ}\text{C} \\ 0; & \text{sonst} \end{cases}$$

mit:

$$\Delta\theta = \theta_{int,set,H} - \theta_{int}$$

$\theta_{int,set,H}$... Raumtemperatursollwert

θ_{int} ... Lufttemperatur in der Zone

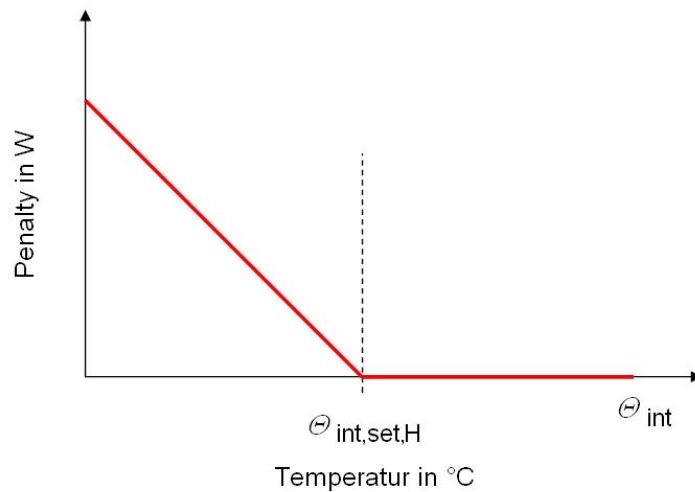


Abbildung 74: Grafische Darstellung der Bestrafungsfunktion

Ohne eine solche Bestrafungsfunktion findet der Optimierungsalgorithmus das Optimum, wenn die Pumpe stets ausgeschaltet ist.

Als veränderliche Parameter wurde die Zeit für den Beginn und das Ende des Betriebszeitraums verwendet.

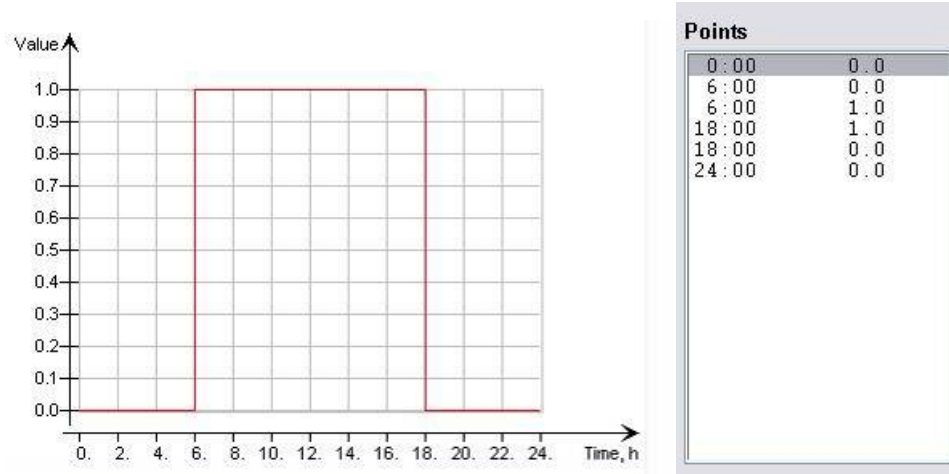


Abbildung 75: Darstellung des Objektes *Schedule Pump* mit einer exemplarischen Laufzeit von 06:00 Uhr bis 18:00 Uhr (Bildschirmarschnitt IDA-ICE)

- **Simulation und Optimierung mit IDA-ICE Modell**

Abbildung 76 zeigt den Vergleich der simulierten Heizleistung mit den Messdaten. Der gewählte Vergleichszeitraum ist auch in diesem Fall der Dezember 2007. Es kann eine gute Übereinstimmung des Modells mit der Realität gezeigt werden. Die gemessene Nutzenergiemenge beträgt im Dezember 5.453 kWh und die simulierte beträgt 5.614 kWh, was einer Abweichung von 3,0 % entspricht.

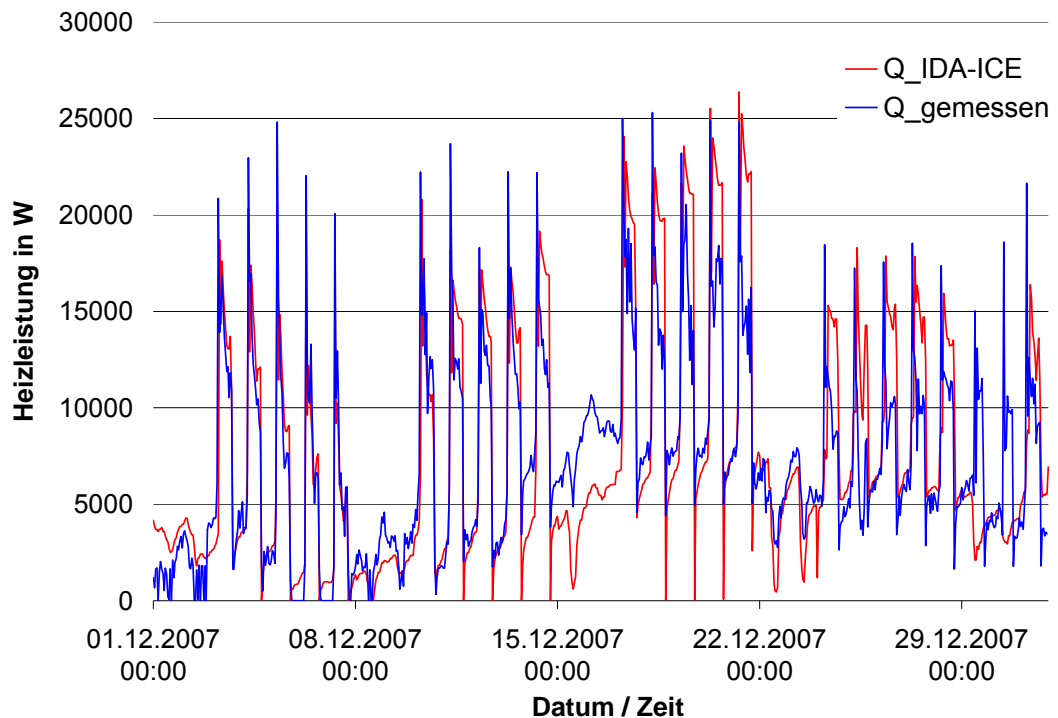


Abbildung 76: Vergleich der Heizleistung des IDA-ICE Modells mit Messwerten

In Tabelle 28 ist das Optimierungsergebnis der verschiedenen Algorithmen mit dem IDA-ICE Modell aufgeführt. Durch die Schrittweite von 15 Minuten, die bei den Algorithmen vorgegeben wird, finden die Parametervariation und der Partikel Schwarm Optimierungsalgorithmus das Optimum bei einer Betriebszeit von 06:45 – 16:30 Uhr. Sowohl die allgemeine Mustersuche als auch die Kombination aus allgemeiner Mustersuche und Partikel Schwarm Optimierungsalgorithmus finden das Optimum bei einer Betriebszeit von 06:53 - 16:53 Uhr. Das ist damit zu begründen, dass bei der allgemeinen Mustersuche zum Ende des Optimierungsvorgangs die Schrittweite unter das voreingestellte Maß abgesenkt wird, um das globale Optimum zu finden. Im vorliegenden Beispiel erfolgte die Halbierung der Schrittweite von 15 Minuten auf 7,5 Minuten. Der Vorteil der allgemeinen Mustersuche sind zudem die nur 94 Simulationsdurchgänge, die nötig waren, bis der Algorithmus zum Minimum konvergierte.

Tabelle 28: Vergleich der Optimierungsalgorithmen IDA-ICE Modell

	Optimum Pumpenlaufzeit	Zielfunktion [kWh]	Anzahl der erforderlichen Simulationen
Parametervariation	06:45 – 16:30 Uhr	25.161	441
Algorithmus			
Allgemeine Mustersuche	06:53 - 16:53 Uhr	25.117	94
Partikel Schwarm Algorithmus	06:45 – 16:30 Uhr	25.161	139
Kombination AMS und PSO	06:53 - 16:53 Uhr	25.117	358

Abbildung 77 zeigt den Temperaturverlauf vor und nach der Optimierung der Pumpenlaufzeiten. Die niedrigen Temperaturen am Anfang des Jahres sind mit den Betriebsferien und deren Berücksichtigung im Modell zu erklären. Durch die Optimierung sinkt der Jahresnutzenenergiebedarf von 22.465 kWh auf 20.128 kWh, was einer Einsparung von 10,4 % entspricht. Die tiefste Raumlufttemperatur im Jahr 2007 wird am 27.12.2007 um 6:00 Uhr erreicht und beträgt 13,8 °C.

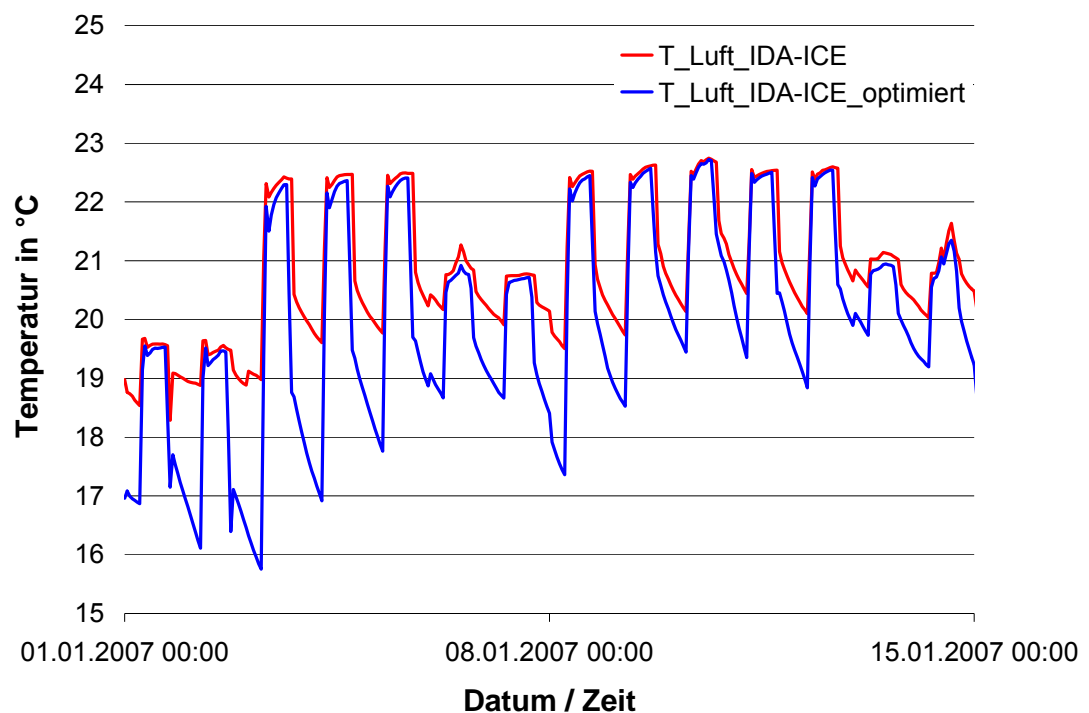


Abbildung 77: Temperaturverlauf vor und nach der Optimierung des IDA-ICE Modells

- **Simulation und Optimierung mit SHM Modell**

Die simulierte Heizleistung zeigt eine gute Übereinstimmung mit den Messdaten. Die errechnete Nutzenergiemenge für den Dezember beträgt 5.700 kWh. Das ist eine gute Übereinstimmung mit dem gemessenen Wert von 5.453 kWh (Abweichung 4,5 %).

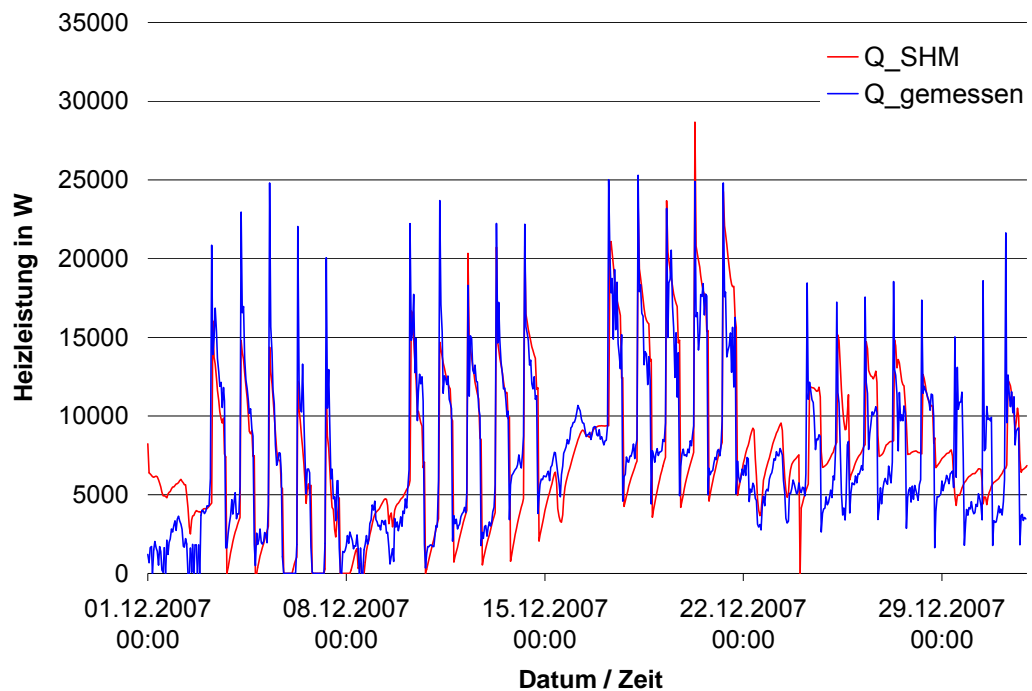


Abbildung 78: Vergleich der Heizleistung des Simple Hourly Method (SHM) Modells mit Messwerten

In Tabelle 29 ist ein Vergleich der Algorithmen untereinander aufgeführt. Die Parametervariation zeigt, dass sowohl die allgemeine Mustersuche als auch die Kombination aus allgemeiner Mustersuche und Partikel Schwarm Algorithmus lediglich ein lokales Minimum finden. Die allgemeine Mustersuche erwies sich bei der Optimierung des IDA-ICE Modells als geeignet. Das zeigt, dass sich je nach Optimierungsproblem verschiedenen Algorithmen am besten eignen. Zu beachten ist jedoch, dass auch mit Parametern, bei denen lediglich ein lokales Optimum vorliegt, Einsparungen bei der Implementierung im Gebäude erzielt werden können.

Der Partikel Schwarm Algorithmus konvergiert zum globalen Minimum, was anhand der Parametervariation nachgewiesen werden kann.

Tabelle 29: Vergleich der Optimierungsalgorithmen SHM Modell

	Optimum Pumpenlaufzeit	Zielfunktion [kWh]	Anzahl der erforderlichen Simulationen
Parametervariation	07:00 - 16:45 Uhr	18.347	441
Algorithmus			
Allgemeine Mustersuche	07:00 – 17:30 Uhr	18.356	72
Partikel Algorithmus	Schwarm 07:00 - 16:45 Uhr	18.347	138
Kombination AMS und PSO	07:00 – 17:30 Uhr	18.356	201

Abbildung 79 zeigt den Temperaturverlauf vor und nach der Optimierung. Mit dieser Maßnahme kann der jährliche Nutzenergiebedarf von 21.500 kWh auf 19.288 kWh reduziert werden, was einer Einsparung von 10,3 % entspricht. Weiterhin kann gezeigt werden, dass die Temperatur im Gebäude aufgrund der Wärmespeicherung durch die Gebäudemasse nicht auf kritische Temperaturen (Frostschutz) fällt. Bei der Jahressimulation ist die tiefste erreichte Temperatur 13,2 °C, welche am 31.12.2007 um 7:00 Uhr auftritt.

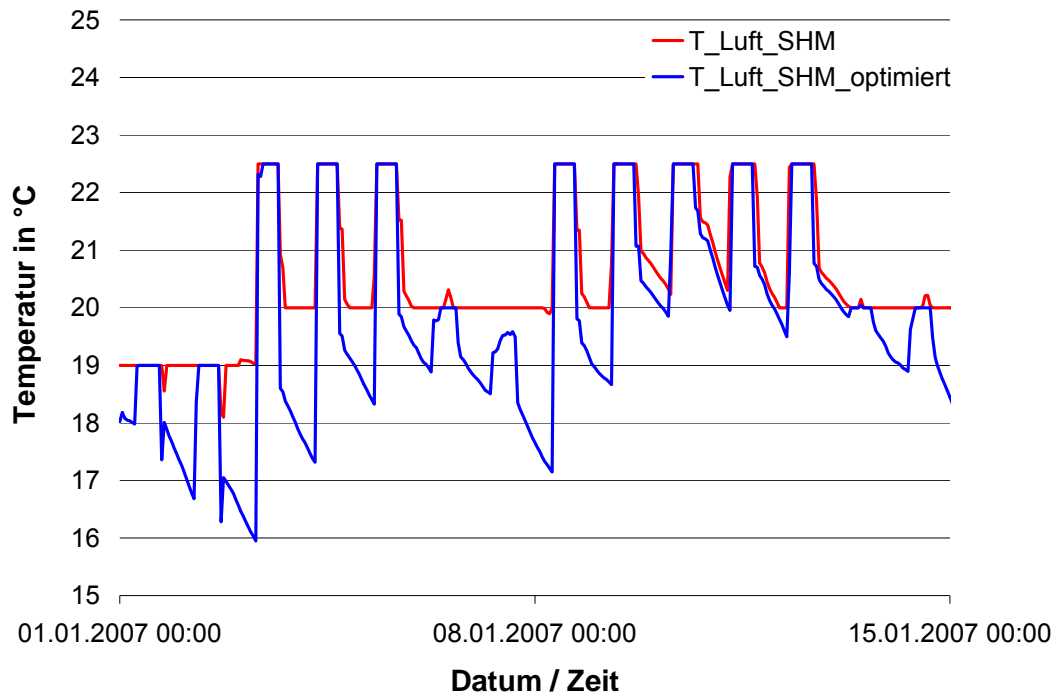


Abbildung 79: Temperaturverlauf vor und nach der Optimierung des SHM Modells

- **Fazit**

Das *SHM* Modell erwies sich sowohl bezüglich der Rechenzeit als auch bei der Erhebung der Simulationsparameter als gut einsetzbar. Dieses Modell ist um den Faktor 100 schneller als das detaillierte *IDA-ICE* Modell.

Die Ergebnisse demonstrieren, dass die Raumlufttemperaturen nur eingeschränkt simuliert werden können, da teilweise kein realitätsgetreues Regelverhalten abgebildet wird. Die gute Übereinstimmung dieses physikalisch basierten Modells mit den Messdaten lässt erwarten, dass das Modell auch gute Extrapolationseigenschaften über den Bereich der Referenzdaten hinaus aufweist.

Das Optimierungsprogramm *GenOpt* wurde mit *IDA* gekoppelt. Als ein erstes Anwendungsbeispiel wurde die Laufzeit für die Umwälzpumpe des Heizkreises optimiert. Dadurch konnte der simulierte Jahresnutzenergiebedarf des Gebäudes um über 10 % gesenkt werden.

Es konnte kein Algorithmus identifiziert werden, der bei allen untersuchten Optimierungsaufgaben das beste Ergebnis lieferte. Die Auswahl muss also je nach Optimierungsproblem individuell, z. B. durch Tests mit verschiedenen Algorithmen, erfolgen. Alle betrachteten Algorithmen sind prinzipiell dazu geeignet, bei der Gebäudeoptimierung angewendet zu werden, da die Unterschiede im Optimum geringer als 0,2 % waren. Die Definition einer geeigneten Ziel- und Bestrafungsfunktion stellte sich als besonders wichtig heraus, da die Optimierungsalgorithmen bei einer ungünstigen Wahl nicht erfolgreich waren.

8.9. Stufe 4 - Ausreißerdetektion mit Black Box Modellen

8.9.1. Begründung für den Ansatz

Um den fehlerfreien oder gar optimalen Betrieb eines Gebäudes zu überwachen und aufrechtzuerhalten, müssen zahlreiche Signale in ihrem zeitlichen Verlauf und ihrer gegenseitigen Abhängigkeit beobachtet und ausgewertet werden (z.B. Energie, Betriebszeiten, Systemtemperaturen, etc.). Für komplexere Gebäude summiert sich die Anzahl der Signale (z.B. entsprechend des Mindestdatensatzes gemäß 7.2) leicht auf mehrere hundert auf.

In der Praxis findet diese Überwachung häufig nur manuell durch das Betriebspersonal statt, indem Anlagen regelmäßig kontrolliert und Betriebszustände stichpunktartig überprüft werden. Die Ergebnisse aus den Demonstrationsgebäuden zeigen, dass dieses Vorgehen offensichtlich nicht ausreicht, um alle Einsparpotenziale zu erkennen. Fehlbetrieb bleibt oft unentdeckt oder wird mit großer zeitlicher Verzögerung erkannt

Für den Gebäudebetrieb ist die Möglichkeit einer automatischen und zeitnahen Erkennung von ungewöhnlichen bzw. fehlerhaften Betriebszuständen daher äußerst interessant.

Wie bereits in 4.2 beschrieben, sind Black-Box-Modelle gut zur Mustererkennung und Detektion von Ausreißern geeignet. Insbesondere die automatische Anpassung der Parameter (Kalibrierung) und der somit geringe Erstellungsaufwand stellen einen großen Vorteil gegenüber White-Box Modellen dar. Die durch den Black-Box-Charakter geringen Analysefähigkeiten der Modelle, sind zwar nachteilig. Andererseits besitzen diese Modelle ein hohes Potential für den praktischen Einsatz, da sie im Prinzip schnell und einfach zu implementieren sind und dem

Betriebspersonal hilfreiche Unterstützung bei der Betriebsüberwachung bieten können.

Allerdings stellt sich in der konkreten Anwendung die Frage, welche Betriebsgrößen sinnvoller Weise überwacht werden sollen bzw. können und welche Art von Black-Box-Modellen sich dafür eignen. Im Rahmen von ModBen wurden verschiedene Ansätze untersucht.

8.9.2. Beschreibung

Prinzipiell ist die Vorgehensweise bei der Anwendung von Black-Box-Modellen wie folgt:

- **Auswahl und kontinuierliche Erfassung der Messdaten**
Die notwendigen Messdaten müssen identifiziert und erfasst werden. Im Fall von ModBen wurde auf Basis des Mindestdatensatzes gemäß 7.2 gearbeitet.
- **Sicherstellen, dass der aktuelle Betrieb fehlerfrei ist**
Da Black-Box-Modelle (zumindest ohne zusätzliche Algorithmik) sich nicht zur Fehlerdiagnose und Optimierung eignen, muss vor der Anwendung geprüft werden, dass der zu überwachende Betrieb „erhaltenswert“ ist und nicht etwa grobe Fehler vorliegen. Im Prinzip eignen sich dafür alle Methoden, die in Kapitel 8.4 bis 8.8 und 8.10 genannt sind. Im einfachsten Falle kommt eine intelligente Datenauswertung und eine manuelle Fehlererkennung zum Einsatz.
- **Modell mit Trainingsdaten kalibrieren**
Das gewählte Modell muss kalibriert werden, d.h., dass Messdaten für die abhängigen und unabhängigen Variablen des Modells in einem Trainingsdatensatz über einen genügend langen Zeitraum und mit der notwendigen zeitlichen Auflösung vorliegen. Mit Hilfe des Trainingsdatensatzes können die Parameter des Modells mit Hilfe geeigneter Methoden identifiziert werden. Im Ergebnis erhält man ein Modell, welches die Zielgröße (z.B. täglicher Energieverbrauch) anhand der gemessenen unabhängigen Größen (z.B. Außentemperatur) genügend genau abbilden kann.
- **Anwenden des kalibrierten Modells zur Betriebsüberwachung.**
Im Anschluss kann das Modell genutzt werden, um den aktuellen Betrieb zu überwachen, indem die Abweichung des aktuellen Messwertes der Zielgröße zum Vorhersagewert des Modells bestimmt und bewertet wird. Bei Abweichungen, die außerhalb eines gewissen Toleranzbereichs liegen, wird eine Unregelmäßigkeit bzw. ein Fehler gemeldet.
- **Modell regelmäßig anpassen, bei veränderten Randbedingungen.**
Schließlich muss unter Umständen eine Anpassung des Modells erfolgen, für den Fall, dass sich der Betrieb signifikant ändert, z.B. durch eine Nutzungsänderung, einen Umbau oder eine Sanierung. Im einfachsten Fall muss dann die Trainingsphase noch mal durchlaufen werden, sobald ein neuer Trainingsdatensatz in genügendem Umfang vorliegt.

Im Sinne des Top-Down-Ansatzes von ModBen wurde zunächst der naheliegende Ansatz verfolgt, den Endenergiebedarf von Gebäuden mit Black-Box-Modellen auf Basis des Mindestdatensatzes zu überwachen.

Als zeitliche Auflösung der Überwachung wurde ein Tag gewählt, da es weder notwendig noch sinnvoll erschien, den Energiebedarf eines relativ trägen Systems wie eines Gebäudes z.B. stündlich zu überwachen. Da somit dynamische und nichtlineare Effekte weitgehend ausgeblendet werden können, wurde als Modellstruktur eine einfache lineare Funktion gewählt. Mathematisch und numerisch aufwendigere Modelle wie Transferfunktionsmodelle und Neuronale Netze wurden daher verworfen. Weiterhin wurde aus ähnlich pragmatischen Gründen darauf verzichtet, mit Vorhersagen zu arbeiten. Mit dem Modell soll also nicht der Energiebedarf des aktuellen oder gar nächsten Tages geprüft werden, sondern der des vorangegangenen Tages. Dies erscheint bei relativ unkritischen Systemen wie Gebäuden und angesichts der aktuellen Praxis des Gebäudebetriebs sinnvoll und angemessen und erspart die Notwendigkeit Vorhersagen für die unabhängigen Variablen zu erstellen.

Im Prinzip kann n somit die Aufgabe gleichgesetzt werden mit der Identifikation einer Energiesignatur auf Basis von Tageswerten des Energieverbrauchs für Wärme und Strom [63].

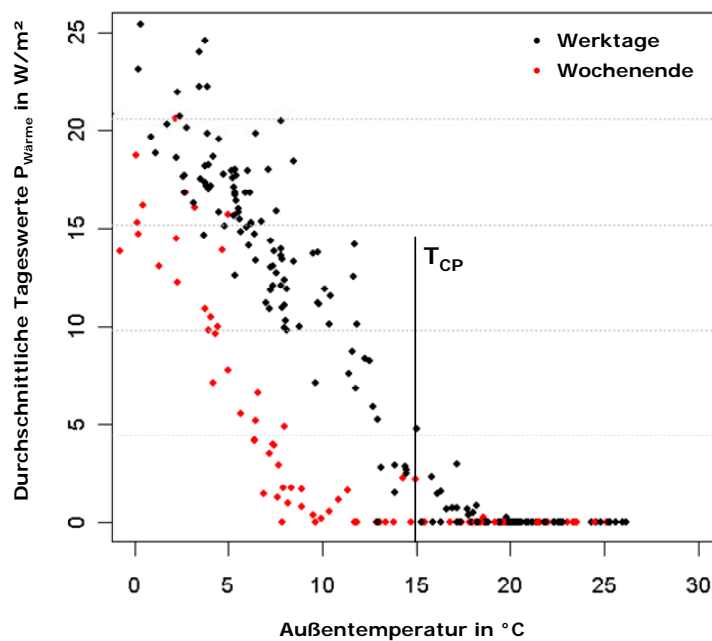


Abbildung 80 Beispiel für eine Energiesignatur für Wärme. Deutlich erkennbar ist die unterschiedliche Charakteristik für Werktag und Wochenenden sowie die jeweilige Heizgrenztemperatur, die im Modell als „Changepoint“ bezeichnet wird.

Das Beispiel zeigt, dass aufgrund der unterschiedlichen Charakteristik von Werktagen und Wochenenden sowie zu verschiedenen Jahreszeiten ein einziges lineares Modell nicht in der Lage ist die Energiesignatur richtig abzubilden. Es ist vielmehr notwendig verschiedene Modelle für verschiedene Typtage (also Tage mit deutlich unterschiedlicher Verbrauchscharakteristik) und über- und unterhalb des Changepoint (bei Heizung: Heizgrenztemperatur) zu erstellen.

Für diesen Zweck wurde eine einheitliche Modellstruktur entwickelt, die je nach Modellbereich entsprechend angepasst wird.

Das Modell für den Wärmeverbrauch ist z.B. wie folgt.

$$P_{heat} = \beta_0 + \beta_1 (T_a - CP) + \beta_2 P_{el} + \beta_3 H_2O + \beta_4 T_i + \beta_5 \Delta T_i + \epsilon$$

Mit

P_{heat} = Tagesmittel der Wärmeleistung in W/m²

T_a = Tagesmittel der Außentemperatur in °C

CP = Changepoint in °C

P_{el} = Tagesmittel der elektrischen Leistung des Stromverbrauchs W/m²

H_2O = Tagesmittel des Wasserverbrauchs in l/h

T_i = Tagesmittel der Innenraumtemperatur in °C

ΔT_i = Differenz der Innenraumtemperatur des betrachteten Tages zum vorangegangenen Tag

Neben der Außentemperatur werden somit weitere Verbrauchssignale wie der Strom- und Wasserverbrauch mit einbezogen. Weiterhin erwähnenswert ist die Einbeziehung der Differenz der Innentemperatur zum Vortag. Es konnte gezeigt werden, dass diese Variable die Qualität des Modells für den Wärmeverbrauch entscheidend verbessert, da somit Anheizvorgänge nach Absenckphasen (z.B.) am Wochenende besser abgebildet werden können.

Um die Anwendung des Modells zu automatisieren, war es notwendig die Identifikation der Typtage und der Changepoints ebenfalls zu automatisieren. Weiterhin war eine Vorprozessierung der Messdaten notwendig, bei der Ausreißer aus den Daten entfernt werden und die Merkmale der Typtage (Tagesmittelwerte sowie Minimal- und Maximalwerte des Verbrauchs) erzeugt und normalisiert werden.

Die nächste Abbildung zeigt ein vereinfachtes Schema des Algorithmus. Ein vollständiges Schema findet sich in Anhang H.

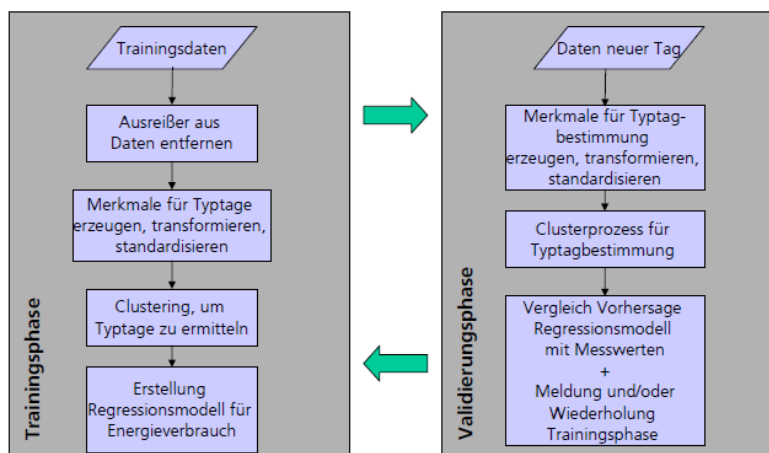


Abbildung 81 Schema des Algorithmus zur Ausreißerdetektion bei den Verbrauchswerten (Energie / Wasser).

8.9.3. Implementierung

Die Implementierung des Algorithmus erfolgte in der Skriptsprache „R“, da diese die notwendigen statistischen Funktionen zur Verfügung stellen konnte.

Die Anwendung des Algorithmus erfolgt ebenfalls Skriptbasiert. Es erfolgte eine Kopplung über geeignete mit der Software von ennovatis, so dass die Funktionalität dort eingebunden werden konnte.

8.9.4. Beispiel / Evaluation in den Demonstrationsgebäuden

Der Algorithmus wurde an verschiedenen Demonstrationsgebäuden erfolgreich getestet.

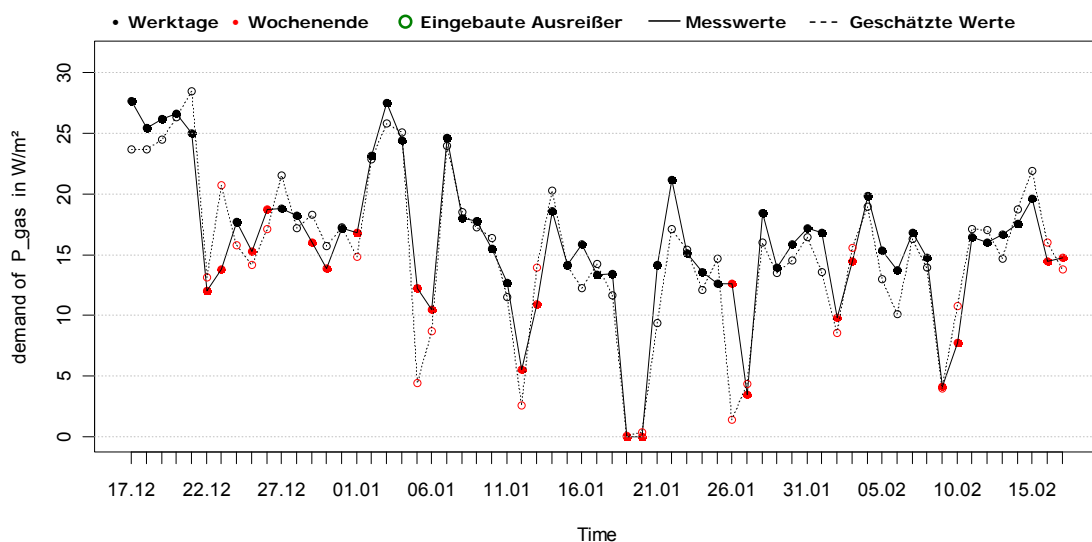


Abbildung 82 Beispiel für die Anwendung der automatischen Ausreißerdetektion für den Wärmeverbrauch (Gas) beim Demonstrationsgebäude in Großpösna. Zu Erkennen ist die gute Übereinstimmung von Modell und Messwerten und die Erkennung eingebauten Ausreißer.

Die Tests verliefen insofern erfolgreich, dass die Verbrauchsprofile für Wärme und Strom sehr gut identifiziert werden konnten und bekannte sowie eingebaute Ausreißer weitgehend detektiert wurden.

Eine umfangreiche und detaillierte Beschreibung des Algorithmus, der Implementierung und der Validierung findet sich in [63]

Allerdings wurde auch offensichtlich, dass der zeitliche Umfang der notwendigen Trainingsdaten im Bereich von 5-7 Monaten liegt. Insbesondere bei signifikanten Änderungen des Betriebs und der dann notwendigen Re-Kalibrierung des Modells erscheinen diese Zeiträume sehr groß und bei Gebäuden, die häufigen Änderungen unterliegen nicht angemessen.

Hier sind weitere Verbesserungen und Entwicklungen notwendig, um auch bei häufigen Betriebsänderungen eine zeitnahe und zuverlässige Ausreißerdetektion zu gewährleisten.

8.10. Kontinuierliche Betriebsanalyse mit den Werkzeugen von ennovatis

In diesem Abschnitt wird der Ansatz von ennovatis beschrieben, wie er im Projekt verfolgt und weiterentwickelt wurde.

8.10.1. Begründung für den Ansatz

Der Ansatz von ennovatis (realisiert in der Software ennovatis controlling, Smartbox Manager und verschiedenen Simulationssystemen) unterscheidet sich von den bisher beschriebenen Ansätzen vor allem dadurch, dass er

- ganzheitlich ist, also alle Phasen des Gebäudelebenszyklus umfasst,
- als Datenquellen sowohl Daten aus der Messdatenerfassung als auch aus der Gebäude- und Anlagensimulation zulässt,
- professionell betrieben und daher auch kontinuierlich weiterentwickelt wird.

Dies erfordert es, alle bisher in diesem Kapitel diskutierten Stufen in einem einheitlichen System zu integrieren. Dies erfolgt komponentenbasiert. Alle Komponenten kommunizieren über ein zentrales Datenmanagement, wobei als zentrales Datenformat die Zeitreihe verwendet wird. Zeitreihen können auf alle bisher beschriebenen Weisen dargestellt werden (Carpet plots sind in Vorbereitung). Die Datenauswertung wird außerdem vom Visual Data Analyser (VDA) unterstützt. Er erlaubt es Daten in den verschiedensten Kontexten zu analysieren.

8.10.2. Beschreibung (Überblick)

In den folgenden Abschnitten beschreiben wir die Grundlagen von ennovatis controlling. Eine detailliertere Beschreibung findet man im Benutzerhandbuch - Stand: Dezember 2010, in das auch die Ergebnisse aus diesem Projekt mit eingeflossen sind. Wir diskutieren insbesondere die

- Die Behandlung von Simulationsdaten (Vom Energiebedarf zu Energiekosten)
- Die Behandlung von Messdaten (Vom Sensor zur Auswertung)
- Das Datenmanagement
- Den Datentyp Zeitreihe (Datenformat für Messungen und Simulation)
- Den Visual Data Analyser

8.10.3. Vom Energiebedarf zu Energiekosten.

Der rechnergestützte Planungsprozess (linke Seite in Abbildung 83) lässt sich in drei Bereiche strukturieren: Die Gebäudesimulation, die Anlagensimulation und die Betriebsüberwachung mit -optimierung.

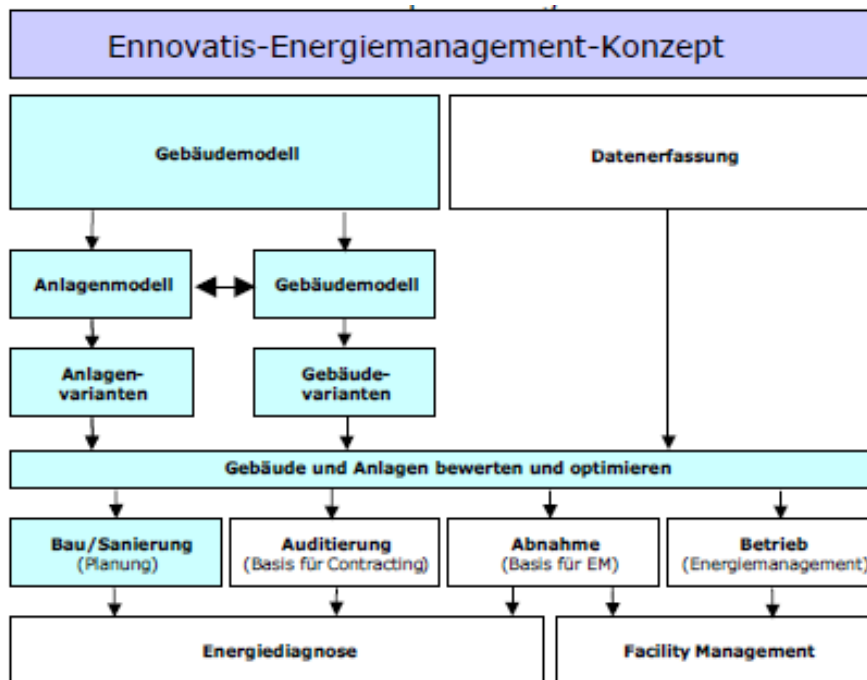


Abbildung 83: Grundstruktur und Anwendungsbereiche der ennovatis Software

Mit der ennovatis Software wird ein System zur Verfügung gestellt, mit dem die Bereiche „Gebäudesimulation“, „Anlagensimulation“ sowie die „Betriebsüberwachung und –Optimierung“ in einem durchgängigen System integriert werden.

Die Planning-Version umfasst die Bereiche Gebäude- und Anlagensimulation, die Controlling-Version die Betriebsüberwachung sowie die Betriebsoptimierung.

Die Aufgaben von ennovatis Controlling liegen in der Erfassung, Speicherung und Vorverarbeitung von Messdaten jeder Art. Die Vorteile dieses Systems liegen in seiner Offenheit (COM) sowie in seiner Skalierbarkeit. Mit Hilfe von ennovatis Controlling lassen sich beliebige Messdaten, von unterschiedlichsten Sensoren und Typen (Stromzähler, Temperaturmessgeräte, GLT-Systeme, ...) erfassen und verwalten. Das ennovatis Controlling ist Hersteller unabhängig. Die Kommunikation zu einer Messanlage, DDC-Anlage, GLT-Rechner, Datenlogger, oder sonstigen Datenquellen übernehmen Treiber.

Folgende Typen werden vom ennovatis Controlling direkt unterstützt:

- OPC (Anbindung an die GA verschiedener Hersteller)
- M-Bus (alle Hersteller, alle Geräte, nach DIN EN 13757-2,3)
- Text basierte Dateien (z. B. CSV, DBase III, ...)
- OleDb (z. B. SQL Server, Oracle, ...)
- Verschiedene Datenlogger
- ennovatis Smartbox

Weitere Schnittstellen können je nach Anforderung durch das offene und anpassungsfähige Schnittstellensystem innerhalb weniger Tage zur Verfügung gestellt werden.

Die wichtigsten Merkmale des Systems in Stichworten:

- Herstellerunabhängig
- Parallele Datenaktualisierung (integrierte Schnittstellenverwaltung)
- Hoch performante sowie effiziente Messdatenarchivierung
- Frei definierbare Messdatenverdichtung
- Integrierte und konfigurierbare Einheitenumrechnung auch zeitabhängiger Größen
- Integrierte Mittelwertbildung
- Mehrbenutzerfähig
- Komponentenbasiert

Die Messdaten aus den verschiedenen Energiemengenzählern (Strom, Wärme, Kälte, Wasser) werden bei dieser Installation von Datenloggern aufgenommen und in regelmäßigen Intervallen aufgezeichnet. Per Modem oder einer Ethernet-Verkabelung werden die aufgezeichneten Daten zu einer Energiemanagement-Zentrale (EMS) übertragen. Hier werden sie überprüft und im ennovatis Controlling Archiv gespeichert. Der gespeicherte Datenbestand kann anschließend über verschiedene Auswertungen in eine für den Benutzer brauchbar

8.10.4. Vom Sensor zur Auswertung

Das nachfolgende Datenflussdiagramm zeigt den Weg vom Messwertaufnehmer (Sensor) über die einzelnen Hard- und Softwarestationen bis hin zum Auswerteprogramm (rechte Seite in Abbildung 84)

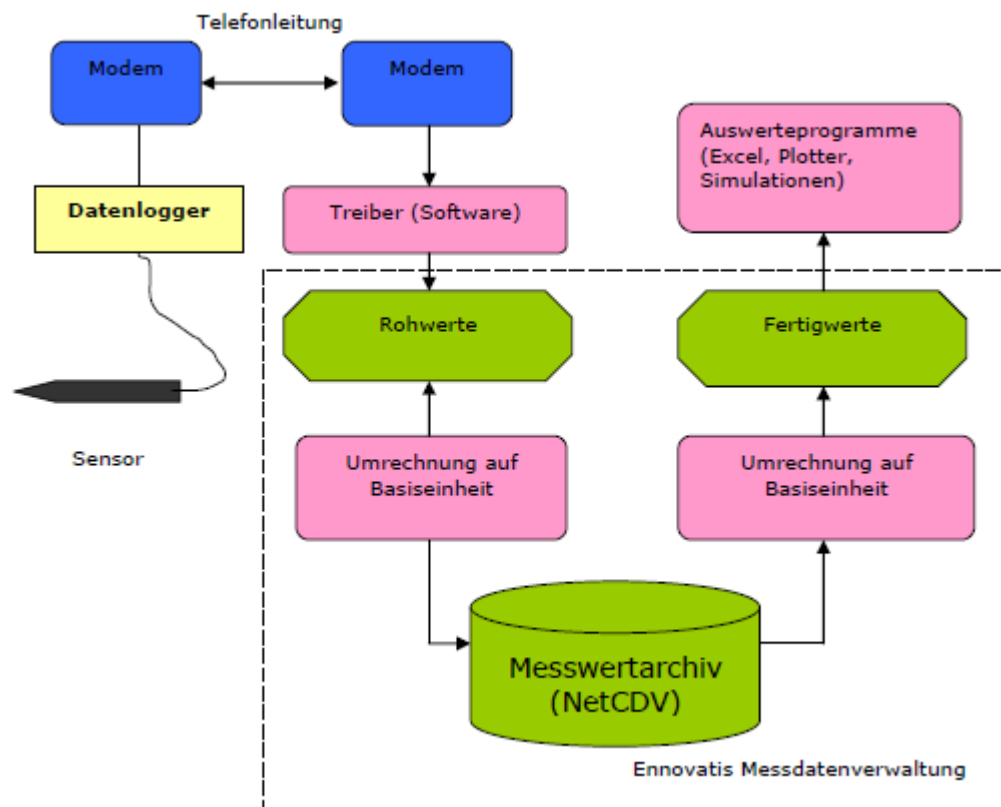


Abbildung 84: Grundstruktur ennovatis Controlling

In der Praxis existieren verschiedene Sensoren und Techniken, um physikalische Größen aufzunehmen. Gewöhnlich werden diese Sensoren entweder in einem Datenlogger erfasst und in zyklischen Perioden oder nach Bedarf, z. B. nach einer Veränderung, im Speicher des Loggers abgelegt, oder sie liegen in einem lokalen Netzwerk, einem Feldbus ohne Datenlogger vor.

Wir unterscheiden daher zwei grundsätzlich verschiedene Arten von Datenerfassungssystemen: Speichernde Datenquellen (Datenlogger), und Nicht-speichernde Datenquellen (z. B. Feldbusysteme ohne interne Logger)

- nach "Polling" Prinzip (es wird ständig nachgefragt ob sich etwas geändert hat),
- nach "Advising" Prinzip: Die Datenquelle benachrichtigt das ennovatis Controlling automatisch bei einer Änderung.

Mit ennovatis Controlling können beide Arten gleichermaßen erfasst werden.

Im ersten Fall (Abbildung 84) muss der meist weit entfernte Datenlogger über Modem, GSM oder ISDN zyklisch nach bestimmten Regeln angewählt werden, um seinen internen Speicher auslesen zu können.

Im zweiten Fall benötigt ennovatis Controlling eine kontinuierliche Verbindung zum lokalen - oder per Standleitung entfernten - Feldbusystem, um die dort vorliegenden Messwerte online abfragen und abspeichern zu können.

ennovatis Controlling wird damit zum flexiblen 'Software'-Datenlogger, der nach definierbaren Regeln Messwerte direkt erfassen und archivieren kann.

8.10.5. Das Datenmanagement

Das Datenmanagement von ennovatis Controlling hat folgende Aufgaben:

- Verwalten der gespeicherten Messdaten (Archiv):
- Anlegen neuer Archive
- Schreiben und lesen der Archivdaten
- Packen (Verdichten bzw. Löschen) von Messdaten
- Selbstständige zeitgesteuerte Aktualisierung des Archivs
- Aktualisierung auf Anforderung bei noch fehlenden Daten (konfigurierbar)
- Messwertumformungen (Mittelwertbildung, Einheiten Umrechnung, Formatierungen, ...)

Mit diesen Aufgaben ist diese Komponente einer der wichtigsten zentralen Bausteine von ennovatis Controlling.

Abbildung 85 veranschaulicht den internen komponentenbasierten Aufbau:

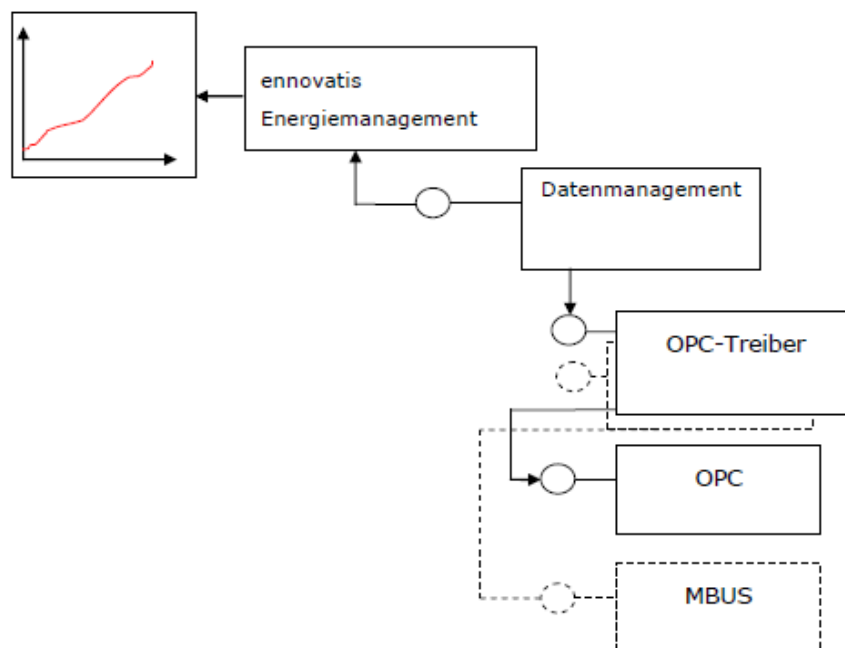


Abbildung 85: Komponentenbasierter Aufbau von ennovatis Controlling

Die Datenmanagementkomponente wird vom ennovatis Controlling über benutzerfreundliche Menüs konfiguriert und überwacht.

Sämtliche Metadaten, die zum Betrieb notwendig sind (Messanlagen, Kanäle, Zeitsteuerungsdaten, Archivpfade, Treiberdaten, ...), werden vom Datenmanagement in einer relationalen Datenbank gespeichert, während die Messdaten selbst in einem hoch effizienten Plattform unabhängigen Format in einzelnen Kanaldateien gespeichert werden (NetCDF).

8.10.6. Datenformat für Messungen und Simulation

- **Zeitformat**

Zeiten werden im Microsoft-konformen Format „double“ gespeichert. Dabei ist der ganzzahlige Teil des Wertes die Anzahl der Tage seit dem 31.12.1899. die Zahl "1.0" repräsentiert demnach den „01.01.1900 00:00:00“ (vgl. MS-Excel). Der Bruchteil eines Datums entspricht somit dem Bruchteil eines Tages.

- **Zeitbereich**

Ein Zeitbereich ist gekennzeichnet durch die Angabe des Beginns und des Endes, innerhalb dessen ein Wert Gültigkeit hat (Mittelwert).

- **Zeitreihe**

Eine Zeitreihe ist die chronologisch aufsteigende Aneinanderreihung einzelner Zeitbereiche. Das Ende jeden Zeitbereichs ist dabei gleichzeitig der Beginn des nächsten. Aus diesem Grund wird der Wert des ersten Zeitpunktes einer Zeitreihe ignoriert. Er stellt den Beginn des ersten Zeitbereichs und somit der gesamten Zeitreihe dar.

Beispiel:

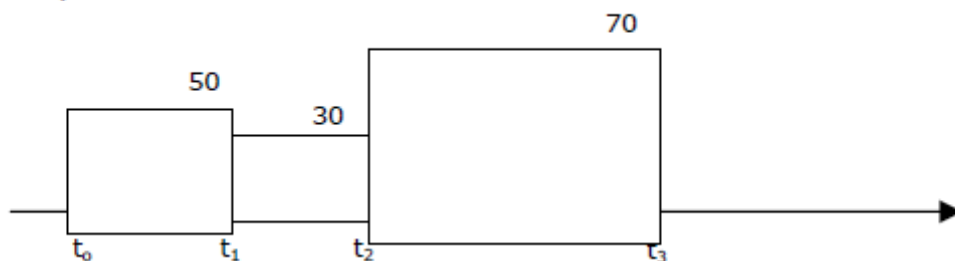


Abbildung 86: Beispiel für Zeitreihe

Der zu t_0 gehörende Wert ist der erste Wert dieser Zeitreihe und wird beim Anlegen automatisch generiert. Er ist ungültig und wird deshalb ignoriert. 50 ist hier als Beispiel der erste erfasste Wert zum Zeitpunkt t_1 .

Zum Zeitpunkt t_2 wurde der Wert 30 erfasst, zum Zeitpunkt t_3 der Wert 70. Für den Zeitraum von t_0 bis zu t_1 wird der erfasste Wert, im Beispiel 50, als Mittelwert gesetzt. Genauso bei t_2 und t_3 . Messdaten sind zu beliebigen Zeitpunkten erfassbar.

Um Daten aus verschiedenen Zeiträumen mit unterschiedlichen Erfassungszyklen (im Extremfall wert- bzw. ereignisabhängige Speicherung) vergleichen zu können, ist es wichtig, gleiche Zeiträume zu schaffen. Dies wird durch die bereits in der Datenbank integrierte Mittelwertbildung erreicht. Je nach Darstellungszeit werden entsprechende Grafiken verfügbar.

Beispiel:

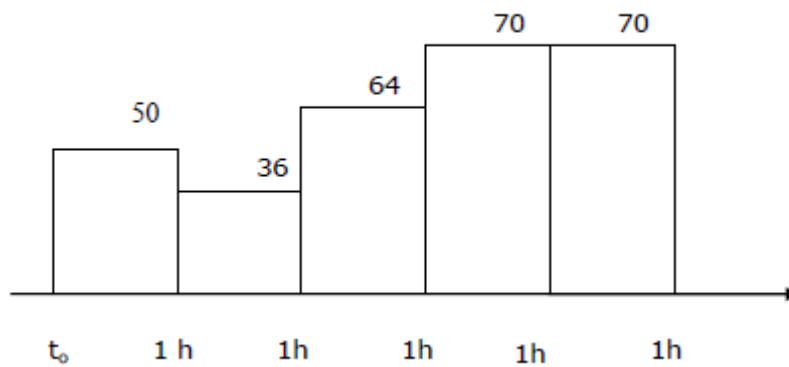


Abbildung 87: Mittelwertbildung bei Zeitreihen

Die ebenfalls integrierte Einheiten Umrechnung zieht Vergleiche zwischen den verschiedensten Datenquellen zum Kinderspiel.

- **Werte**

Werte werden mit 8 Byte Genauigkeit gespeichert (double). Darüber hinaus werden zu jedem gespeicherten Messwert zusätzlich statistische und verarbeitungs-spezifische Attribute abgelegt, wie z. B.: gelöscht, ungültig, von Hand geändert, Gültigkeitsgrenze über- oder unterschritten, gepackt, Original, usw.

8.10.7. Visual Data Analyser VDA

Der Visual Data Analyser – kurz: VDA – wertet gemessene und simulierte Daten mit frei bestimmbar Formelausdrücken aus. Die Ergebnisse einer Auswertung können entweder als neue Datenpunkte gespeichert werden, oder generieren direkt eine Benachrichtigung in Form eines Nachrichtenfensters, einer Email, einer SMS oder eines beliebigen Berichts, welcher gleich per Kopie oder FTP im Internet veröffentlicht werden kann.

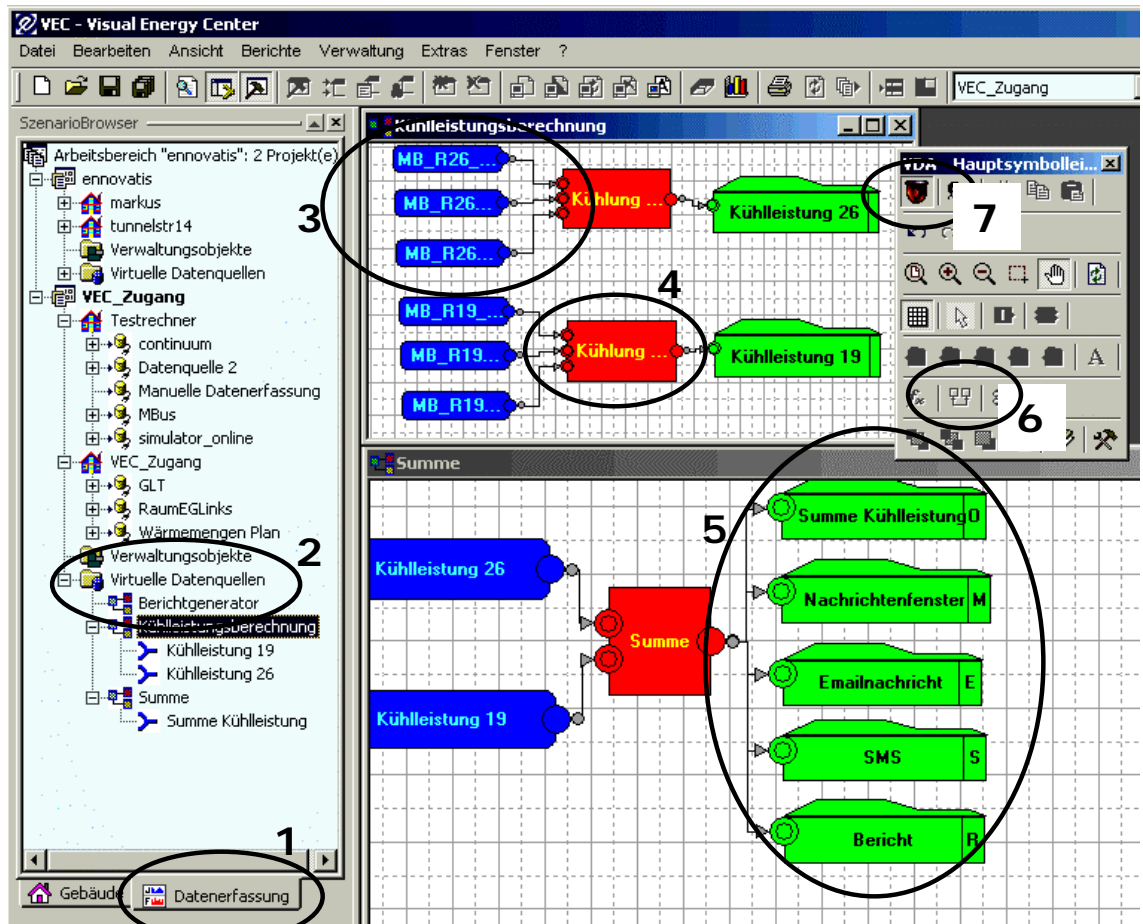


Abbildung 88: Elemente des VDA

Analyseblätter werden im Reiter Datenerfassung (1) unterhalb der Virtuellen Datenquellen (2) neu angelegt. Nach der Eingabe eines Namens können nun einfach per Drag&Drop Datenpunkte sowohl aus den Simulationen als auch aus den Messdatenquellen, auf das Analyseblatt gezogen werden (3). Diese Datenpunkte (blau) können nun mit Hilfe von Verbinden (6) Prozessmodulen (4) zugeführt werden. Eine oder mehrere Formeln bestimmen die Ausgangsergebnisse, welche entweder verschiedenen Ausgängen (5) oder weiteren Prozessen zu-geordnet werden können.

8.10.8. Implementierung

Für den ersten Einsatz mit einigen Datenquellen bzw. Messkanälen (< 100) reicht bereits ein handelsüblicher PC ohne besondere Extras.

Unterstützte Betriebssysteme: Windows XP Professional SP3 32 Bit, Windows Vista Ultimate 32 Bit, Windows 7 Home Premium 32 Bit, Windows 7 Professional 32 Bit, Windows 7 Enterprise 32 Bit, Windows 7 Ultimate 32 Bit, Windows Server 2003

- **Hardwareanforderungen:**

- Ab Pentium Dual Core (2 GHz), 2 GB Arbeitsspeicher
- 19" LCD Monitor oder gleichwertig
- Internet Explorer 8 oder höher mit Skriptunterstützung,
- Administratorrechte, sowie mindestens
- 1 GByte freier Plattenplatz für anfallende Messdaten.

- **Softwareanforderungen:**

- Internetexplorer ab Version 8.0:
- Deutsches Language Pack
- Sicherheitseinstellung ohne Einschränkungen von Popups, ActiveX-Steurelementen, VBSkripthosts, dynamisches Nachladen von VB-Skripthosts und weiteren HTML-Dateien

- **Betriebssystemeinstellungen:**

- Lokale Administratorrechte
- Deutsches Betriebssystem
- Bei Domaincontrollern sind gesonderte Domainrichtlinien erforderlich, die keine Einschränkungen in den hier aufgeführten Voraussetzungen enthalten.
- Keine Einschränkungen im Virenschanner für die lokale Ausführung von Dateien der ennovatis Systemebene und wie unter den Voraussetzungen für IE, JAVA und den lokalen Diensten aufgeführt.
- Bei Vista/Windows 7 muss die Benutzerkontensteuerung deaktiviert sein.
- Für Server ab 2003 ab ServicePack 2: Subdomain für die Controlling Systemebene, die keine Vererbung aus der Hauptdomain beinhaltet.

- **Verfügbarkeit**

- Ennovatis Controlling ist im Rahmen von F&E Projekten des Bundes frei verfügbar

8.10.9. Beispiel / Evaluation in den Demonstrationsgebäuden

Die Validierung unseres Ansatzes erfolgte am Beispiel des ennovatis Gebäudes in Großpösna (siehe Kapitel 8.1.2)

- **Schritt 1 Vergleich mit Rechnungen des FhG-ISE**

FhG-ISE hat für ModBen als Basisversion ein statistisches Verfahren (siehe 8.9) vorgeschlagen. Es basiert auf einer Analyse der Verbrauchsdaten durch Signaturen (Scatterplots) und der Erstellung von Regressionsgeraden, bei denen die Datenanpassung nach Typtagen unterschieden und durch Setpunkte unterbrochen wird. In Abbildung 89 sind 4 verschiedene Betriebszustände sichtbar. (Typisierung Werkzeuge und Wochenende, Change-Points mit Abschaltung im Sommer (ca. 15 °C). Darauf aufbauend werden dann Regressionen bestimmt, mit deren Hilfe man aus den Außentemperaturen auf den Bedarf schließen kann.

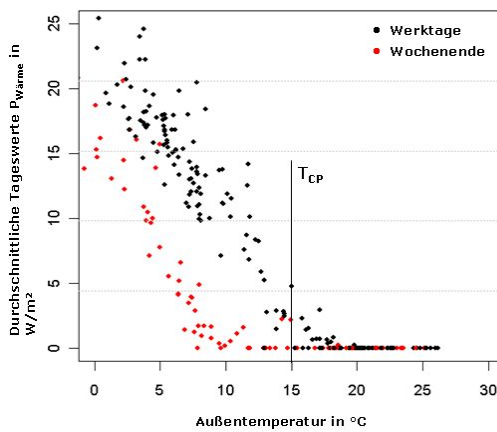


Abbildung 89: Typische Darstellung der Ausgangsdaten für das Basisverfahren

In den Abbildung 90 und Abbildung 91 wird das Verfahren mit dem von ennovatis verglichen. Man sieht beide Algorithmen können den Energieverbrauch mit hoher Zuverlässigkeit identifizieren und Fehler (Punkte 1 bis 3) erkennen.

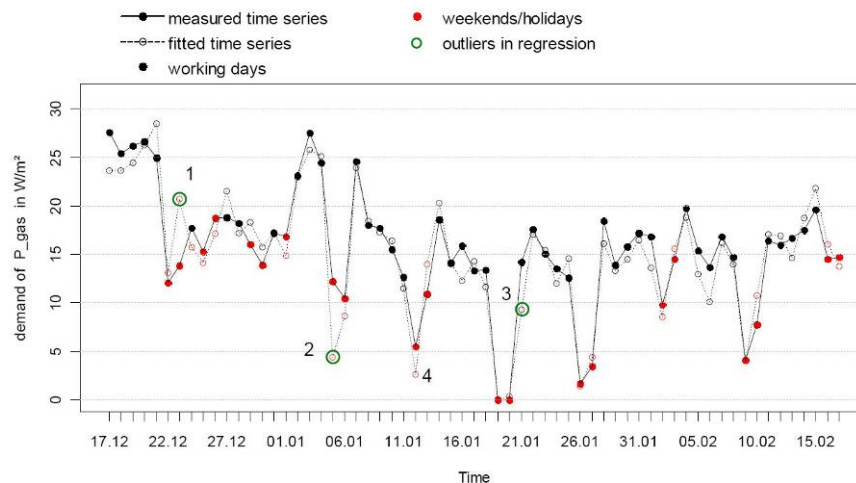


Abbildung 90: Vergleich Verbrauch und Berechnung Statistik

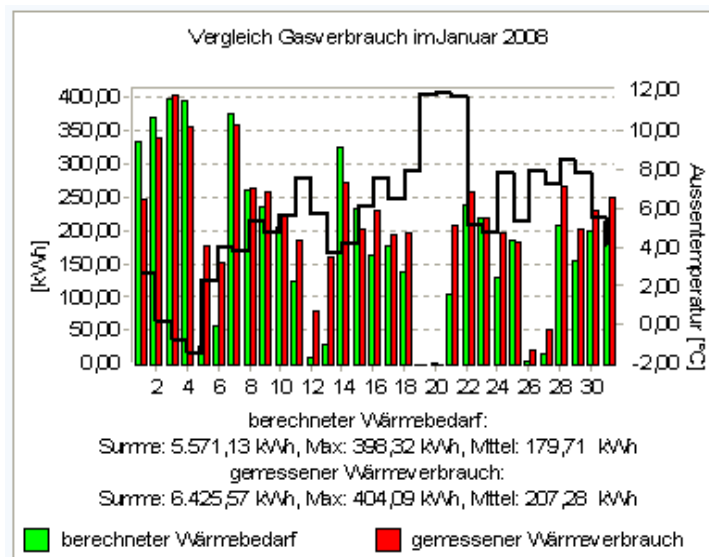


Abbildung 91: Vergleich VEC Basis DIN 18599

Wie bei allen statistischen Verfahren benötigt auch das FhG-ISE Verfahren Stichproben, bei denen alle relevanten Einflussparameter genügend genau erfasst werden können. Für die Überwachung von Gebäuden bedeutet das konkret:

- Zum Training sind mindestens 2-3 Monate mit Daten ohne deutliche (nutzerbedingte) Änderungen erforderlich.
- Bei signifikantem Wechsel des Betriebs muss Training neu erfolgen. Dadurch wird der Einsatz des Verfahrens sehr zeitaufwendig.

• Schritt 2 Kontinuierliche Betriebsanalyse mit intelligent metering

In der Literatur firmieren die expertenbasierte graphische Auswertung unter dem Begriff intelligent metering. Wir zeigen ihre Anwendung am Beispiel einer Analyse des Heizsystems in Großpöna.

Zum Ausklang der Heizperiode 2008/09 Anfang April wurde die Heizanlage ganz ausgestellt, weil sie trotz milder Witterung zu oft lief, da die einfache Regelung den Anforderungen nicht gerecht wurde. An einigen Tagen im April bis Anfang Mai mit sehr verhaltenen Außentemperaturen wurde daher per Hand die Heizanlage jeweils kurz in Betrieb genommen.

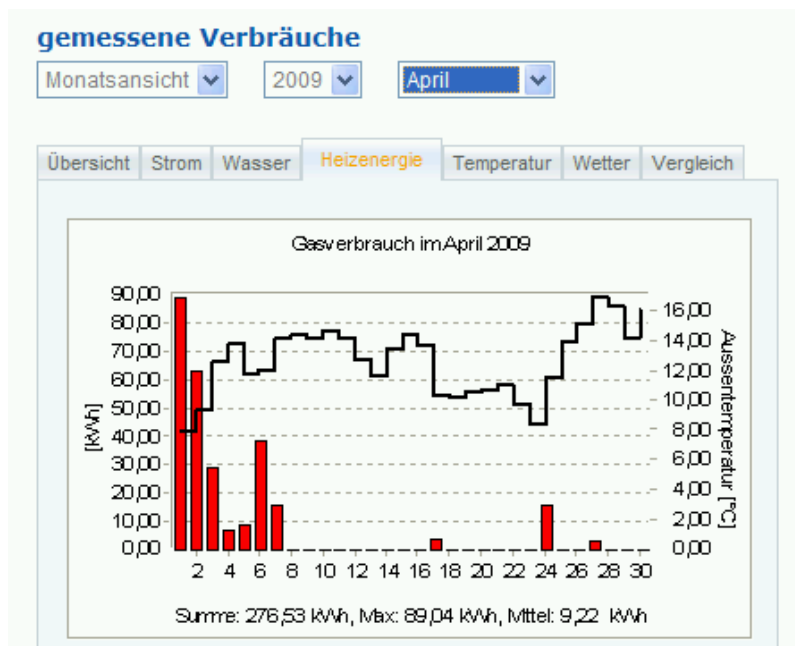


Abbildung 92: Gasverbrauch im April 2009

Zwar lässt sich die Anlage nach der Außentemperatur steuern. Per Schaltuhr können einige Grundvarianten ausgewählt werden, z.B. ist ein Tages- und Nacht- bzw. Wochenendbetrieb einstellbar, aber die Zuverlässigkeit der Regelung lässt zu wünschen übrig, so dass die Effekte letztlich gering sind.

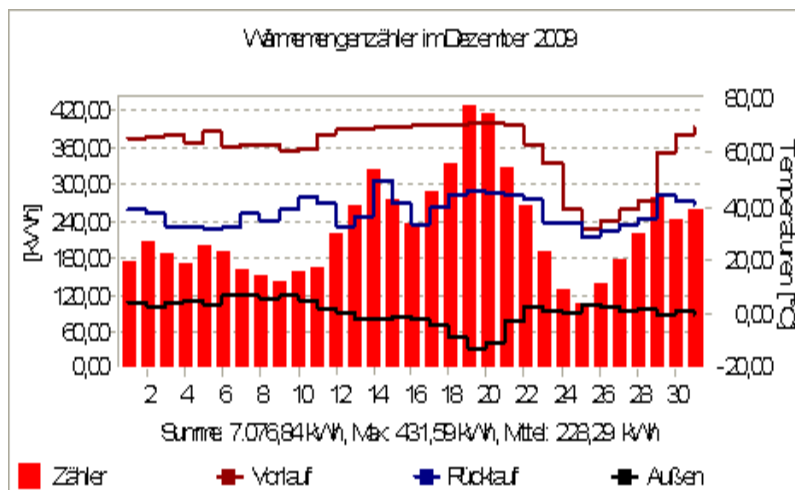


Abbildung 93: Gasverbrauch Dez. 2009

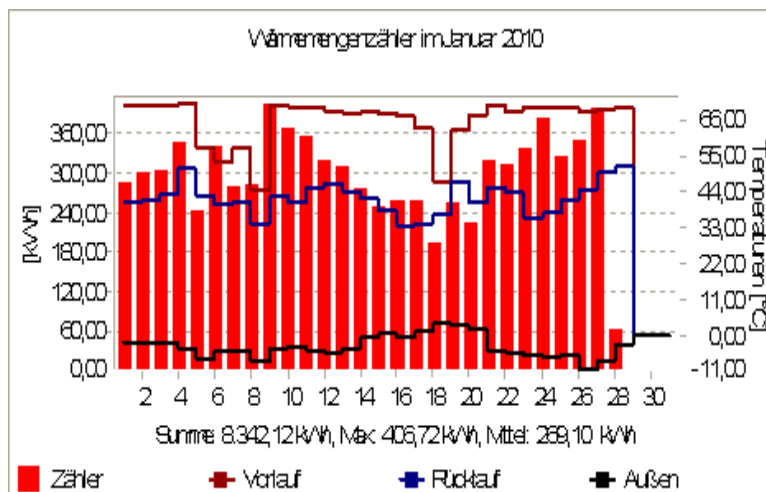


Abbildung 94: Gasverbrauch Jan. 2010

Um zumindest während der Weihnachtsruhe zum Jahreswechsel 2009/10 Einsparungen zu erreichen, wurde am 23. Dez. 09 die Vorlauftemperatur auf 50 °C abgesenkt, die Zeitschaltung auf Mo.-Fr. 8-18 Uhr gestellt und im WE-Betrieb auf 10-18 Uhr.

Wegen kalter Witterung konnte dieser abgesenkte Betrieb über den Jahreswechsel aber nicht durchgehalten werden. Am 29.12. musste auf Vollbetrieb umgestellt werden mit Vorlauftemperatur 60 °C.

Am Di., 5.1.2010 ist zum Feierabend und über Nacht die Heizung ganz ausgefallen, am nächsten Morgen arbeitete sie aber wieder normal. Am 7.1.10 wiederholte sich der Ausfall erneut. Da sie am 8.1. aber nicht wieder in Funktion ging, wurde sie am Vormittag vorläufig repariert. Um die Heizung besser regeln zu können, wurde im Laufe des Jahres 2010 die Idee der adaptiven Heizungsregelung umgesetzt (siehe Kap. 11.4).

- **Schritt 3 Kontinuierliche Betriebsanalyse - Vergleich von Bedarf und Verbrauch**

In den vorigen Schritten haben wir uns mit graphischen und statistischen Verfahren zur Betriebsüberwachung beschäftigt. Diese Verfahren ergänzen wir in diesem Schritt um Methoden zur regelbasierten Betriebsüberwachung.

Dazu wurden Bedarfsrechnungen auf Basis stündlicher Werte mit VEC durchgeführt. Tagesaktuelle Berechnungen des Bedarfs sind jetzt möglich und können über das Demoportale eingesehen werden. Als Beispiel zeigen wir in Abbildung 95 einen Vergleich zwischen Wärmebedarf und Wärmeverbrauch im 1. Halbjahr 2009, wie er im EM Portal von ennovatis (<http://demoportal.ennovatis.de/grosspoesna/gemessene.php>) dargestellt wird.

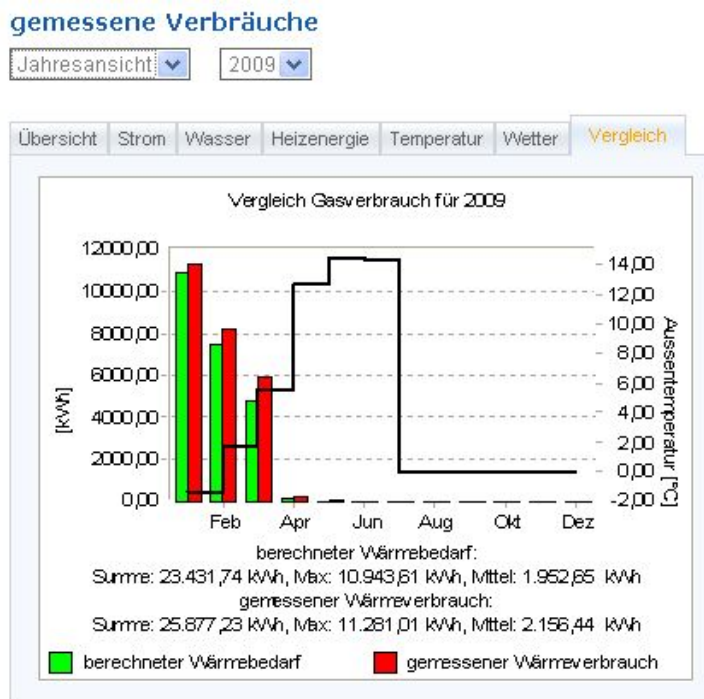


Abbildung 95: Vergleich Wärmebedarf und Wärmeverbrauch 1. Halbjahr 2009

Um eine kontinuierliche Betriebsanalyse durchführen zu können, muss man neben den aktuellen Wetterdaten auch die aktuelle Nutzung kennen. Für einfache Gebäude, wie etwa für das Demogebäude Großpösa, können der tatsächliche Mitarbeiterstand und die tatsächliche Anwesenheit etwa mit Hilfe der stündlichen Wasserverbräuche ermittelt werden. Bisher ergaben sich folgende Ergebnisse aus den Arbeiten zum Vergleich Bedarf und Verbrauch:

- Verbrauchskontrolle ist unabdingbare Voraussetzung für effektiven Betrieb von Gebäuden
- Erstmalige Anpassung Verbrauch an Bedarf bringt hohe Einsparungen (hier bis zu 40 %). Dazu sollten Werkzeuge verbessert werden.
- Zeitnahe Koppelung Bedarf – Verbrauch ist möglich, dadurch frühzeitige Vermeidung von Betriebsfehlern und Verschwendungen wegen etwaiger Änderungen im Betrieb und/oder Bedarf
- Vorhersagegenauigkeit von Individualrechnungen auf Basis von Monats- und Stundenwerten
 - Jahresbasis Individualrechnung 5 %
 - Monatswerte Individualrechnung 10 %
 - Tagesrechnung Regressionsverfahren 10 %.

Die in Abbildung 95 festgestellten Abweichungen von Bedarf und Verbrauch deuten auf einen nicht optimalen Betrieb hin. Hier erwarten wir ein Einsparpotential von ca. 10 %, was auch durch Analysen des Betriebes bestätigt wird.

9. Ergebnisse der Analyse

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der Analyse der Gebäude und die identifizierten bzw. umgesetzten Verbesserungs- und Einsparpotenziale dargestellt.

Die Analyse der Gebäude wurde im Schwerpunkt anhand der Datenvisualisierung vorgenommen. Die daraus gewonnenen Erkenntnisse sind in die Evaluation der Ansätze und Werkzeuge, die in Kapitel 8 dargestellt worden sind eingeflossen.

Da die Analyseschritte der Stufen 1 (Benchmarking) und Stufe 2 (Ermittlung Zielwert des Energieverbrauchs) sich nur bedingt als hilfreich für die Analyse erwiesen haben (siehe 8.2 und 8.3), war die systematische Auswertung der Messdaten der nächste Schritt in der Systematik gemäß Kapitel 7.

Die anderen in Kapitel 8 beschriebenen Ansätze wurden jeweils an ausgewählten Gebäuden erprobt. Die Analyse anhand der systematischen Datenvisualisierung diente in diesem Sinne dazu, den Betrieb der Gebäude im Detail zu erfassen, um eine Evaluation anderer Verfahren im realen Betrieb überhaupt zu ermöglichen.

Im Rahmen des Projekts wurden für die Gebäude umfassende Berichte bzw. Präsentationen für die Gebäudebesitzer bzw. Betreiber erstellt. An dieser Stelle werden die Ergebnisse stichpunktartig benannt.

9.1. ennovatis, Großpöna

Da dieses Gebäude von der technischen Ausstattung sehr einfach ist, war es einerseits in vielen Fällen sehr gut zum Testen von neuen Methoden geeignet aber andererseits konnten hier erwartungsgemäß nur wenige Verbesserungspotenziale identifiziert werden. Darüber hinaus wurde das Gebäude auch schon vorher durch ennovatis messtechnisch erfasst und überwacht, so dass auch schon vor Beginn von ModBen hier ähnliche Methoden ausprobiert wurden.

9.1.1. Energie- und Wasserverbrauch

- Hier ist eine eindeutige Nacht- bzw. Wochenendabsenkung der Vorlauftemperatur des Heizbetriebs zu erkennen. Es ist jedoch bereits in den Visualisierungen erkennbar, dass auch während des Absenkbetriebs eine nennenswerte Wärmemenge an das Gebäude übergeben wird. Eine Nacht- bzw. Wochenendabschaltung erscheint daher empfehlenswert.
- Der Strombedarf zeigt keine Auffälligkeiten für ein in dieser Hinsicht weitgehend manuell betriebenes Gebäude. Am Strom sowie am Wasserbedarf können Schwankungen der Belegungsdichte über die Jahre beobachtet werden.
- Der Kühlbetrieb des Serverraums erscheint normal und auf Grund der geringen Größe weitgehend vernachlässigbar.

9.1.2. Heizkreise

- Hier wurde eine auffallend geringe Spreizung zwischen Vor- und Rücklauftemperatur beobachtet, die genauer analysiert wurde (siehe oben). Dabei wurden sowohl einfache Berechnungen als auch detaillierte Gebäudesimulationen eingesetzt. Als wahrscheinliche Ursache konnte ein

mangelhafter hydraulischer Abgleich bei Heizkörpern in WCs identifiziert werden, in denen (sehr) häufig das Fenster gekippt ist.

9.1.3. Mögliche / Realisierte Verbesserungs- und Einsparpotenziale

- Verschiedene Methoden haben gezeigt, dass durch eine geeignete Realisierung einer Heizungsabschaltung nachts und am Wochenende ca. 10 % eingespart werden könnten (siehe oben). Die Abschaltung konnte mit der bestehenden Heizungsregelung jedoch nicht realisiert werden. Ennovatis hat daher im Zuge der Verwertung der Erkenntnisse aus dem Projekt eine adaptive Heizungsregelung entwickelt. Darüber und die damit erzielten Ergebnisse wird im Kap 11.4 berichtet.
- Eine Abschätzung des Einsparpotentials durch einen hydraulischen Abgleich hat sich als wirtschaftlich unrentabel erwiesen. Auf die Umsetzung dieser Maßnahme wurde daher verzichtet.

9.2. DVZ Barnim

Die äußerst komplexe haustechnische Anlage des DVZ Barnim in Verbindung mit organisatorischen Schwierigkeiten, die sich z.T. aus dem schwierigen Verhältnis des Bauherrn mit dem Planer ergaben, haben die Analyse des Gebäudes erschwert.

Hinzu kam, dass die Übergabesysteme für Wärme und Kälte z.T. unterdimensioniert sind, so dass die Anlagen durch den Betreiber teilweise weitab des geplanten Sollbetriebs gefahren wurden, um den thermischen Komfort sicherzustellen. Dennoch haben sich zahlreiche Ansatzpunkte für Verbesserungen ergeben.

9.2.1. Energie- und Wasserverbrauch

- Keine eindeutige Nacht- und Wochenendabsenkung Heizbetrieb zu erkennen.
- Z.T. gleichzeitiger Heiz- und Kühlbetrieb (zwischen 10-15 °C Aussentemperatur)
- Geringer Anteil Direktkühlung über die Erdsondenanlage mit der Folge, dass die Wärmepumpe im Teillastbetrieb mit schlechtem Nutzungsgrad betrieben wurden
- Wärmepumpen sind sowohl für den Heiz- als auch für den Kühlbetrieb deutlich zu groß dimensioniert und arbeiten dadurch praktisch immer in Teillast.

9.2.2. Heizkreise

- Wärmeübergabe erfolgt durch Radiatoren, Fußbodenheizung und über Heizregister in der RLT. Die Planung hat vorgesehen, dass die Grundlast über die RLT-Anlagen bei konstanter und moderater Einblastemperatur bereitgestellt wird.
Real ist zu beobachten, dass die Heizkörper offensichtlich zu klein ausgelegt wurden, da Komfortprobleme aufgetreten sind
Im Anlagenbetrieb ist erkennbar, dass sie bei konstanter Vorlauftemperatur, Spreizung und Pumpensignal im Winter praktisch immer bei voller Leistung betrieben werden. Zusätzliche Heizleistung muss somit über die RLT-Anlagen bei hohen Zuluftströmen und –Temperaturen eingebracht werden.
Die dafür notwendigen hohen Vorlauftemperaturen wirken sich wiederum

negativ auf die Nutzungsgrade der Wärmepumpen aus, der über weite Strecken bei ca. 2 lag (ohne Berücksichtigung Verteilung!).

- Weiterhin wurden zur Begrenzung der Komfortprobleme praktisch alle Zeitprogramme für die Heizungsverteilung außer Kraft gesetzt

9.2.3. RLT-Anlagen

- Um die fehlende Leistung der zu gering ausgelegten Heizkörper zu kompensieren, wurden die RLT-Anlagen mit deutliche erhöhten Zulufttemperaturen und ohne Zeitprogramm (Dauerbetrieb) gefahren. Auch im Sommer wird versucht über den Dauerbetrieb der Lüftung zusätzliche Kühlleistung einzubringen. Gleichzeitig sind die Wärmerückgewinnung und das Kühlregister offensichtlich nicht in der Lage, ausreichend Kühlleistung bereitzustellen, um die Zulufttemperatur unter das Niveau der Abluft zu kühlen. Beides führt zu deutlich erhöhtem Strombedarf für die Lüftung
- Um weiterhin fehlende Heizleistung und Kühlleistung zu kompensieren wurde versucht mit erhöhten Umluftanteilen zu fahren. Eine Unterschreitung der hygienischen Mindestluftmenge wurde dabei zeitweise in Kauf genommen.
- Der Nutzungsgrad der Wärmerückgewinnung lag aus ungeklärten Gründen lediglich bei 30% (bei geschlossener Umluftklappe)

9.2.4. Mögliche / Realisierte Verbesserungs- und Einsparpotenziale

Die falsche Dimensionierung der Übergabesysteme im DVZ Barnim und deren negative Auswirkungen auf den Komfort hat in der Folge zahlreiche Mängel im Betrieb nach sich gezogen, die im Grunde durch den Versuch zu erklären sind eine falsch ausgelegte Anlage so zu betreiben, dass der Komfort sichergestellt wird.

Obwohl die Energiekennwerte des DVZ Barnim sich in einem akzeptablen Bereich befinden und die Grenzwerte des Programms EnOB einhalten, so ist doch festzustellen, dass eine Optimierung und weitere Absenkung des Energieverbrauchs möglich wäre.

Durch die Anpassung der Zeitprogramme (soweit unter den gegebenen Randbedingungen möglich) und Anpassung der Sollwerte bzw. Sollkurven für Heizung und Kühlung, könnte eine Verbesserung der Gesamteffizienz der Wärme und Kälteerzeugung erreicht werden, die sich durch kürzere Laufzeiten, Erhöhung des Direktkühlbetriebs (bzw. Vermeidung Teillastbetriebs der Wärmepumpen zur Kühlung), Vermeidung gleichzeitigen Heizens und Kühlens sowie Verbesserung des Nutzungsgrades der Lüftungswärmerückgewinnung ergibt. Das Einsparpotenzial wurde auf ca. 5.000 Euro/a abgeschätzt.

Für weitere Einsparungen und vor allem zur Verbesserung des Komforts müsste allerdings ein Umbau des Verteilsystems erfolgen.

9.3. Ludwig-Erhard Haus, Berlin

Eine detaillierte Analyse auf Basis von Messdaten war im Falle des Ludwig Erhard Hauses leider nicht möglich. Die Datenanbindung wurde zwar über eine Anbindung der Gebäudeautomation geschaffen, jedoch wurde der Mindestdatensatz gemäß 7.2 nie komplett bzw. nicht in der zeitlich notwendigen Auflösung geliefert.

Als Hauptursache für diese Situation kann das mangelnde Interesse des Gebäudebesitzers (IHK Berlin) genannt werden. Der Gebäudeeigner konnte nach der Anbindung der Gebäudeautomation (die im Zuge einer ohnehin fälligen Erneuerung des Systems durchgeführt wurde) nicht motiviert werden, das Betriebspersonal und den Hersteller der Gebäudeautomation (Siemens) zu den notwendigen Restarbeiten zu veranlassen.

Über die Tageswerte des Energie Verbrauchs der verschiedenen Mieteinheiten war dennoch eine eingeschränkte Analyse möglich.

9.3.1. Energie- und Wasserverbrauch

- Für alle Mieteinheiten wurden die Tageswerte für Wärme-, Kälte- und Stromverbrauch aufgenommen. Die Summation zeigt, dass sowohl bei der Heizung als auch bei der Kühlung eine ganzjährige Grundlast auftritt.
- Bei der Heizung liegt die Grundlast bei ca. 25 kW, während er bei der Kühlung bei ca. 20 kW liegt. Über einen weiten Bereich der Außentemperatur ca. 5-15°C) liegt somit gleichzeitiger Heiz- und Kühlbetrieb vor, der deutlich über der jeweiligen Grundlast liegt. Dieses Verhalten ist auch bei einzelnen Mieteinheiten zu beobachten. Die Vermeidung dieses gleichzeitigen Heiz- und Kühlbetriebs stellt ein Einsparpotenzial dar, dass aber aus den oben genannten Gründen nicht genauer Unersucht werden konnte.
- Der Stromverbrauch zeigt ein eindeutiges Wochenprofil und weist auf regelmäßige Anwesenheitsprofile und auf geringe Nutzung des Gebäudes am Wochenende hin.
- Trotzdem ist festzustellen, dass in der Mehrzahl der Mieteinheiten keine signifikante Wochenendabsenkung sowohl bei Heiz- als auch beim Kühlbetrieb stattfindet. Auch hier ergibt sich ein Potential zur Einsparung.
- Ein bei tiefen Außentemperaturen signifikant ansteigender Stromverbrauch könnte ein Hinweis auf Einsparpotentiale bei der Beleuchtung sein.

9.3.2. Mögliche / Realisierte Verbesserungs- und Einsparpotenziale

Aufgrund der oben beschriebenen Situation war es nicht möglich die aus der Analyse abgeleiteten Hinweise für Einsparpotenziale weiter zu verfolgen. Eine vorsichtige Schätzung ergab, dass eine Einsparung von 5% des Energiebedarfs realistisch sein sollte.

9.4. EADS Gebäude 88, Ottobrunn

Obwohl das Gebäude EADS 88 eine relativ einfache Struktur hinsichtlich Baukörper, Nutzung und anlagentechnischer Ausstattung besitzt, wurde die Analyse durch Umbauarbeiten zu Beginn des Unersuchungszeitraums etwas erschwert. Es wurde eine Fernkälteanbindung geschaffen, die zur Kühlung der Rechnerräume im UG verwendet wird.

9.4.1. Energie- und Wasserverbrauch

- Die Grundlast für den Stromverbrauch liegt bei ca. 120 kW bzw. bei rund 15 W/m² Nettogrundfläche. Dies stellt für Bürogebäude, die üblicherweise um 5 W/m² liegen, einen außerordentlich hohen Wert dar, der mit dem Betrieb der Serverräume im UG zu erklären ist.

- Die hohe Strom-Grundlast erklärt auch die ganzjährig hohe Kühllast von 70-80 kW (ca. 10 W/m²). Entsprechend zeigt die Kühllast auch keine erkennbare Klimaabhängigkeit, da sie überwiegend von internen Lasten bestimmt wird.
- Strom- und Wasserverbrauch zeigen ein deutliches Wochenprofil der Nutzung des Gebäudes mit Kernzeiten an Werktagen von ca. 8:00-19:00 Uhr; Sa, So und Feiertage keine Nutzung.
Beim Wasserverbrauch sind einzelne Ausreißer erkennbar mit ganztägig hohem Wasserverbrauch, d.h. auch nachts. Als mögliche Ursache wurden klemmende Toilettenspülungen ausgemacht.
- Die Heizlast zeigt kein Wochenprofil obwohl eine Nachtabsenkung bzw. – Abschaltung mit morgendlichem Aufheizbetrieb möglich wäre.
- Der Wasserverbrauch liegt für ein Bürogebäude ohne Kantine vergleichsweise hoch (Tagesmittel an Werktagen ca. 200 l/h bzw. mittlerer Tagesverbrauch 4,8 m³). Eine genaue Ursache hierfür konnte nicht ermittelt werden.

9.4.2. Heizkreise

- Die Heizkreise sind durchgängig in Betrieb. Auch in den Sommermonaten gehen die Kreise häufig in Betrieb, vor allem in den Morgen- und Abendstunden. Eine Nacht- und Wochenendabsenkung oder -Abschaltung sollte eingeführt werden. Weiterhin ist das Einschaltkriterium des Kreises zu prüfen, um den Heizbetrieb im Sommer möglichst zu vermeiden.
- Insgesamt ist die Temperaturspreizung der Heizkreise relativ gering (maximal bei ca. 8 K bei -10°C Außentemperatur). Dies deutet darauf hin, dass der Massenstrom im Kreis zu groß ist bzw. die Pumpen auf einer niedrigeren Stufe betrieben werden können. Allerdings handelt es sich beim System um eine Einrohrheizung, so dass die geringen Spreizungen auch systembedingt sein können.

9.4.3. Mögliche / Realisierte Verbesserungs- und Einsparpotenziale

Das Haupteinsparpotenzial beim Gebäude EADS 88 ist der bedarfsgeführte Betrieb der Heizkreise. D.h. die Einführung einer Nacht- und Wochenendabsenkung oder – Abschaltung mit entsprechendem Wiederaufheizbetrieb (v.a. nach den Wochenenden). Dieses Potenzial wurde bereits relativ früh erkannt aber aufgrund der der Prioritätensetzung des Gebäudeeigentümers erst im Sommer 2010 umgesetzt. Laut Eigentümer wurde eine selbstlernende Regelung nachgerüstet, die optimale Absenkezeiten für das Gebäude selbstständig ermittelt.

Prinzipiell sollte mit dieser Maßnahme eine Energieeinsparung von 10% bis 20% möglich sein. Allerdings zeigte sich zum Beginn der Heizsaison kein veränderter Heizbetrieb. Eine genauere Prüfung konnte im Projektzeitraum nicht mehr erfolgen.

9.5. Kraft-Foods, München

9.5.1. Energie- und Wasserverbrauch

- Die Heizlast wird zu ca. 90 % von den Gasheizkessel und Schnelldampferzeuger über Prozessabwärme gedeckt. Die Ölheizkessel dienen nur zum Spitzenlastabdeckung (ab ca. 10 °C Außenlufttemperatur).

- Der Wasserverbrauch zeigt ein deutliches Wochenprofil der Nutzung des Gebäudes mit Kernzeiten an Werktagen von ca. 8:00-19:00 Uhr; Sa, So und Feiertage keine Nutzung. Dieses Profil weist auf regelmäßige Anwesenheitszeiten hin. Die gemessenen Wassermengen aus dem Hausanschluss für das gesamte Gebäude zeigen, dass nachts kein Wasser verbraucht wird. Die Werte aus den Wasserzählern für die Dampferzeugung oder die Kühltürme zeigen aber einen Wasserverbrauch außerhalb der Anwesenheitszeiten.
- Die Heizlast zeigt ebenfalls ein Wochenprofil, das jedoch sehr unscharf ist. Die Einstellungen zum Absenkbetrieb muss überprüft werden.
- Aus den Messdaten lässt sich eine Nennlast von ca. 1 MW extrapolieren. Der Gasverbrauch zeigt eine hohe Grundlast. Dies kann durch die Dampfproduktion für die Lüftungsanlagen und die Labors erklärt werden. Eine Wochenendabsenkung ist nicht eindeutig erkennbar. Es sollte überprüft werden, ob tatsächlich Bedarf für Dampf am Wochenende besteht.
- Der Stromverbrauch kann bis heute aufgrund diverser technischer Probleme bei der Datenübertragung der Stromzähler leider nicht richtig erfasst werden. Die Behebung der Geräte- und Einstellungsfehler soll bis Ende Juli 2009 erledigt werden. Dann können nach der nächsten Beobachtungsperiode Schlüsse zum Stromverbrauch gezogen werden. Heizkreise

9.5.2. Heizkreise

- Die Heizkreise sind durchgängig in Betrieb. Auch im Juni sind die Kreise während der Arbeitszeiten in Betrieb. Um Energie zu sparen, ist hier ist zu prüfen, ob dieser Betrieb notwendig und ob eine Abschaltung der Pumpen möglich ist. Weiterhin ist das Einschaltkriterium des Kreises zu prüfen, um den Heizbetrieb im Sommer möglichst zu vermeiden.
- Die Temperaturspreizung der Heizkreise ist während der Heizperiode relativ gering (zwischen 0 und 8°C). Es sollte überprüft werden, ob die Pumpen auf eine niedrigere Drehzahl laufen können, um den Massenstrom abzusenken und eine größere Spreizung zwischen Vor- und Rücklauftemperaturen zu erzielen.
- Vom Januar bis Ende März 2009 zeigen die Kontrollsignale der Pumpen, dass diese immer in Betrieb sind, auch nachts, obwohl eine Absenkung der Vorlauftemperatur von ca. 23h00 an Wochentage und 21h00 an Wochenende bis 7h00 festgestellt werden kann. Auch hier ist es sinnvoll zu prüfen, ob die Pumpen laufen sollen.
- Im Sommer laufen die Pumpen täglich und die Heizkreise zeigen eine negative Spreizung (keine Wärmeabnahme aus den Räumen). Dort besteht die Möglichkeit, die Pumpen ab einer Außentemperatur von ca. 10°C auszuschalten.
- Die negativen Spreizungswerte können auf einen Fehler in der Hydraulik oder den Einfluss einer fremden Wärmequelle deuten. Dies sollte vor Ort überprüft werden. .

9.5.3. Kälteerzeugung

- Im Winter werden die Kälteanlagen auf kleiner Stufe betrieben. Es ist zu prüfen, ob der damit verbundene Teillastbetrieb der Kompressoren durch eine freie Kühlung über die Rückkühler vermieden werden kann.
- Kompressionskältemaschine 1 (KKM 1) läuft im Sommer tagsüber auf ihrer höchsten Stufe (ca. 70 kW Stromaufnahme). Bei Vollast der KKM 1 wurde die KKM 2 freigegeben (ca. 30 kW Stromaufnahme), um die Kälteerzeugung zu unterstützen. Während dieses Spitzenlastbetriebs wird eine Kälteleistung von ca. 250 kW erzeugt (Annahme Leistungszahl = 2,5).
- Bei der Kältemaschine 1 im Bauteil B kann ein Tages- und Wochenprofil erkennen. Nachts und an kalten Tagen ist ein Wechselbetrieb der Anlage zwischen zwei Betriebsstufen (Takten) ersichtlich. Die maximale Aufnahmeleistung wird nur selten erreicht. Dies deutet auf eine Überdimensionierung dieser Kälteanlage hin.
- Bei den Kältemaschinen im Bauteil A kann eine Erhöhung des Stromverbrauchs bei einem Tagesmittelwert der Außenlufttemperatur von ca. 13°C festgestellt werden. Ab diesem Wert steigt der Bedarf an Kälte für die Versorgung der Lüftungsanlagen und Kälteverbraucher.
- Die elektrische Leistungsaufnahme der Kältemaschine 1 Bauteil B zeigt keinen klimaabhängigen Anteil. Dies würde darauf hindeuten, dass die versorgten RLT-Anlagen hauptsächlich Umluftbetrieb gefahren werden. Da dies unwahrscheinlich ist, sollte der Betrieb sowohl der Kältemaschine als auch der verbundenen RLT Anlagen überprüft werden.

9.5.4. RLT-Anlagen

- Ein Tag- und Nachtbetrieb ist erkennbar. Die Zu- und Abluftanlagen werden vor und nach der Arbeitszeit auf einer niedrigeren Stufe gefahren. Am Wochenende wird ebenfalls ein Absenkbetrieb gefahren.
- Die zusätzlich zum Minimaldatensatz gemessenen Drucksignale liegen sehr niedrig. Vermutlich muss ein Faktor 10 zur Umrechnung in Pascal berücksichtigt werden. Dies ist zu klären. In der Analyse wurde der Faktor 10 bereits angenommen.
- Beide Zu- und Abluftanlagen werden auf einem konstanten Druck für den Tag- und Nachtbetrieb geregelt. Die Druckniveaus der Ab- und Zuluftanlagen zeigen aber unterschiedliche Werte, wobei die Druckdifferenz bei der Zuluftanlage kleiner als die der Abluftanlage ist. Diese unterschiedlichen Werte sind aufgrund des Aufbaus der Lüftungsanlage schwierig nachzuvollziehen. In der Regel haben Zuluftkanalnetze einen höheren Widerstand als Abluftnetze.
- Seit April 2009 läuft die Zuluftanlage im Tagesbetrieb auf einer höheren Stufe. Die Gründe dafür sollen untersucht werden (Änderung im Kanalnetz, verschmutzte Filter, Erhöhung der Luftmenge,...) Weiterhin ist zu fragen, ob nachts im Kühlfall ein höheres Temperaturniveau für die Zuluft zulässig ist bzw. ein niedrigeres im Heizfall.
- Die Zulufttemperatur wird seit Januar 2009 konstant auf 18°C geregelt. Aus der Temperaturdifferenz zwischen Zu- und Abluft kann man feststellen, dass die versorgten Räume immer gekühlt werden. Aus der Analyse der Heizkreise

im Bauteil A ergab sich, dass die Heizungspumpe für den Heizkreis Produktion.Luft immer läuft. Es sollte überprüft werden, ob die Heizungspumpe dieses Heizkreises im Sommer ausgeschaltet werden kann.

9.5.5. Druckluftherzeugung

- Die Druckluftanlagen sind redundant und werden im Wechsel betrieben. Von Januar bis März lief die Anlage 1 nachts von 23h bis 3h und von 11h bis 15h. Die Anlage 2 übernahm die Druckluftherzeugung für die restliche Zeit. Ab ca. Ende April bis ca. Anfang Juni wurde die Druckluftherzeugung ausschließlich von der Anlage 2 gewährleistet. Dies ist eventuell auf ein Defekt oder eine längere Wartung der Anlage 1 zurückzuführen. Ab Anfang Juni wurde Anlage 1 wieder aktiv und die Betriebszeiten beider Anlagen getauscht.
- Die Druckluftherzeugung erreichte einen maximalen Wert von ca. 70 m³/h an einigen Stunden in Februar und Mai 2009. Die stündliche Grundlast beträgt in etwa 20 m³/h. Es sollte überprüft werden, ob diese Grundlast durch die Abnehmer gerechtfertigt ist oder durch Leckagen im Druckluftnetz verursacht wird.
- Beide Anlagen laufen die meiste Zeit im Teillastbetrieb, was eine hohe spezifische Leistung verursacht. Bei der Anlage 1 liegt diese sogar immer über 200 W/(m³/h) und bis 400 W/(m³/h). In der Literatur werden durchschnittliche Werte der spezifischen Leistungen für Druckluftanlagen in Höhe von 150 W/(m³/h) gefunden.
- Um den Betrieb der gesamten Druckluftanlage energetisch zu optimieren müsste es überprüft werden, ob die Laufzeiten des Druckluftkompressors 2 nicht erhöht werden könnten, und, wenn die Grundlast produktionsbedingt verursacht wird, ob der Einsatz eines kleineren in Volllast betriebenen Kompressors möglich wäre.

9.5.6. Mögliche / Realisierte Verbesserungs- und Einsparpotenziale

Aus den oben beschriebenen Analysen ergeben sich zahlreiche Ansatzpunkte für Verbesserungen. Folgende Korrekturen bzw. Umstellungen wurden vorgenommen bzw. sind zur Umsetzung vorgesehen:

- Die Nacht- und Wochenendabsenkung der Dampferzeuger wurde realisiert. Allein durch diese Maßnahme wird eine Einsparung von ca. 16.500 Euro/Jahr erwartet
- Die Erneuerung der Druckluft-Anlage durch kleiner dimensionierte Aggregate ist vorgesehen. Weiterhin soll das Monitoring weiter zur Optimierung genutzt werden.
- Für die Tiefgaragenlüftung wurde eine Nacht- und Wochenendabsenkung eingerichtet.

Ein interessanter Aspekt ist, dass der Gebäudebesitzer Interesse an der Fortführung des Monitorings angemeldet hat und die Datenerfassung und –Visualisierung nach Projektende weiter betreiben will.

10. Kosten-Nutzen-Betrachtungen

Um die Wirtschaftlichkeit des im Rahmen von ModBen entworfenen systematischen Verfahrens zur Betriebsanalyse zu prüfen, wurden Kosten und Nutzen erhoben bzw. abgeschätzt. Grundlage hierbei waren folgende Überlegungen:

- Die Kosten des Verfahrens setzen sich zusammen aus den Kosten für die Einrichtung der Messtechnik und der Datenübertragung und aus Personalkosten zur Betreuung des Systems.
- Die Kosten für die Einrichtung der Messtechnik und der Datenübertragung können aufgrund der Abrechnung mit dem jeweils ausführenden Unternehmen vom Projektteam eindeutig benannt werden.
- Die Personalkosten hingegen können nicht benannt werden, da im Rahmen des Projekts aufgrund der notwendigen Entwicklungsarbeiten je Objekt ein deutlich höherer Personalaufwand betrieben wurde als er in der späteren Anwendung des Verfahrens sinnvoll erscheint.
- Daher wurde ausgehend von den Kosten für die Messtechnik und Datenübertragung und der über das Verfahren ermittelten Energiekosteneinsparung der mögliche Umfang der Personalkosten zurückgerechnet, wenn eine statische Amortisationszeit von 3 Jahren zu Grunde gelegt wird.

Tabelle 30 zeigt einen Überblick über die Ergebnisse für die Demonstrationsgebäude. Dabei ist zu beachten, dass bei dieser Betrachtungsweise nicht alle Ansätze wie in Kapitel 8 beschrieben einzeln bewertet werden. Dies ist aufgrund des unterschiedlichen Stands der Entwicklung nicht möglich. Vielmehr soll die Übersicht das wirtschaftliche Potenzial des Verfahrens bzw. von Continuous Commissioning insgesamt deutlich machen.

Unter Berücksichtigung dieser Vorbemerkung kann aus den Ergebnissen in Tabelle 30 folgendes abgelesen werden:

- Die Gebäude DVZ Barnim und Großpösna zeigen deutlich unterschiedliche Ergebnisse im Vergleich zu den anderen 3 Gebäuden. Die spezifischen Kosten für die Datenerfassung (im Bezug auf die jährlichen Energiekosten) liegen deutlich höher als bei den anderen Gebäuden, so dass sich trotz prognostizierter Einsparungen von 8%-10% kein wirtschaftlicher Betrieb (unter den oben genannten Randbedingungen) ergeben kann. Bei Großpösna ist dies auf die Größe des Gebäudes zurückzuführen. Die Einrichtung einer Datenerfassung verursacht Mindestkosten, die sich auch bei kleinen Gebäuden nicht unter 3.000 Euro absenken lassen. Geht man von einem Betrag von 3.000 Euro als Untergrenze zur Einrichtung einer Datenerfassung aus, ist das Verfahren erst für Gebäude wirtschaftlich interessant deren jährliche Energiekosten über 30.000 Euro liegen. Beim DVZ Barnim ist der Grund für die hohen Kosten für die Datenerfassung im Umfang der Messtechnik zu suchen. Das DVZ Barnim wurde im Rahmen des Programms EnBau einem intensiven 2-jährigen Monitoring unterzogen. Daher wurden deutlich mehr Datenpunkte erfasst als es der Mindestdatensatz von ModBen vorsieht. Die Kosten für den Mindestdatensatz konnten so nicht getrennt ermittelt werden.






- Bei den anderen Gebäuden liegen die spezifischen Kosten für die Datenerfassung im Bereich von 5% bis 20% der jährlichen Energiekosten. Wobei die 5% beim Ludwig-Erhard-Haus sicher als Untergrenze zu betrachten sind, da sich hier der günstige Fall einer ohnehin notwendigen Erneuerung der Gebäudeautomation ergab und darüber hinaus nicht die Übertragung des vollständigen Mindestdatensatzes realisiert wurde.
- Bei der Art der Datenerfassung (entweder über Datenlogger (smartbox) oder Anbindung an die vorhandene GA) lässt sich keines der Systeme aus wirtschaftlicher Sicht favorisieren.
Eine existierende GA kann von Vorteil sein, wenn die notwendige Sensorik ebenfalls bereits existiert. Falls das nicht der Fall ist, ist eine Lösung über einen separaten Datenlogger oft zu bevorzugen. Besonders augenfällig wurde dies beim Gebäude EADS 88, bei dem ursprünglich eine Aufschaltung auf eine zentrale GA geplant war, deren Kosten jedoch mit rund 100.000 Euro die Kosten der realisierten Lösung mit Datenlogger um das 3-fache überstiegen.
- Die identifizierten Einsparungen liegen im Bereich zwischen 5% und 10% und blieben damit etwas hinter den Erwartungen zurück. Dennoch bleibt festzustellen, dass bei allen Gebäuden Energieeinsparungen identifiziert und als Nebeneffekt auch hydraulische Probleme oder Komfortprobleme aufgedeckt bzw. erklärt werden konnten.
- Unter Zugrundelegung der identifizierten Einsparpotenziale liegt die statische Amortisationszeit allein für die Datenerfassung im Bereich von 1-2 Jahren. Die Rückrechnung des möglichen Umfangs an Ingenieurdienstleistungen bei einer angenommenen statischen Amortisation von 3 Jahren, ergibt Beträge von 5.000 Euro bis 62.000 Euro.
Damit ist selbst bei eher geringen Einsparpotenzialen ein wirtschaftlich interessanter Einsatz des Verfahrens möglich.

Im Rahmen von ModBen wurden auch mögliche Anwender und Gebäudebesitzer nach Ihrer Einschätzung zur Wirtschaftlichkeit eines entsprechenden Verfahrens befragt. Dabei wurde folgendes geäußert:

- Prinzipiell wird die kontinuierliche Betriebsanalyse auf Basis des Mindestdatensatzes als sinnvoll und zielführend erachtet.
- Der finanzielle Aufwand zur Einrichtung der Datenerfassung sollte möglichst unter 20% der jährlichen Energiekosten (vor Optimierung) liegen.
- Der finanzielle Aufwand, der jährlich für die Betreuung des Systems bzw. die Dienstleistung der Betriebsanalyse anfällt, sollte möglichst im Bereich von 2-3% der jährlichen Energiekosten (vor Optimierung) liegen.

Damit werden dem Verfahren - vor allem im Bereich der Betreuung- enge finanzielle Grenzen vorgegeben. Die Ergebnisse von ModBen zeigen, dass diese prinzipiell erreicht werden können.

Tabelle 30 Übersicht Ergebnisse und Kosten-Nutzen bei Demogebäuden

		DVZ Barnim	Ennovatis	EADS	Ludwig Ehrhard Haus	Kraft Foods
Allgemeine Daten						
Bild						
Ort		Barnim	Großpösna	Ottobrunn	Berlin	München
Baujahr		2007	1995	1976	1998	1986
Nutzung		Büros	Büros	Büros	Büros, Gastro., Konferenz	Büros, Labor
Nutzfläche	m ²	8.000	436	7.730	37.000	9.800
Verbrauch / Bedarf						
Heizenergieverbrauch	kWh/m ² a	(27*)	58	73	88	357
Stromverbrauch	kWh/m ² a	74	12	170	94	316
Fernkälte	kWh/m ² a			55		
Datenerfassung						
Datenerfassung		GA / SQL-DB	Smartbox	Smartbox	GA / SQL-DB	Smartbox
Anzahl Datenpunkte	-	300	20	42	480	78
Kosten / Wirtschaftlichkeit						
Energiekosten	EUR/a	65.000	4.900	302.000	324.000	400.000
Kosten Datenerfassung	EUR	30.000	3.000	30.000	16.000	43.000
Prozentsatz der jährlichen Energiekosten		46%	61%	10%	5%	11%
Mögliche Einsparung**	EUR/a	5.000	500	22.000	18.000	35.000
Prozentsatz der jährlichen Energiekosten		8%	10%	7%	6%	9%
Statische Amortisationszeit	a	6,0	6,0	1,4	0,9	1,2
Mögliche Kosten für die Ingenieursdienstleistung bei 3 Jahren statischer Amortisationszeit	EUR	-15.000	-1.500	36.000	38.000	62.000
Wurden Einsparungen realisiert	-	teilweise	teilweise	teilweise	Nein	teilweise

Anmerkungen: * Nutzenergie;

** aus Schätzungen bzw. Hochrechnungen (siehe auch Kapitel 9)

11. Verwertung der Ergebnisse

Ennovatis stuft das Projekt – als Industriepartner und Hauptverwerter der Ergebnisse – als äußerst erfolgreich ein. Dies nicht zuletzt deshalb, da wir eine Reihe von Anregungen und Bestätigungen erhalten haben, die zum Teil auch erlauben Kundenwünsche konkret zu formulieren und umzusetzen. Dazu gehören auf der Seite der Software vor allem die Implementierung der im Projekt eingesetzten Visualisierungstechniken und ihre Verfügbarmachung über das Internet. Dies ist wie schon in 8.10 gezeigt im Rahmen des Controlling Software weitgehend erfolgt und wird im Rahmen der Entwicklung der WebSuite auch internetbasiert kurz nach Projektende möglich sein.

Auf Seiten der Hardware gilt es vor allem die Firmware der Smartbox so zu ertüchtigen, dass eine weitgehend automatische Überwachung der Verbrauchsdaten erfolgen kann. Dazu haben wir den Smartbox Manager erweitert und mit der Erstellung eines Event Management Systems (EMS) begonnen.

Der neue Smartbox Manager erlaubt es insbesondere wesentlich komplexere Bedingungen zur Überprüfung von Zeitreihen zu formulieren und umzusetzen. Das zeigen wir am Beispiel der adaptiven Heizungsregelung, mit deren Hilfe sich der Betrieb von Heizungsanlagen in vielen Fällen weiter optimieren lässt (siehe Anhang J)

All dies sind Arbeiten, die weit über das F&E Ziel einer prototypischen Entwicklung hinausgehen. Die Aufwendungen dafür, die meist wesentlich höher als die eigentlichen Entwicklungskosten sind, sind aber Voraussetzung dafür, dass die erfolgreichen Ideen des F&E Vorhabens in Produkte einfließen.

11.1. Grundideen der Websuite

Die ennovatis WebSuite ermöglicht den webbasierten Zugriff auf Daten des ennovatis Controlling durch jeden herkömmlichen Internetbrowser. Mit dieser Software kann man Energiedaten online erfassen, auswerten und Berichte erstellen.

Es stehen verschiedene Module zur Verfügung.

- individuelle Datenanalyse
- manuelle Datenerfassung
- Berichtswesen
- Administration

Durch die Benutzerkontensteuerung ist es möglich den Anwendern sowohl Rechte auf Daten als auch die Module zu vergeben.

Die **individuelle Datenanalyse** ermöglicht dem Nutzer die Daten für die er Analyserechte hat mittels graphischen und tabellarischen Auswertungen zu vergleichen um daraus Rückschlüsse zu ziehen.

Die **manuelle Datenerfassung** erlaubt es, wenn keine automatische Datenerfassung möglich ist, Datenerfassern an verteilten Standorten Zählerdaten einzugeben. Diese werden bei der Eingabe auf Plausibilität geprüft.

Das **Berichtswesen** ermöglicht es die im ennovatis Controlling vorhandenen Berichte online zu starten und abzurufen. Hierzu gehören beispielsweise die Standardenergieberichte

11.2. Grundideen des Event Management Systems

Das primäre Ziel ist die Implementierung eines EMS, welches Notrufmeldungen entgegennimmt und zeitnah an verantwortliche Personen weiterleitet.

Weitere Faktoren sind

- Protokollierung von Maßnahmen, die getroffen werden, um Probleme zu lösen.
- Verwaltung und Anzeige von Meldungen
- Die Erweiterung des Systems in einer späteren Entwicklungsphase um Analysefunktionalitäten.

Im Rahmen eines Notrufsystems muss sichergestellt werden, dass das System als Ganzes stets fehlerfrei funktioniert. Dazu gehören:

- Keine Meldungen dürfen verloren gehen.
- Bei Problemen muss ein verlustfreier Neustart des Systems bzw. der Prozesse gewährleistet sein.
- System muss zeitnah in der Lage sein zu erkennen, dass einzelne Komponenten nicht mehr korrekt funktionieren und ohne Verlust an Information diese neu starten sowie
- dass beim Ausfall eines Rechners schnell ein zweiter aufgesetzt werden kann, um da anzuknüpfen, wo der erste aufgehört hat.

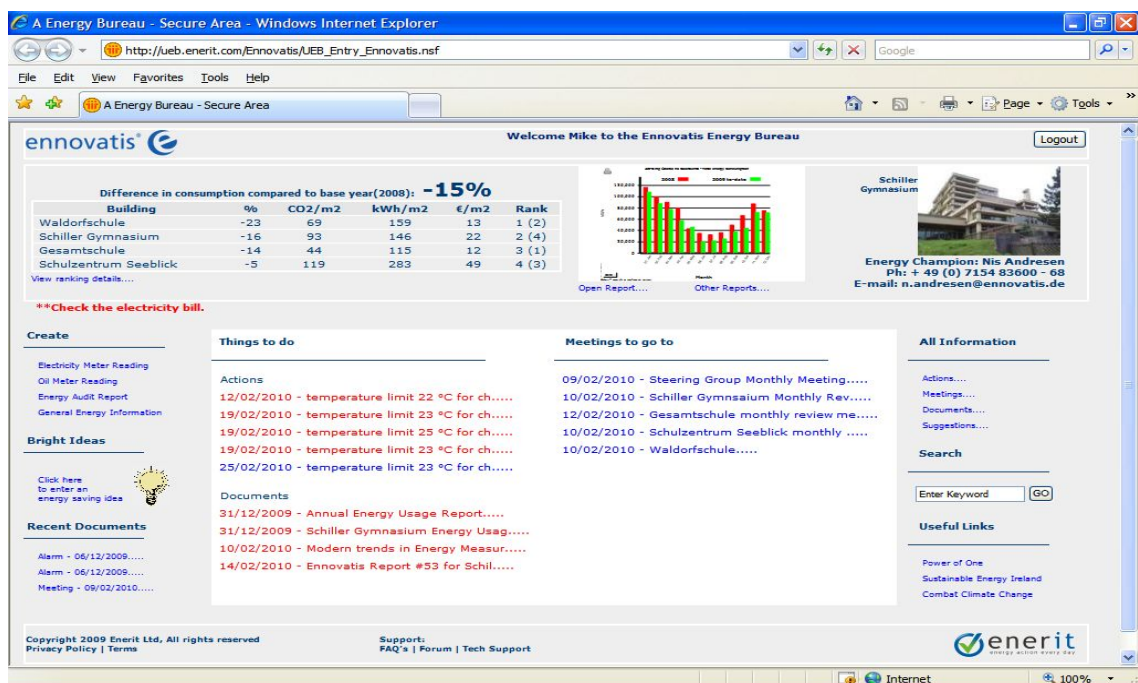


Abbildung 96: Mögliche Oberfläche für den Event Manager

11.3. Der neue Smartbox Manager

Um die Verwertung der Projektergebnisse vorzubereiten, haben wir eine Reihe von Verbesserungen im Smartbox Manager in Angriff genommen. Dazu gehören neben der Neugestaltung des Event Management Systems (EMS) vor allem neue Möglichkeiten zur Formulierung von Regeln zur Überwachung und zur Beschreibung von Steuer- und Regelalgorithmen.

Neue Entwicklungen bei der Smartbox umfassen

- Erkennung von Defekten, Fehlern, Unregelmäßigkeiten oder unnötigen "Energiefressern" durch die permanente Beobachtung von Lastgängen. So fallen ungewollte oder zu hohe Energie-Verbräuche sofort auf und können umgehend – mit oft sehr einfachen und kostengünstigen Mitteln – beseitigt werden.
- Störmeldungsmanagement, wie permanente Kennwertvergleiche, automatische Signalisierung der Störung, z.B. durch SMS, E-Mail oder Schaltausgang. Schalten von Relais aufgrund von vordefinierten Ereignissen.
- Konfigurierung über Smartbox Manager.

Als Beispiel für die Konfiguration zeigt Abbildung 97 die Oberfläche zur Konfiguration einer Störmeldung.

- Konfiguration der Anweisung am Beispiel *ALARM EIN 1*

Name: **ALARM EIN 1**
 Adresse: **1** -> **EMS Kornwestheim**
 Aktiv: **[x]**
 Speicherzyklus: **1440 Minuten** (1Tag)
 Messzyklus: **10 Sekunden**
 Art: **Telefon**
 ID: **159** -> **EIN 1** (ID des EIN 1 Rechners)
 Typ: **Warning**
 ist: **=gleich als 1.000**
 Standardformat:**[x]**
 Textfeld: **ALARMMELDUNG: Handbetrieb Markt 1/3 eingeschaltet!** (entsprechend der Funktion des Schalters)

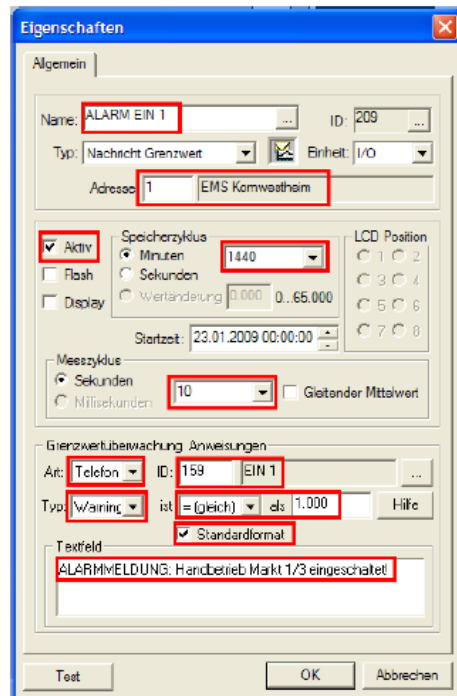


Abbildung 97: Konfiguration von Anweisungen über den Smartbox Manager

Etwas ausführlicher beschreiben wir die Möglichkeiten Zeitreihen zu bearbeiten. Grundsätzlich gilt, dass die Formeleingabe-Elemente die Erstellung einer Formel unterstützen. Mit Referenz kann man Werte von einem Sensor, Zähler, anderen Geräten oder einem der Rechner übernehmen. Wenn man auf den Button Referenz klickt öffnet sich ein Dialog Fenster, aus welchem man das gewünschte Element auswählen kann (Abbildung 98).

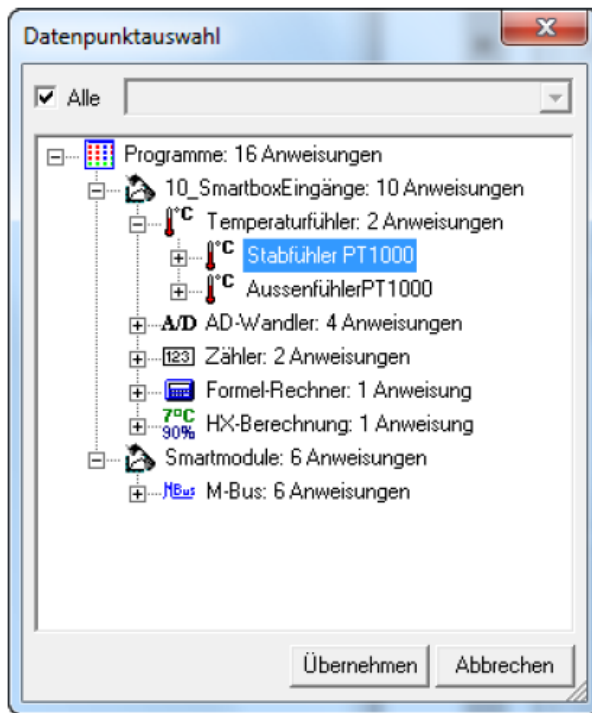


Abbildung 98: Auswahl von Datenpunkten

Man kann auch das Ergebnis einer Funktion verwenden. Drücken Sie auf den Button Funktion“ um eine der in Tabelle 31 gezeigten Funktionen zu verwenden. Die Funktionen können ineinander verschachtelt werden.

Tabelle 31 Funktionen zur bearbeiten von Zeitreihen

Funktion	Beschreibung
abs()	Absolutbetrag (immer eine positive Zahl ohne Rundung auf eine ganze Zahl)
cos()	Kosinus-Berechnung (Argument in Grad)
cosh()	Kosinus Hyperbolicus
exp()	Exponentialfunktion. $\exp(2) = e^2$, wobei e die Eulersche Zahl darstellt
if(;;)	if-Anweisung zur Auswertung von Ausdrücken. if(Bedingung; Rückgabewert bei Bedingung TRUE; Rückgabewert bei Bedingung FALSE)
ln()	Natürlicher Logarithmus (log zur Basis e)
log()	Logarithmus zur Basis 10
NOT()	Negiert den Ausdruck. Rückgabewert 1, falls $-0,5 < \text{Ausdruck} < 0,5$, sonst Rückgabewert 0
rand()	Generiert eine Zufallszahl. In der Klammer wird der Bereich angegeben
root()	Zieht die quadratische Wurzel
sin	Sinus-Berechnung (Argument in Grad)
sinh	Sinus Hyperbolicus
tan	Tangens-Berechnung (Argument in Grad)
tanh	Tangens Hyperbolicus
TRUE	Prüft, ob der Ausdruck wahr ist. Rückgabewert 0, falls $-0,5 \leq \text{Ausdruck} \leq 0,5$, sonst Rückgabewert 1

Alle Ausdrücke können mit Hilfe der Operatoren miteinander verknüpft werden (Ausdruck ist eine natürliche Zahl, Rückgabewert einer Referenz oder einer Funktion).

Tabelle 32 Operatoren zur Verknüpfung von Zeitreihen

Operand	Beschreibung
-	Subtraktion
*	Multiplikation
/	Division
^	Potenz. x^2 entspricht x^2
+	Addition
<	Kleiner Vergleich. Liefert 1 falls der linke Ausdruck kleiner ist als der rechte. Sonst 0
=	Gleich Vergleich. Liefert 1 falls der linke Ausdruck gleich dem rechten ist. Sonst 0
>	Größer Vergleich. Liefert 1 falls der linke Ausdruck größer ist als der rechte. Sonst 0
AND	Ist der Wert eines der Ausdrücke ≥ -0.5 und ≤ 0.5 liefert der AND-Vergleich 0. Sonst 1
XOR	Ist der Wert nur eines der Ausdrücke ≥ -0.5 und ≤ 0.5 liefert der XOR-Vergleich 1. Sonst 0
OR	Ist der Wert beider Ausdrücke ≥ -0.5 und ≤ 0.5 liefert der OR-Vergleich 0. Sonst 1

11.4. Adaptive Heizungsregelung

Im Kap. 8.10.9 haben wir auf die Abweichungen zwischen Bedarf und Verbrauch beim Gebäude in Großpösna hingewiesen und als ihre Ursache Fehler in der Regelung der Heizanlage identifiziert. Als Lösungsvorschlag haben wir das Konzept der adaptiven Heizungsregelung entwickelt. Es ist eine spezielle Version der modellbasierten Betriebsoptimierung, die insbesondere auch auf existierende Heizanlagen angewandt werden kann.

Heizungsanlagen werden üblicherweise in Abhängigkeit von der Außentemperatur gesteuert – unabhängig davon, ob die bereitgestellte Wärme von den Nutzern überhaupt gebraucht wird. Unnötig bereitgestellte Energie verursacht jedoch unnötige Kosten. Mit dem ennovatis Energiemanagement löst man dieses Problem auf elegante Weise. Die Smartbox steuert die Vorlauftemperatur automatisch nach zwei Parametern: dem tatsächlichen Bedarf und der Außentemperatur. Steigt der Bedarf, steigt auch die Vorlauftemperatur, sinkt der Bedarf, sinkt auch die Vorlauftemperatur. Steigt die Außentemperatur, so sinkt die Vorlauftemperatur und umgekehrt.

Für die Bewohner bleibt alles gleich, sie bemerken keinerlei Unterschied, außer dass sie von Nebenkosten entlastet werden.

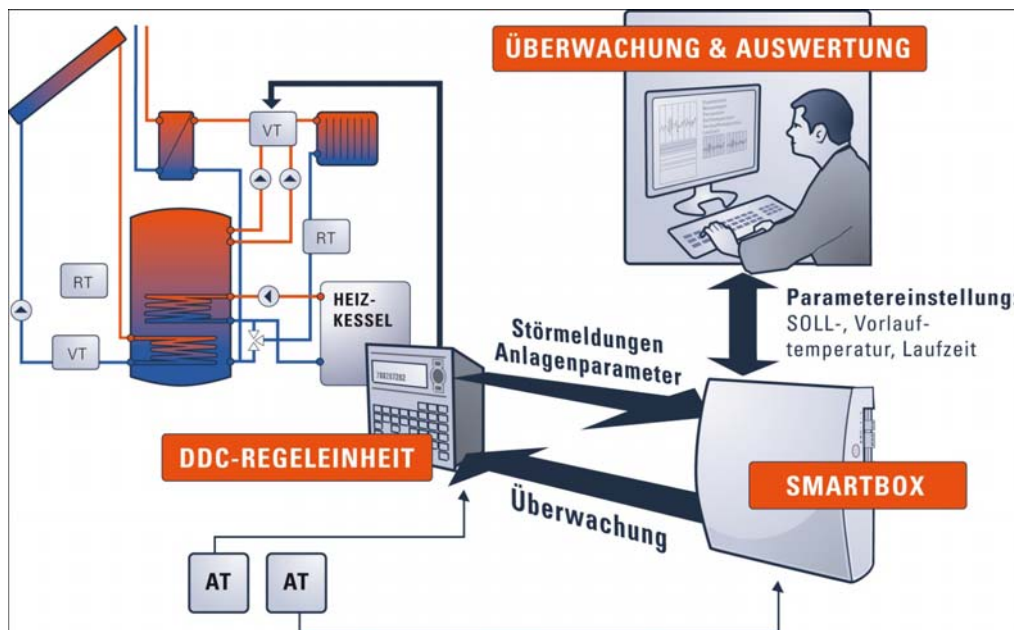


Abbildung 99: Schema der adaptiven Heizungsregelung

Abmessungen (mm)	ca. 225 B x 210 H x 70 T mm	Schnittstellen	8 analog 0...1 V 0...5 V 0...10 V 0...20 mA 4...20 mA
Anschlusskabel	Steckernetzteil (24V / 24W) 200 cm mit 2-poligem Euro-Anschlussstecker		8 digital z.B. Puls, Status, Tarif
Anschluss	230 V AC 50 Hz		Samson-Regler digital über Modbus (RS485)
Leistungsaufnahme	Max 2,5 W		R+S digital RS232, Reichweite 15 m oder RS485, Reichweite 1200 m
Schutzart	IP20		Weitere Ethernet 10/100 Mbit/s Mbus
Anschluss an den Regler der Hausanschlusstation	Kabeltyp JY(St)Y2 x 2 x 8 mm, max. 5 m		Optional GSM, ISDN, Analog Modem
Betriebsbedingungen	5 - 50 °C, nicht kondensierend		
Anschluss für Temperaturfühler	8 PT 1000, z.B. Außen- temperatur, Vorlauffühler, Raumtemperatur		
Umgebungstemperatur	5 - 50 °C		
Zulassung	CE DIN EN 61000-6-2 DIN EN 61000-6-3		

Abbildung 100: Technische Daten der adaptiven Regelung

Mit der Smartbox können mit Unterstützung des Smartbox Managers alle Energiedaten aus angeschlossenen Zählern sowie Temperaturen und Anlagenparameter aus der DDC-Regelungseinheit über eine ModBUS-Schnittstelle erfasst, analysiert und im Anschluss daran gegen Soll- und Grenzwerte verglichen werden. Diese Soll- und Grenzwerte können per Fernwartung in der ennovatis Smartbox vermerkt werden. Bei einer Überschreitung der eingetragenen Grenzwerte informiert die Smartbox automatisch die zuständige Service-Zentrale. Auch eine Störung der DDC-Regelungseinheit wird durch das ennovatis Energiemanagement selbsttätig angezeigt. So trägt die ennovatis Smartbox schließlich auch zur Anlagensicherheit bei.

Im Anhang J ist der Optimierungsvorgang detaillierter beschrieben. Inzwischen ist es auch möglich, die DDC Regelung direkt in der SmartBox zu implementieren und dadurch auf eine zusätzliche Regeleinheit zu verzichten

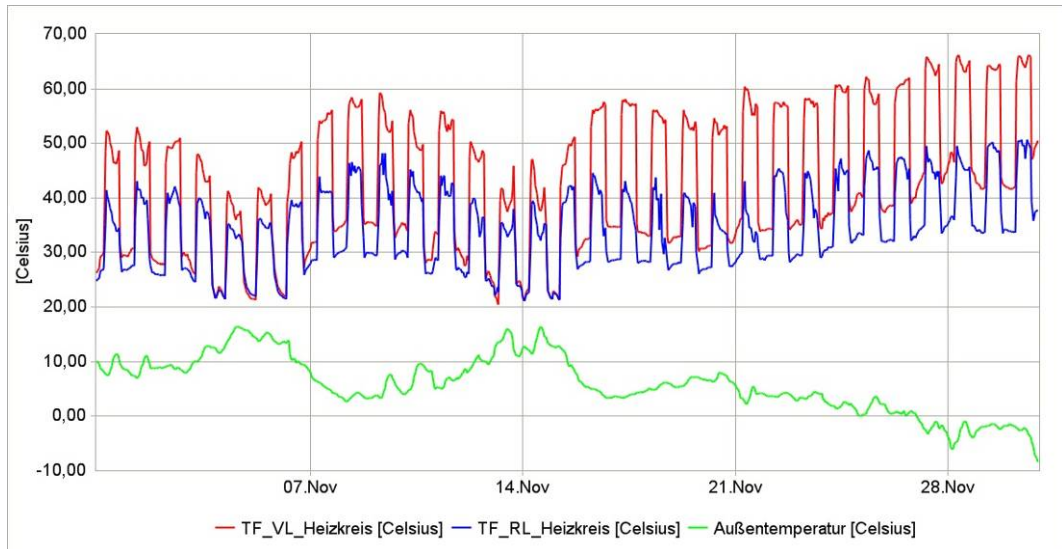


Abbildung 101: Vorlauf und Außentemperaturen nach Einführung der adaptiven Heizungsregelung

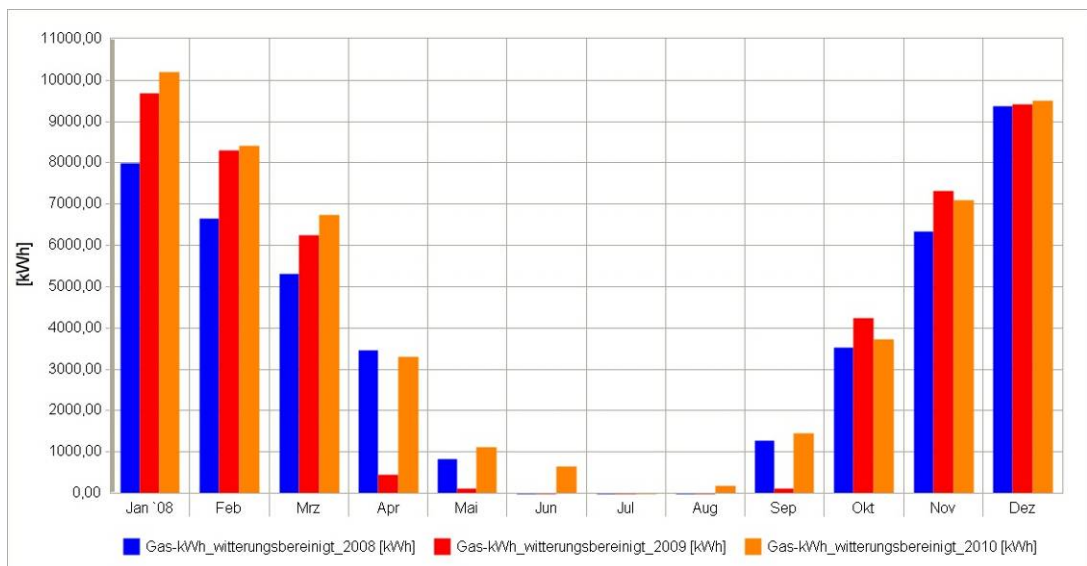


Abbildung 102: Gasverbrauch in Großpösna

Die adaptive Heizungsregelung wurde in der Anlage in Großpösna eingebaut. Erste Messergebnisse zeigen, dass die Tendenz steigender Verbräuche des Frühjahres gestoppt wurde (Einsparungen ca. 5%) und sich der Verbrauch jetzt besser an den Bedarf anpassen lässt, so dass die Unterschiede zwischen Verbrauch und Bedarf wie erwartet weiter zurück gehen

12. Fazit

Die Ergebnisse von ModBen zeigen, dass durch die entwickelte Systematik, die an den Prozess des Continuous Commissioning angelehnt ist (siehe 2.2) die Energieeffizienz von Gebäuden um bis zu 15% verbessert werden kann. Grundlage für die Identifikation dieser Einsparpotenziale ist die kontinuierliche Aufzeichnung und Auswertung des Mindestdatensatzes gemäß 7.2 in Kombination mit modellbasierten Analysen. Bei größeren Gebäuden bzw. Gebäuden mit Verbrauchskosten im Bereich mehrerer 10.000 Euro liegt die statische Amortisationszeit dieses Verfahrens dabei im Bereich von 1-3 Jahren.

Die Werkzeuge, die im Rahmen von ModBen entwickelt wurden, unterstützen diesen Prozess durch die systematische Erfassung und Auswertung von Messdaten. Insbesondere die systematische und standardisierte Visualisierung des Mindestdatensatzes hat sich als wertvoll für die Analyse erwiesen.

Eine der ursprünglichen Ideen von ModBen - die Betriebsanalyse mit der Zertifizierung gemäß EnEV zu verknüpfen – hat sich leider aufgrund des Entwicklungsstandes der EnEV bzw. der dahinter liegenden Norm (DN V 18599) als nicht tragfähig erwiesen.

Weiterhin wurden zahlreiche modellbasierte Ansätze zur Fehlererkennung, -Diagnose und zur Optimierung geprüft. Die Mehrzahl der Ansätze hat sich als hilfreich für die Betriebsanalyse erwiesen. Ein Teil der geprüften Ansätze wurde vom Projektpartner ennovatis in seine Software integriert und steht somit als Produkt dem Markt zur Verfügung. Am Fraunhofer ISE wurde mit dem Werkzeug datastorage eine Plattform für weitergehende Forschung Bereich Betriebsanalyse geschaffen, die auch in Folgeprojekten eingesetzt wird.

Allerdings wurde auch deutlich, dass die Praxistauglichkeit der Ansätze – beim derzeitigen Stand der Technik - sehr unterschiedlich ist. Daraus ergibt sich ein weiterer Entwicklungsbedarf, der letztlich auf eine bessere Integration der Betriebsanalyse in die Gebäudetechnik bzw. die Gebäudeautomation abzielen sollte.

Die folgenden Abschnitte geben einen Überblick über die Ergebnisse von ModBen.

12.1. Generelle Ergebnisse

Wie bereits erwähnt, hat ModBen gezeigt, dass über die Einführung eines Continuous Commissioning gemäß 7.1 Einsparungen im Bereich von 10-20% erzielt werden können. Die statische Amortisation des Verfahrens liegt im Bereich zwischen 1-3 Jahren.

Als notwendige Voraussetzung für die Identifikation und die Persistenz von Einsparpotenzialen hat sich die kontinuierliche und zeitlich hoch aufgelöste Erfassung und Auswertung des Mindestdatensatzes gemäß 7.2 erwiesen. Gleichzeitig konnten mit Hilfe des Mindestdatensatzes die typischen Fehler im Gebäudebetrieb erkannt werden.

Trotz der geringen Tiefe des Mindestdatensatzes hat sich die Datenerfassung und – Übertragung als eines der Haupthindernisse erwiesen – und zwar unabhängig davon, ob eine Gebäudeautomation vorhanden war oder nicht.

Gebäudeautomationssysteme in Gebäuden sind in der Regel nicht für die Betriebsanalyse und die effiziente und standardisierte Aufzeichnung und den

Austausch von Daten vorbereitet – obgleich ihr prinzipieller Funktionsumfang gemäß Hersteller diese Funktionen dies oft umfassen könnte.

Die manuelle Fehlererkennung und -Diagnose mittels intelligenter Datenvisualisierung wurde bei der Erstanalyse der Gebäude intensiv und erfolgreich genutzt. Jedoch macht gerade diese Analysetechnik auch deutlich gemacht, wie notwendig die Automation der Analyse ist, da trotz der automatisierten Erzeugung der Visualisierung der manuelle Aufwand zur Interpretation erheblich ist und nicht für die Integration in die täglichen Abläufe bei der Betriebsführung geeignet ist.

Als – aus heutiger Sicht - praxistauglich haben sich für diesen Zweck modellbasierte Methoden zur Fehlererkennung auf Basis von Black-Box-Modellen erwiesen (8.9). Diese erlauben prinzipiell eine einfache und automatisierte Erkennung von ungewöhnlichen Betriebszuständen. Auch rein regelbasierte Methoden zur Fehlererkennung und -Diagnose von Subsystemen erscheinen praxistauglich, wurden im Projekt jedoch nicht explizit betrachtet.

Bei Verwendung von modellbasierten Methoden zur Fehlererkennung und -Diagnose und Optimierung, die mit White-Box- oder Gray-Box-Modellen arbeiten, wurde deutlich, dass diese große Potentiale zur Betriebsanalyse bieten, jedoch in Ihrer Anwendung – insbesondere was die Erstellung und Kalibrierung des Modells betrifft - noch zu aufwendig für den praxisnahen Einsatz erscheinen.

In diesem Zusammenhang kann auch erwähnt werden, dass die Interoperabilität – im Sinne eines standardisierten und nahtlosen elektronischen Informationsaustauschs – im Gebäudebereich generell kritisch ist. Neben den Messdaten betrifft das insbesondere die Strukturdaten des Gebäudes, also Informationen etwa zum Aufbau der Gebäudehülle oder zur Struktur der haustechnischen Anlagen.

Auch die EnEV bzw. der Energieausweis kann derzeit an dieser Situation wenig ändern, da für Bestandsgebäude nur selten ein Energiebedarfsausweis ausgestellt wird (da keine Pflicht) und somit keine Strukturdaten erhoben werden.

Neben den technischen Problemen traten eine Reihe von organisatorischen Problemen auf (wie z.B. unklare Zuständigkeiten oder Fragen des Datenschutzes), die den Ablauf behindert und verlangsamt haben. Es wurde deutlich, dass die Betriebsanalyse mehr ist als der rein technische Prozess der Datenaufzeichnung und – Bewertung. Um erfolgreich zu sein, ist es notwendig die organisatorische und personelle Einbindung des Prozesses zu planen.

12.2. Erbeisse der einzelnen Stufen der Systematik

12.2.1. Stufe 1 – Benchmarking

Aufgrund der Tatsache, dass für Nichtwohngebäude, mit ihrer oft sehr individuellen Nutzung, aktuell keine brauchbaren Referenzwerte vorhanden sind, ist eine Einordnung des Energieverbrauchs anhand eines Benchmarkings oft schwierig bis unmöglich

Aus Sicht des Projektteams ergeben sich folgende Anforderungen an Referenzwerte für Nichtwohngebäude:

- Referenzwerte für den Energieverbrauch von Nichtwohngebäuden sollten sich auf Nutzungszonen und nicht auf das Gesamtgebäude beziehen. Der Referenzwert für das Gesamtgebäude ergibt sich dann aus dem flächengewichteten Mittel der einzelnen Nutzungszonen.

- Referenzwerte des Energieverbrauchs sollten die Erzeugungsanlagen berücksichtigen (z.B. ist es entscheidend, ob Erdgas für einen Brennwertkessel oder ein BHKW verwendet wird oder Fernwärme für die Raumheizung oder eine Absorptionskältemaschine).
- Korrekturen wie die Wetterbereinigung und die Trennung von klimaabhängigem und –unabhängigem Verbrauch sollten klar beschrieben sein.

Für diese Art von Referenzwerten sind weitere Untersuchungen bzw. Datenerhebungen notwendig, so dass sich die entsprechenden Datengrundlagen erst über die Jahre erstellen lassen.

12.2.2. Stufe 2 – Datenerhebung / Ermittlung Zielwert

Eine der Ausgangsideen von ModBen war es, die Daten, die im Rahmen der Erstellung eines Energieausweise (Bedarfsausweis!) erstellt werden, für die Betriebsanalyse zu verwenden, um so Synergien zu erzeugen.

Insgesamt war es im Rahmen von ModBen jedoch nicht möglich mit Hilfe der Berechnungsmethodik der DIN V 18599 geeignete Zielwerte für den Energieverbrauch abzuleiten. Dies hat folgende Gründe:

- Der Strombedarf gemäß EnEV bezieht sich nur auf die Haustechnik und ist somit nicht vergleichbar mit gemessenem Gesamt-Stromverbrauch, der im Monitoring erhoben wird.
- Beim Endenergiebedarf für Heizung wird trotz der Anpassung von Nutzungsprofilen und der Kennwerte der Anlagentechnik der Energiebedarf in den meisten Fällen überschätzt.
- Obwohl die Norm sehr umfangreich und detailliert erscheint sind einige Technologien – insbesondere im Bereich Kühlung/Klimatisierung -nicht abbildbar:
 - Fernkälte
 - Direktkühlung über Grundwasser, Erdsonden, Rückkühlwerke
 - Reversible Wärmepumpen
 - Sorptiv gestützte Kühlung
- Eine Berechnung der Aufteilung der Last auf mehrere Erzeuger oder Übergabesysteme ist nicht korrekt möglich
- Neben den oben genannten Problemen wurde in der Bearbeitung deutlich, dass sowohl die Norm als auch die verwendete Software in einem relativ frühen Stadium befinden und daher Fehler enthalten, die zwar über die Zeit korrigiert werden, jedoch die Bearbeitung deutlich erschwert haben.
- Weiterhin besteht aus rein praktischen Gesichtspunkten das Problem, dass Energiebedarfsausweise in Deutschland nur für neu zu errichtende Gebäude verpflichtend vorgeschrieben sind. Im Gebäudebestand kommt weitgehend der Energieverbrauchsausweis zum Einsatz, da dieser deutlich kostengünstiger angeboten werden kann. D.h. im realen Gebäudebetrieb würde sich selbst bei einer besseren Eignung der DIN V 18599 zur Ableitung von Zielwerten für den Energieverbrauch eine Synergie nur schwerlich ergeben.

Allerdings bleibt festzustellen, dass die Daten, die für einen Bedarfsausweis erhoben werden, wertvolle und notwendige Informationen für die Betriebsanalyse darstellen. Darüber hinaus befindet sich die EnEV zurzeit in einer Überarbeitungsphase, die einen Teil der oben genannten Mängel (z.B. die Abbildung der Systeme im Bereich Kälte/Klimatisierung) beseitigen wird.

Zu Dokumentation der Bestandsdaten wurde im Rahmen von ModBen eine Checkliste entwickelt, die sich für die Datenaufnahme und bei Vor-Ort-Begehungen als sehr hilfreich erwiesen hat.

12.2.3. Stufe 3a– Fehlererkennung und Diagnose

Bei der Fehlererkennung und –Diagnose (FED) ist zunächst festzustellen, dass sich der Mindestdatensatz gemäß 7.2 als hinreichend erwiesen hat, typische und häufige Fehler im Gebäudebetrieb zu identifizieren (z.B. zu lange oder nicht abgestimmte Betriebszeiten, unzureichende Absenkbetrieb, falsch eingestellte Heiz- oder Kühlkurven, falsch dimensionierte Komponenten).

Bezüglich der manuellen FED haben sich die neu entwickelten Werkzeuge von ennovatis und dem Fraunhofer ISE zur systematischen Datenerfassung und – Prozessierung und standardisierten Datenvisualisierung als äußerst hilfreich erwiesen. Eine Automatisierung zumindest der Fehlererkennung ist z.B. mit Ansätzen wie in 8.9 beschrieben möglich.

Weiterhin wurden Ansätze zur FED mit Simulation ausgewählter Subsysteme und mit Simulation des Gesamtgebäudes geprüft.

- **FED mit Simulation ausgewählter Subsysteme**

Gebäude und deren Systeme sind vor allem im Nicht-Wohngebäudebereich sehr individuell. Daher erfordert die Modellierung des Gesamtsystems heute einen hohen manuellen Aufwand.

Im Bereich der Fehlererkennung und Diagnose FED, besteht die Hoffnung, dass durch eine Einschränkung auf bestimmte, gut isolierbare, häufig vorkommende Subsysteme der manuelle Modellierungsaufwand sehr stark reduziert werden kann.

Im Rahmen von ModBen wurde versucht, das in praktisch allen Gebäuden vorkommende Subsystem „Heizkreis“ zu modellieren und das Modell zur FED einzusetzen. Mit dem Modell wird versucht, Abweichungen zwischen tatsächlichem und erwartetem (modelliertem) Verhalten als Indikation für Fehler verwenden zu können.

Im Ergebnis hat sich gezeigt, dass typische Fehler mit Modellen, die einen relativ geringem manuellen Modellierungsaufwand besitzen und mit stochastischen Methoden arbeiten, erkannt werden können. Umsetzungen in der Praxis sind denkbar, benötigen jedoch weitere Entwicklungsarbeit.

- **FED auf Ebene Gesamtgebäude mit probabilistischen Methoden**

Bei der Simulation von Gebäuden als Gesamtsystem von Baukörper und Anlagentechnik bestehen aufgrund der oft lückenhaften Informationsbasis aber auch aufgrund z.B. des Einflusses der Nutzer mehr oder weniger große Unsicherheiten, was die Festlegung von Parametern des Simulationsmodells betrifft.

Im Rahmen von ModBen auf Basis der Bayes'sche Wahrscheinlichkeitstheorie ein probabilistischer Ansatz entwickelt, der es ermöglicht, diese Unsicherheiten der Parameter als Wahrscheinlichkeitsdichten in das Modell

mit einzubeziehen. Der Ansatz ist aufgrund seiner Allgemeingültigkeit und aufgrund der Möglichkeit auch unsicheres Wissen über ein System in formal eindeutiger Weise einzubinden, äußerst interessant.

Allerdings ist der Ansatz auch numerisch sehr aufwendig. Zur Anwendung muss eine „Wissensdatenbank“ zur Verfügung stehen. Auf dem in ModBen beschrittenen Weg, wird diese Wissensdatenbank praktisch mit einer Vielzahl von Simulationen erzeugt. Dies geschieht mit Hilfe einer Markow-Ketten Monte-Carlo-Simulation.

Es konnte gezeigt werden, dass der Ansatz auf Probleme im Gebäudebereich sinnvoll angewendet werden kann. Aufgrund seiner Neuartigkeit und des hohen numerischen Aufwands konnte im Rahmen von ModBen lediglich ein Proof-of-concept erfolgen. Das Fraunhofer ISE verfolgt diesen Ansatz in Folgeprojekten weiter.

12.2.4. Stufe 3b – Optimierung

Für die (numerische) Optimierung des Gebäudebetriebs im Sinne von Kapitel 0 müssen notwendigerweise White-Box-Modelle verwendet werden.

Ein kritischer Punkt hierbei ist der Aufwand für die Modellerstellung und die notwendige Rechenzeit bzw. die notwendigen Iterationen. Daher wurden im Rahmen von ModBen gezielt nach Lösungen im Bereich der Modellbildung und der Optimierungsalgorithmen gesucht, die den Einsatz der simulationsgestützten Optimierung in der Praxis ermöglichen.

Im Rahmen des Projekts wurde die Simple Hourly Method (SHM) nach der ISO 13790 (Energy performance of buildings - Calculation of energy use for space heating and cooling) implementiert. Das *SHM* Modell erwies sich sowohl bezüglich der Rechenzeit als auch bei der Erhebung der Simulationsparameter als gut einsetzbar. Dieses Modell hat eine um den Faktor 100 schnellere Rechenzeit als detaillierte Modelle.

Die Ergebnisse demonstrieren, dass die Raumlufttemperaturen nur eingeschränkt simuliert werden können, da teilweise kein realitätsgetreues Regelverhalten abgebildet wird. Die gute Übereinstimmung dieses physikalisch basierten Modells mit den Messdaten lässt erwarten, dass das Modell auch gute Extrapolationseigenschaften über den Bereich der Referenzdaten hinaus aufweist.

Anhand einfacher Beispiele konnte die Eignung für Optimierungsaufgaben und die Praxistauglichkeit des Modells aufgezeigt werden.

Es konnte jedoch kein Optimierungs-Algorithmus identifiziert werden, der bei allen untersuchten Optimierungsaufgaben das beste Ergebnis lieferte. Die Auswahl muss also je nach Optimierungsproblem individuell, z. B. durch Tests mit verschiedenen Algorithmen, erfolgen. Alle betrachteten Algorithmen sind prinzipiell dazu geeignet, bei der Gebäudeoptimierung angewendet zu werden, da die Unterschiede im Optimum geringer als 0,2 % waren. Die Definition einer geeigneten Ziel- und Bestrafungsfunktion stellte sich als besonders wichtig heraus, da die Optimierungsalgorithmen bei einer ungünstigen Wahl nicht erfolgreich waren.

12.2.5. Stufe 4 – Betriebsüberwachung

Prinzipiell können natürlich alle Methoden, die zur Fehlererkennung und –Diagnose eingesetzt werden, auch zur Betriebsüberwachung eingesetzt werden. Ziel der Arbeiten für Stufe 4 war es jedoch, einen einfachen Ansatz zur Fehlererkennung (Ausreißerdetektion) zu verfolgen, der - im Sinne der Praxistauglichkeit - auch in

Kombination bzw. nach einer manuellen Fehlerdiagnose und –Behebung eingesetzt werden kann.

Hierfür wurde ein Algorithmus entwickelt, der mit Hilfe eines linearen Modells in Kombination mit einem Clustering zur Erkennung von Typtagen (Tage mit ähnlicher Verbrauchsstruktur) in der Lage ist eine Ausreißerdetektion für den Energieverbrauch auf Basis von Tagesdaten bereitzustellen (siehe auch 8.9).

Das entwickelte Verfahren ist in der Lage, die Verbrauchsprofile für Wärme und Strom sehr gut zu identifizieren und bekannte sowie eingebaute Ausreißer weitgehend zu detektieren.

Allerdings wurde auch offensichtlich, dass der zeitliche Umfang der notwendigen Trainingsdaten im Bereich von 5-7 Monaten liegt. Insbesondere bei signifikanten Änderungen des Betriebs und der dann notwendigen Re-Kalibrierung des Modells erscheinen diese Zeiträume sehr groß und bei Gebäuden, die häufigen Änderungen unterliegen nicht angemessen.

Hier sind weitere Verbesserungen und Entwicklungen notwendig, um auch bei häufigen Betriebsänderungen eine zeitnahe und zuverlässige Ausreißerdetektion zu gewährleisten.

12.3. Hemmnisse

Dieser Abschnitt fasst noch einmal alle Hemmnisse zusammen, die bei der Implementierung des in 7 beschriebenen Verfahrens sowie in der Diskussion mit potentiellen Anwendern und Fachleuten aufgetreten sind.

12.3.1. Generelle Hemmnisse

- **Informations- / Bewusstseinsdefizit bei Gebäudebesitzern und/oder Betriebspersonal**
Die Sinnhaftigkeit einer kontinuierlichen Betriebsüberwachung wird zwar prinzipiell anerkannt, das Kosten-Nutzen-Verhältnis wird jedoch in Frage gestellt. Außerdem gibt es kein einheitliches Verständnis des Begriffs „Betriebsüberwachung“.
- **Schwierige Datenlage**
Die Dokumentation und messtechnische Ausstattung von Bestandsgebäuden ist oft nicht ausreichend für eine Betriebsanalyse. Bestandsunterlagen sind oft unvollständig bzw. nicht aktuell, fehlen komplett oder sind schwer zugänglich aufgrund aufgeteilter Zuständigkeiten. Messdaten wiederum sind meist auf ein Minimum reduziert, das den Mindestdatensatz gemäß ModBen noch unterschreitet. Zudem ist die Erfassung von Energiedaten und Betriebsdaten oft getrennt.
- **Interoperabilität**
Trotz zum Teil fehlender oder nicht aktueller Bestandsunterlagen haben in der Regel zwei Vor-Ort Termine ausgereicht, um Gebäude und Anlage entsprechend der in 8.3 beschriebenen Checkliste zu erfassen. Die konzentrierte und übersichtliche Darstellung der Charakteristika von Gebäude und Anlage wie sie die Checkliste darstellt, hat sich in der Analyse als äußerst hilfreich erwiesen. Dennoch bleibt festzustellen, dass die systematische und einheitliche Dokumentation von Gebäuden und anlagentechnischer Ausstattung erst am

Anfang steht und in Bestandsgebäuden praktisch nicht zu finden ist. Obwohl Ansätze zum einheitlichen Datenaustausch bzw. zur digitalen Beschreibung von Gebäudemodellen (auch BIM, Building Information Model) wie etwa IFC44, Green Building XML45 oder auch die VDI 380546 z.T. schon seit Jahrzehnten in der Entwicklung sind, ist der Markt noch weit entfernt diese standardmäßig einzusetzen.

- **Verfügbares Budget**

Obwohl es aus technischer Sicht sicher möglich ist, mit hoch detaillierten Modellen und umfangreicher Messtechnik sowie einem entsprechenden ingenieurtechnischen Aufwand ein Gebäude optimal zu betreiben, sind die Kosten für ein solches Vorgehen deutlich zu hoch, um in der Breite Anwendung zu finden.

Aus Befragungen, die im Rahmen des Projekts gemacht wurden, lässt sich erkennen, dass Gebäudebesitzer bereit sind für die erstmalige Einrichtung einer kontinuierlichen Betriebsüberwachung etwa 10-20% der jährlichen Energiekosten (vor Optimierung) aufzuwenden, während Sie für die Betreuung des Systems nur etwa 2% der jährlichen Energiekosten zahlen würden. Daraus ergibt sich ein relativ enger Spielraum für die Kosten von Messtechnik und Personal.

- **Organisatorische Probleme**

Für die kontinuierliche Betriebsanalyse ist es sinnvoll, ein Team zu bilden, klare Zuständigkeiten zuzuweisen und einen Aktionsplan aufzustellen, der beschreibt wie und durch wen identifizierte Einsparpotenziale umgesetzt werden. Falls dies nicht geschieht, bleiben viele Einsparmöglichkeiten ungenutzt oder werden erst viele Woche oder gar Monate nach ihrer Identifikation umgesetzt.

12.3.2. Technische Hemmnisse

Die Installation der Messtechnik bzw. die Ertüchtigung der Gebäudeautomation war mit einigen technischen Problemen verbunden, die hier kurz dargestellt werden.

- **Datenerfassung**

Die Erfassung des Mindestdatensatzes hat sich trotz seines beschränkten Umfangs als große Hürde erwiesen. Zum einen waren in allen Demonstrationsgebäuden Nachrüstungen von Messtechnik notwendig, um den Mindestdatensatz komplett zu erfassen.

Zum anderen ist die kontinuierliche Erfassung und gemeinsame Speicherung von sowohl Energieverbrauchsdaten als auch von Betriebsdaten mit hoher zeitlicher Auflösung noch keineswegs ein Standard.

Insbesondere die Erweiterung von GA-Systemen (hohe zeitliche Auflösung, Datenübertragung) hat sich als aufwendig und kostenintensiv erwiesen.

- **Zeitliche Auflösung der Datenerfassung / Stromversorgung der Energiezähler**

Viele Energiezähler im Bestand sind nicht für eine zeitlich hoch aufgelöste

⁴⁴ www.buildingsmart-tech.org

⁴⁵ www.gbxml.org

⁴⁶ VDI 3805 - Produktdatenaustausch in der TGA, www.vdi3805.org/

Datenerfassung ausgelegt. Sie sind häufig mit einer Batterie ausgestattet, die über einen Zeitraum von einigen Jahren nur monatliche Auslesungen zulässt. Energiezähler sollten daher immer eine Stromversorgung haben.

- **Beschränkungen bei der Feldbus-Kommunikation**

Bei vielen Feldbussystemen ist die Bandbreite der Kommunikation äußerst begrenzt. Bei hoher zeitlicher Auflösung der Messdaten (5-10 Minutenwerte) kann die Grenze der Leistungsfähigkeit überschritten sein, so dass es zu Datenverlusten kommen kann. In einigen Fällen wurde daher das Feldbussystem ertüchtigt, indem Automationsstationen ergänzt wurden.

- **Kabelzug**

Mit der Ergänzung von Sensoren in einem bestehenden haustechnischen System ist oftmals ein nicht unbeträchtlicher Verkabelungsaufwand verbunden. Bei langen Wegen können so erhebliche Kosten entstehen, die evtl. durch Brandschutzmaßnahmen oder das Öffnen und Schließen von Schächten noch zusätzlich erhöht werden.

12.4. Weiterer Forschungs- und Entwicklungsbedarf

Aus Sicht des Projektteams ergibt sich folgender Forschungs- und Entwicklungsbedarf:

- **FED für typische und häufige Subsysteme**

Um FED in vielen Gebäuden anwenden zu können, ist es notwendig sich auf typische und häufige Systeme bzw. Subsysteme zu konzentrieren (z.B. Heizkreise, RLT-Anlagen mit typischen Konfigurationen, etc.).

Mit dem Mindestdatensatz und den darauf aufsetzenden Methoden wurden in ModBen einige Beispiele aufgezeigt (siehe 8.5 und 8.6).

Wichtig in diesem Zusammenhang ist die Unterscheidung von Einzelkomponenten wie z.B. einem Gaskessel und von Systemen oder Subsystemen, d.h. Strukturen, die aus verschiedenen Einzelkomponenten aufgebaut sind (z.B. die Heizungsverteilung, Wärmeerzeugung, Warmwasserbereitung, Lüfterheizung).

Während im Falle von Einzelkomponenten durch die Hersteller oftmals detaillierte Inbetriebnahmeregelungen geliefert werden und u.U. sogar „intelligente Regelungen“, die eine automatische Optimierung oder Betriebsüberwachung zulassen, ist die Einregulierung und Optimierung im Falle von Systemen oder Subsystemen der Fachkenntnis, der Sorgfalt (und nicht zuletzt dem Zeit- und Kostenplan) der Planer und Ausführenden überlassen. Im Extremfall können dadurch Systeme entstehen, bei der die Einzelkomponenten für sich korrekt funktionieren, das Gesamtsystem jedoch erhebliche Optimierungspotenziale aufweist (z.B. kann es beim Einsatz von hydraulischen Weichen zur Kopplung mehrerer Wärme- oder Kälteerzeuger und -Verbraucher zu erheblichen Effizienzverlusten (bzw. Exergieverlusten) kommen).

Daher erscheint es sinnvoll diesen Weg weiterzuverfolgen – auch weil eine enge Kopplung mit der Gebäudeautomation denkbar ist und so eine gute Integration in die Abläufe der Betriebsführung erfolgen kann.

- **Interoperabilität**

Ansätze zur Betriebsoptimierung (im Sinne von Kapitel 4.1) aber auch Methoden zur FED, die mit White- oder Gray-Box-Modellen arbeiten, leiden

nach wie vor darunter, dass eine vollständige, aktuelle und fehlerfreie Dokumentation von Gebäuden (Flächen, Nutzung, Aufbau Gebäudehülle, Art und Eigenschaften der haustechnischen Anlagen, etc.) in den allermeisten Fällen nicht vorliegt. Und selbst, wenn das der Fall ist, müssen die Daten zur Verwendung in einem Modell zunächst manuell aufbereitet werden. Damit ist der Aufwand für die Modellerstellung und die Kalibrierung meist zu hoch um die erwähnten Verfahren flächendeckend einsetzen zu können.

Die Hoffnung, dass die Vorgaben der EnEV bzw. der DIN V 18599 hier zu einer Vereinheitlichung beitragen können, hat sich leider nicht oder nur teilweise bestätigt.

Insgesamt ist es aus Sicht des Projektteams notwendig an den Schnittstellen zwischen Gebäudeplanung, Ausführung, Gebäudeautomation und FED/Optimierung weiter an Lösungen für einen möglichst reibungslosen und verlustfreien Datenaustausch zu arbeiten.

- **Behandlung von Unsicherheiten in der Modellierung**

Bei der Modellierung bzw. Simulation von Gebäuden sind viele Parameter Unsicherheiten unterworfen. Typisches Beispiele ist das Nutzerverhalten (z.B. in Bezug auf Anwesenheitszeiten, Belegungsdichte, Heiz- und Lüftungsverhalten). Aber auch „technische“ Parameter wie U-Werte der Gebäudehülle können aufgrund fehlender Informationen unsicher sein. Im Rahmen von ModBen wurden diese Unsicherheiten mit stochastischen (8.6) und probabilistischen (8.7) Methoden behandelt. Im Ergebnis erhält man damit eine Aussage über die Wahrscheinlichkeit bestimmter Betriebszustände. Dieses Vorgehen unterscheidet sich grundlegend von klassischen Simulationsrechnungen und hat den Vorteil, dass vorhandene Unsicherheiten bewertet werden können und Teil des Modells sind.

Simulationsmodelle dieser Art werden praktisch – außer in der Forschung - noch nicht verwendet. Weitere Forschung und Entwicklung erscheint sinnvoll.

- **Organisatorische Aspekte: Einbindung in der Gebäudebetrieb**

Neben den technischen Aspekten spielen die organisatorischen Aspekte eine wichtige Rolle für den Erfolg der Betriebsanalyse von Gebäuden. Zuständigkeiten müssen geklärt sein, die notwendigen Prozesse müssen dokumentiert und nachverfolgt werden. Auch hier erscheint es sinnvoll über Vereinheitlichung nachzudenken und entsprechende Werkzeuge für die Nachverfolgung der Prozesse zu entwickeln.

Anhang

A Abkürzungen

AT	Außentemperatur
CC	Continuous Commissioning
EMS	Energy Management System
EnEV	Energieeinsparverordnung - Verordnung über energiesparenden Wärmeschutz und energiesparende Anlagentechnik bei Gebäuden
EnOB	Förderprogramm „Energieoptimiertes Bauen“ des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie
EPBD	European Performance of Buildings Directive
FED	Fehlererkennung und -Diagnose
GA	Gebäudeautomation
KKM	Kompressionskältemaschine
RLT-Anlage	Raumlufttechnische Anlage

B Literatur

- [1] S. Katipamula and M.R. Brambley, “Methods for fault detection, diagnostics, and prognostics for building systems-A review, part I,” *HVAC&R Research*, vol. 11, 2005, p. 3–25.
- [2] S. Katipamula, “Methods for fault detection, diagnostics, and prognostics for building systems-A review, part II,” *HVAC&R Research*, vol. 11, 2005, p. 169–187.
- [3] M. Liu, D.E. Claridge, and W. Turner, “Continuous Commissioning Guidebook: Maximizing Building Energy Efficiency and Comfort,” 2002.
- [4] D.C. J.C. Visier, J. Lebrun, “Commissioning tools for improved energy performance, Results of IEA ECBCS ANNEX 40,” 2004.
- [5] J. Hyvärinen and S. Kärki, *Building optimization and fault diagnosis source book*, 1996.
- [6] A. Dexter and J. Pakanen, “Demonstrating automated fault detection and diagnosis methods in real buildings,” *Espoo. VTT Building Technology*, 2001.
- [7] S. Katipamula, “Methods for fault detection, diagnostics, and prognostics for building systems-A review, part II,” *HVAC&R Research*, vol. 11, 2005, p. 169–187.
- [8] M. Wetter, “Simulation-based building energy optimization,” Citeseer, 2004.
- [9] D.E. Claridge, “Using simulation models for building commissioning,” *Mechanical Engineering*, 2004.
- [10] E. Palomo Del Barrio and G. GUYON, “Using Parameters Space Analysis Techniques for Diagnostic Purposes in the Framework of Empirical Model Validation - A Report of Task 22, Subtask A, Building Energy Analysis Tools,” *International Energy Agency*, 2002.
- [11] D. Claridge, N. Bensouda, S. Lee, and G. Wei, “Manual of Procedures for Calibrating Simulations of Building Systems, Lawrence Berkley National Laboratory,” 2003.
- [12] *ASHRAE handbook: fundamentals*, American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers, 2001.
- [13] J. Lebrun, “Simulation of a HVAC System with the Help of an Engineering Equation Solver,” *7th IBPSA Conference, Brazil*, 2001, pp. 1119-1126.
- [14] F. Déqué, F. Ollivier, and A. Poblador, “Grey boxes used to represent buildings with a minimum number of geometric and thermal parameters,” *Energy and buildings*, vol. 31, 2000, p. 29–35.
- [15] L. Ljung, *System Identification: Theory for the User (2nd Edition)*, Prentice Hall, 1999.

- [16] J. Kissock and J. Haberl, "Inverse modeling toolkit: numerical algorithms," *ASHRAE Transactions*, vol. 109, 2003.
- [17] R. Isermann, *Fault-Diagnosis Systems - An Introduction from Fault Detection to Fault Tolerance*, Springer, 2006.
- [18] J.E. Braun and P. D., "An Inverse Gray-Box Model for Transient Building Load Prediction," *Building*, 2002, pp. 73-100.
- [19] R.B. Vilim, H.E. Garcia, and F.W. Chen, "An Identification Scheme Combining First Principle Knowledge , Neural Networks , and the Likelihood Function," *IEEE Transactins on Control System Technology*, vol. 9, 2001, pp. 186-199.
- [20] P. Sahlin, "The Methods of 2020 for Building Envelope and HVAC Systems Simulation-Will the Present Tools Survive?," 2000.
- [21] P. Sahlin, L. Eriksson, P. Grozman, H. Johnsson, A. Shapovalov, and M. Vuolle, "Whole-building simulation with symbolic DAE equations and general purpose solvers," *Building and Environment*, vol. 39, 2004, pp. 949 - 958.
- [22] P. Andre, C. Hannay, J. Hannay, J. Lebrun, V. Lemort, and I.V. Teodorese, "A contribution to the audit of an air-conditioning system: modeling, simulation and benchmarking," *Building Service Engineering Research and Technology*, vol. 29, 2008, pp. 85-98.
- [23] V. Venkatasubramanian, R. Rengaswamy, and S.N. Kavuri, "A review of process fault detection and diagnosis:: Part II: Qualitative models and search strategies," *Computers & Chemical Engineering*, vol. 27, 2003, p. 313–326.
- [24] V. Venkatasubramanian, R. Rengaswamy, S.N. Kavuri, and K. Yin, "A review of process fault detection and diagnosis:: Part III: Process history based methods," *Computers & Chemical Engineering*, vol. 27, 2003, p. 327–346.
- [25] V. Venkatasubramanian, R. Rengaswamy, K. Yin, and S.N. Kavuri, "A review of process fault detection and diagnosis:: Part I: Quantitative model-based methods," *Computers & Chemical Engineering*, vol. 27, 2003, p. 293–311.
- [26] S. Wang and Z. Jiang, "Valve fault detection and diagnosis based on CMAC neural networks," *Energy and buildings*, vol. 36, 2004, p. 599–610.
- [27] T. Salsbury and R. Diamond, "Fault detection in HVAC systems using model-based feedforward control," *Energy and buildings*, vol. 33, 2001, p. 403–415.
- [28] P. Sreedharan and P. Haves, "Comparison of chiller models for use in model-based fault detection," *International Conference for Enhanced Building Operations (ICEBO)*, organized by Texas A&M University, Austin, TX, Citeseer, 2001.
- [29] S. Wang and X. Xu, "Simplified building model for transient thermal performance estimation using GA-based parameter identification," *International Journal of Thermal Sciences*, vol. 45, 2006, p. 419–432.

- [30] J. Wen and T.F. Smith, "Development and validation of online models with parameter estimation for a building zone with VAV system," *Energy and buildings*, vol. 39, 2007, p. 13–22.
- [31] P. Andre, C. Hannay, J. Hannay, J. Lebrun, V. Lemort, and I.V. Teodorese, "A contribution to the audit of an air-conditioning system: modeling, simulation and benchmarking," *Building Service Engineering Research and Technology*, vol. 29, 2008, pp. 85-98.
- [32] J. Pakanen and S. Karjalainen, "An ARMAX-model approach for estimating static heat flows in buildings," *VTT PUBLICATIONS*, vol. 4, 2002, p. 7.
- [33] K. Lee and J.E. Braun, "Development and application of an inverse building model for demand response in small commercial buildings," *Proceedings of SimBuild*, 2004, pp. 1-12.
- [34] M. Lundin, S. Andersson, and R. Östlin, "Further validation of a method aimed to estimate building performance parameters," *Energy and Buildings*, vol. 37, 2005, p. 867–871.
- [35] J.E. Seem, "Using intelligent data analysis to detect abnormal energy consumption in buildings," *Energy and Buildings*, vol. 39, 2007, p. 52–58.
- [36] J.M. Liu, R. Chen, L.M. Liu, and J.L. Harris, "A semi-parametric time series approach in modeling hourly electricity loads," *Journal of Forecasting*, vol. 25, 2006, p. 537–559.
- [37] J. Yang, H. Rivard, and R. Zmeureanu, "On-line building energy prediction using adaptive artificial neural networks," *Energy and Buildings*, vol. 37, Dec. 2005, pp. 1250-1259.
- [38] S. Karatasou, M. Santamouris, and V. Geros, "Modeling and predicting building's energy use with artificial neural networks: Methods and results," *Energy and Buildings*, vol. 38, Aug. 2006, pp. 949-958.
- [39] C.E.D. Kawashima, M., "Hourly thermal load prediction for the next 24 hours by ARIMA, EWMA, LR, and artificial neural network," *ASHRAE Transactions 101*, 1995, pp. 186-200.
- [40] J. Haberl and S. Thamilseran, "The great energy predictor shootout. II: Measuring retrofit savings," *ASHRAE journal*, vol. 40, 1998, p. 49–56.
- [41] K.L. Gillespie Jr, P. Haves, R. Hithcock, J.J. Deringer, and K. Kinney, "A specifications guide for performance monitoring systems," *Lawrence Berkeley National Laboratory*, 2007.
- [42] O. Baumann, "ICEBO International Conference for Enhanced Building Operations Enhanced Building Operation Using ' Operation Diagnostics ' – A Case Study," 2005, pp. 1-9.

- [43] C. Neumann, Yoshida, *Commissioning Tools for Existing and Low Energy Buildings - IEA ECBCS Annex 47, Report 2*, 2010.
- [44] P.G. Ellis, B. Griffith, N. Long, and P. Torcellini, "Automated Multivariate Optimization Tool for Energy Analysis Preprint," *Energy and Buildings*, 2006.
- [45] M. Wetter, *Generic Optimization Program User Manual Version 2.0.0*, 2004.
- [46] M. Wetter and J. Wright, "Comparison of a generalized pattern search and a genetic algorithm optimization method," *Proc. of the 8-th IBPSA Conference*, Citeseer, 2003, p. 1401–1408.
- [47] J.A. Nelder and R. Mead, "A simplex method for function minimization," *The Computer Journal*, vol. 7, 1965, pp. 308-313.
- [48] S. Selkowitz, "Building Performance Assessment using On-Line Simulations," 2003.
- [49] J.N. Holst, "Using whole building simulation models and optimizing procedures to optimize building envelope design with respect to energy consumption and indoor environment," *Eighth International IBPSA Conference, Eindhoven, Netherlands*, 2003, p. 507–514.
- [50] O. Baumann, "Design and Optimization of Control Strategies and Parameters by Building and System Simulation," 2003.
- [51] H.-yun H. Xing, L.K. Norford, and S. Anderson, "Building Load Control and Optimization By," Massachusetts Institute of Technology, 2004.
- [52] P.G.P. Henze, "Optimale Betriebsführung von Nutzgebäuden," *8. Biberacher Forum Gebäudetechnik, Hochschule Biberach*, 2007.
- [53] Bianchi, "Adaptive Modellbasierte Prädikitive Regelung einer Kleinwärmepumpenanlage," ETH Zürich, 2003.
- [54] VDI, "VDI 3807 Energieverbrauch skennwerte für Gebäude - Heiz- und Stromverbrauchskennwerte," 1998.
- [55] ages GmbH, "Verbrauchskennwerte 2005," 2007.
- [56] ARGE Benchmark, *Benchmarks für die Energieeffizienz von Nichtwohngebäuden*, 2007.
- [57] Institut für Erhaltung und Modernisierung von Bauwerken e.V. (IEMB), "Datenbank zu Energieverbrauchskennwerten von Gebäuden des Bundes, der Länder und Kommunen," 2006.
- [58] "Verordnung zur Änderung der Energieeinsparverordnung," *Bundesgesetzblatt, Jahrgang 2009 Teil I Nr. 23*, 2009.

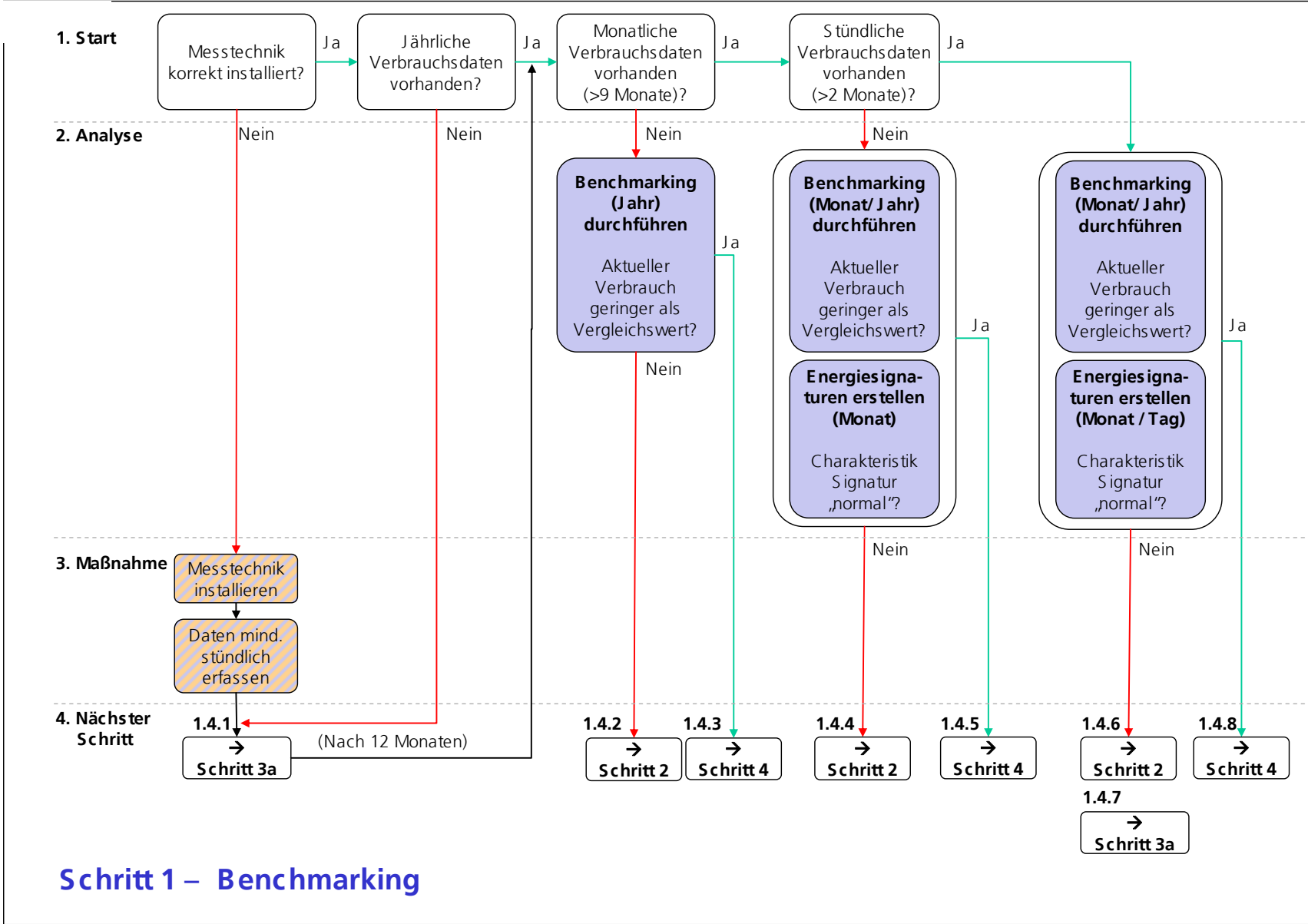
- [59] “DIRECTIVE 2002/91/EC OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL on the energy performance of buildings,” *Official Journal of the European Communities*, 2003.
- [60] DIN Deutsches Institut für Normung e.V, “DIN V 18599 - Energetische Bewertung von Gebäuden – Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung,” 2007.
- [61] S. Zehnle, “Eignung der Berechnungsmethodik DIN V 18599 zur Abbildung des Energieverbrauchs von realen Nicht-Wohngebäuden,” Hochschule Offenburg University of Applied Sciences (FHO), 2008.
- [62] J. Lebrun, “Simulation of a HVAC System with the Help of an Engineering Equation Solver,” *7th IBPSA Conference, Brazil*, 2001, pp. 1119-1126.
- [63] S. Komhard, “Model-Based Approach for Performance Monitoring of Commercial Buildings,” University of Applied Science Berlin, 2008.

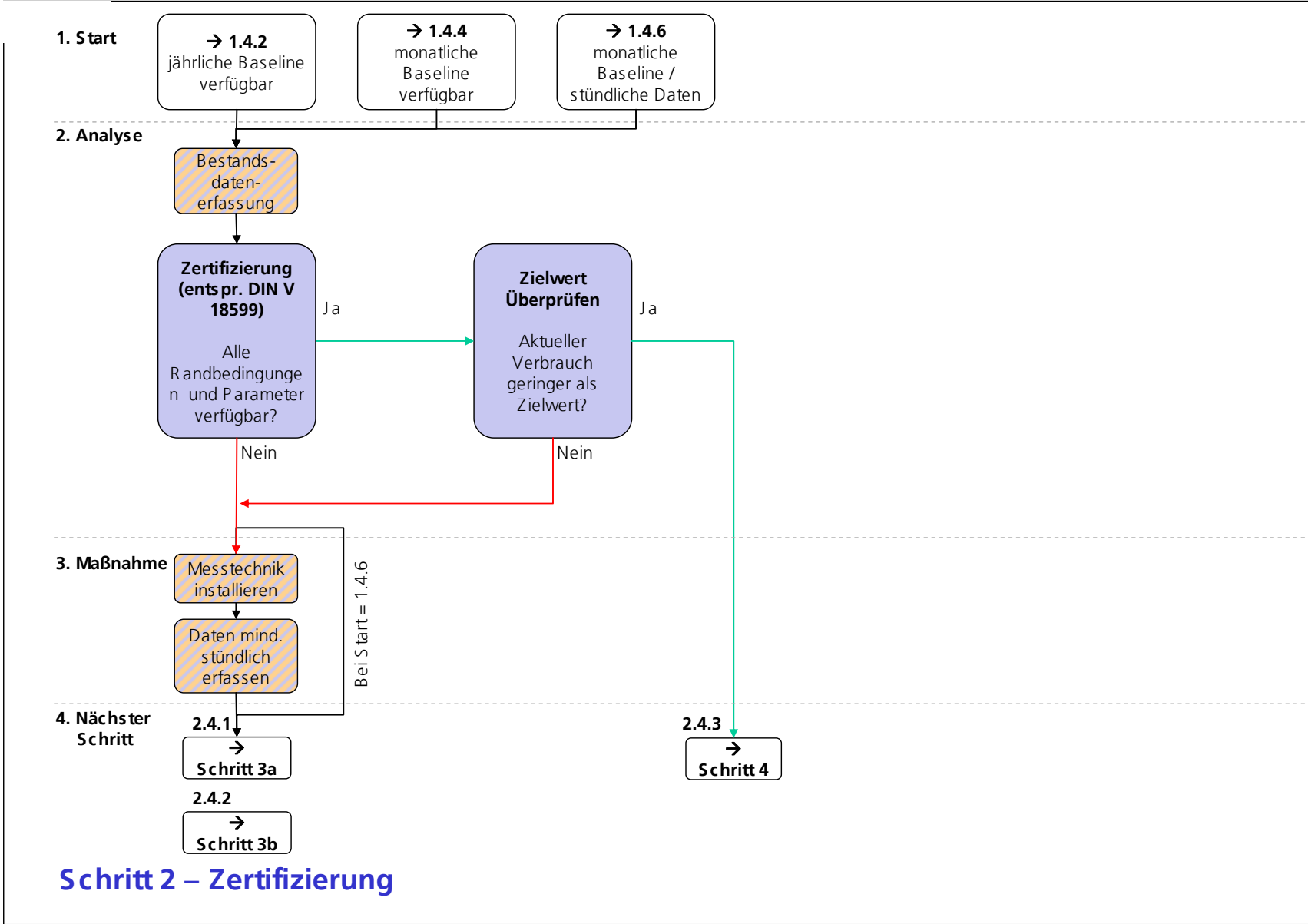
C Veröffentlichungen und Vorträge

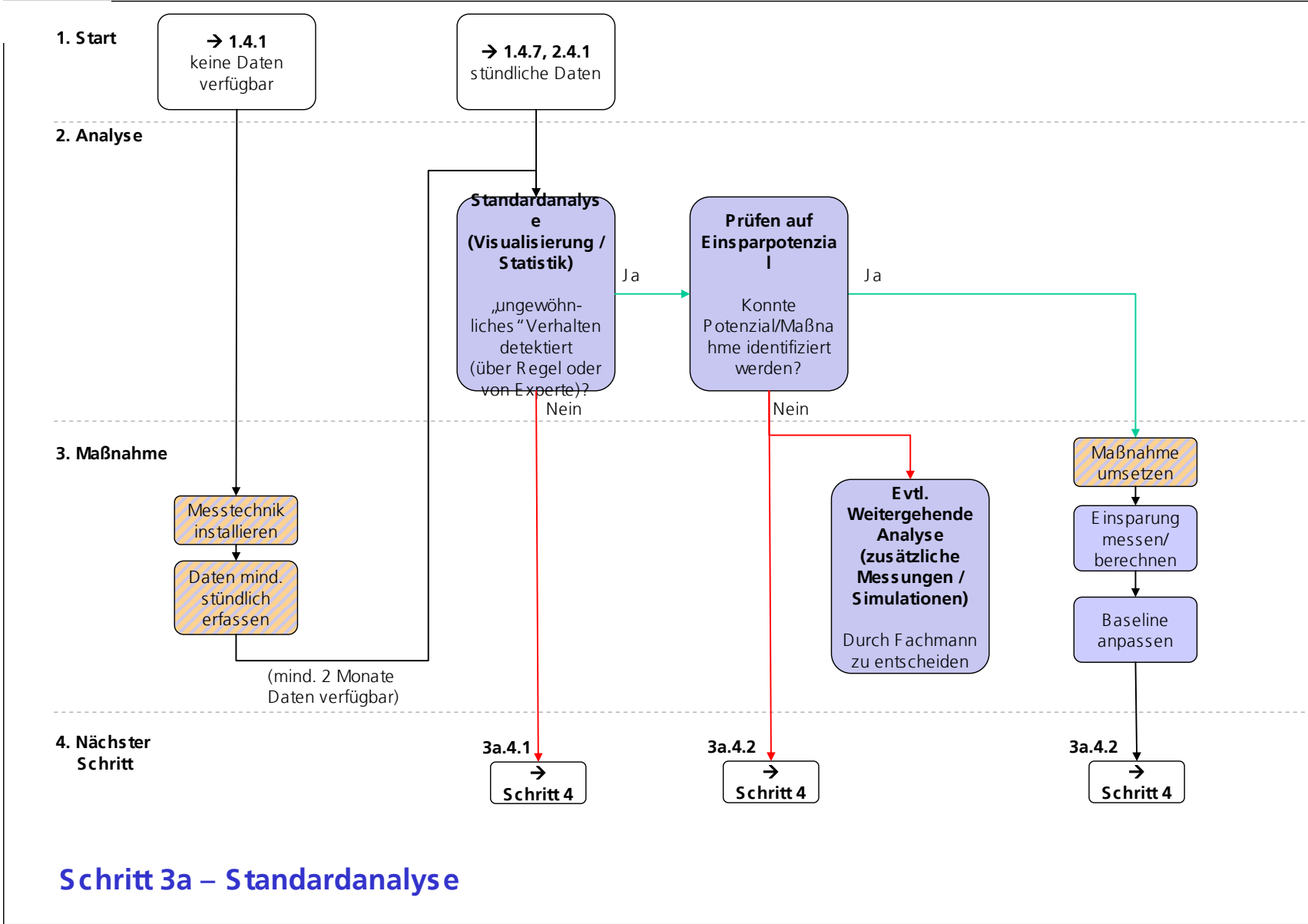
- Website: www.modben.org
- Vorträge / Präsentationen
 - University of Nebraska, Omaha, April 2007
 - Uni Karlsruhe, Seminar Energiemonitoring von Gebäuden, Okt. 2007
 - Meeting IEA ECBCS Annex 47, Kyoto, Oktober 2007
 - Asian Pacific Conference on Building Commissioning, Kyoto, Oktober 2007
 - Präsentation bei Fa. Equa, Stockholm, Schweden, Januar 2008
 - Meeting IEA ECBCS Annex 47, Los Angeles, April 2008
 - Universität Nebraska, Omaha, USA April 2008
 - Präsentation für die Hochschule Luzern am ISE, April 2008
 - Präsentation an der Universität Karlsruhe, Juni 2008
 - Workshop, Vorträge im Rahmen der ICEBO 2008, Berlin, Oktober 2008
 - KIT Workshop, Universität Karlsruhe, Dezember 2008
 - Energieeffizienz durch intelligentes Gebäudemanagement, Fraunhofer-InHaus-Zentrum, Duisburg, Februar 2009
 - Energy Masters, Berlin, März 2009
 - Local renewables, Freiburg, April 2009
 - EnOB Statusseminar, Würzburg, Juni 2009
 - Präsentation im Rahmen eines Workshops für Wasser führende Systeme bei EQUA, Stockholm, Schweden, August 2009
 - Vortrag: „Betriebsoptimierung von Nichtwohngebäuden Erfahrungen aus den Projekten ModBen und Building EQ“ 11. Biberacher Forum Gebäudetechnik, 18. März 2010
 - Vortrag: Development and application of ongoing commissioning methods and tools for non residential buildings in German and European research programs - 6th International Conference on Energy Efficiency in Commercial Buildings (IEECB'10) 14 April, 2010, Messe Frankfurt - Frankfurt (Germany)
- Veröffentlichungen / Dokumente:
 - „Modellbasierte Betriebsanalyse - Schritte bei der Gebäudeanalyse“, Christian Neumann, Dirk Jacob, Fraunhofer ISE, September 2007
 - „Modellbasierte Methoden für die Fehlererkennung und Optimierung im Gebäudebetrieb“, Christian Neumann, Dirk Jacob, Fraunhofer ISE, September 2007
 - „Eignung der Berechnungsmethodik DIN V 18599 zur Abbildung des Energieverbrauchs von realen Nicht-Wohngebäuden“, Sebastian Zehnle, Diplomarbeit, Fraunhofer ISE, Hochschule Offenburg, September 2008

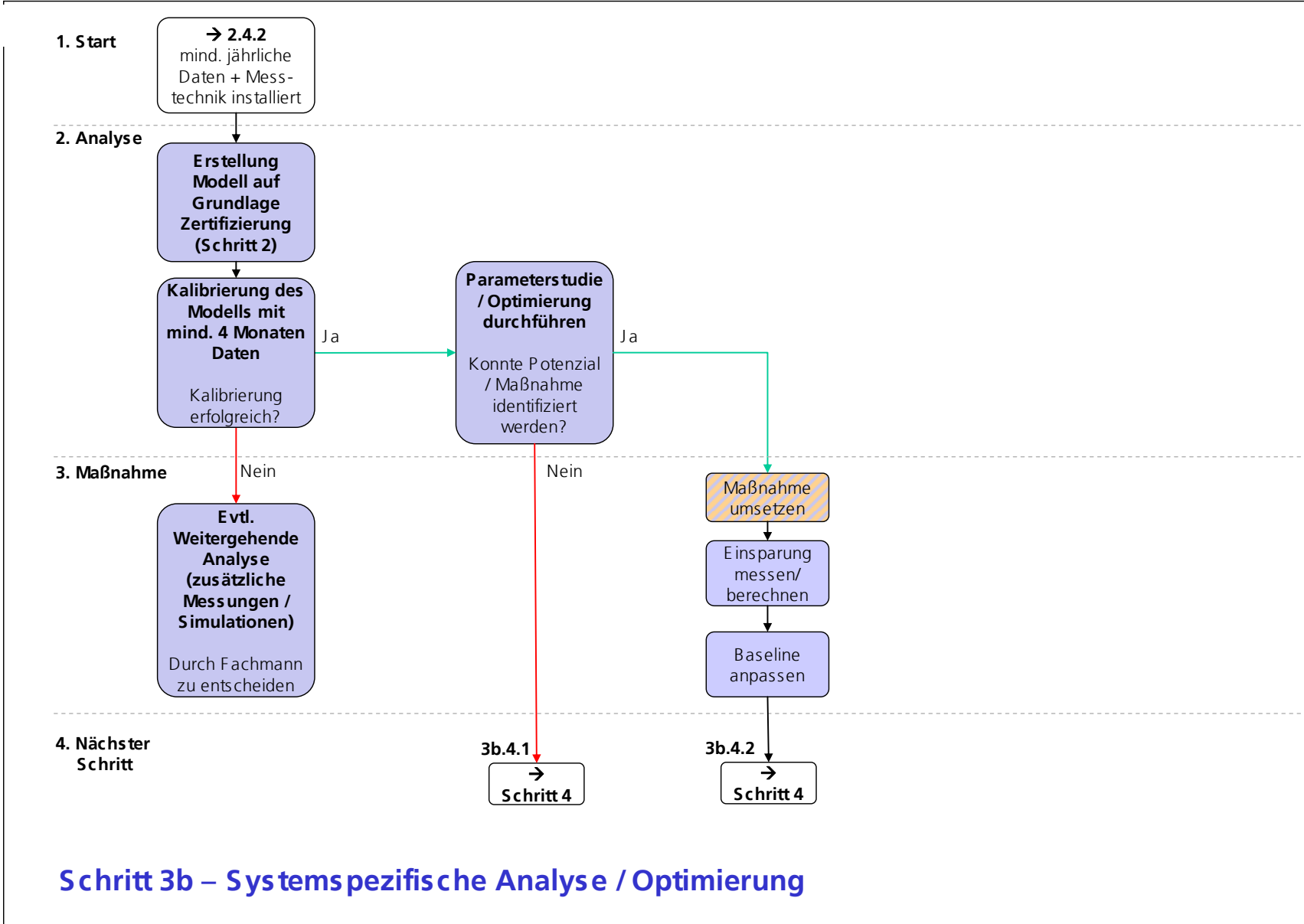
- "Model-Based Approach for Performance Monitoring of Commercial Buildings", Susanne Komhard, Masterarbeit, Fraunhofer ISE, Fachhochschule für Technik und Wirtschaft Berlin, Spetember 2008
- „Simulationsmodelle zur Energieoptimierung des Gebäudebetriebs“, Sebastian Burhenne, Masterarbeit, Fraunhofer ISE, Fachhochschule Erfurt, Oktober 2008.
- „Black-box models for fault detection and performance monitoring of buildings“, Dirk Jacob, Sebastian Dietz, Susanne Komhard, Christian Neumann and Sebastian Herkel, Journal of Building Performance Simulation, First published on: 04 January 2010 (iFirst)
- Konferenzen / Workshops
 - Workshop im Rahmen der ICEBO 2008 in Berlin mit ca. 55 Teilnehmern
 - ICEBO Oktober 2008 Berlin: 3 Paper im Tagungsband veröffentlicht:
 - „Simulation Models to Optimize the Energy Consumption of Buildings“, Sebastian Burhenne, Dirk Jacob, Fraunhofer ISE, Oktober 2008
 - "Black Box Models for Performance Monitoring of Commercial Buildings", Susanne Komhard, Christian Neumann, Fraunhofer ISE, Oktober 2008
 - "Improved Building Energy Performance Modelling Through Comparison of Measured Data with Simulated Results", Shelley Bambrook, Dirk Jacob, Fraunhofer ISE, Oktober 2008
 - BauSim2008 Universität Kassel 08.-10.09.2008: Paper eingereicht und akzeptiert „Modellbasierte Betriebsanalyse - Schritte bei der Gebäudeanalyse“ Dirk Jacob, Sebastian Dietz, Christian Neumann, Sebastian Herkel, Fraunhofer ISE
 - BuildSim2010 New York 12.-14.08.2010: „Uncertainty analysis in building simulation with Monte Carlo techniques“ Sebastian Burhenne¹, Dirk Jacob¹, Anthony Florita², Gregor P. Henze², ¹Fraunhofer ISE, ²University of Colorado at Boulder
 - BuildSim2010 New York 12.-14.08.2010: „Optimizing building energy simulation models in the face of uncertainty“ Dirk Jacob¹, Sebastian Burhenne¹, Anthony Florita², Gregor P. Henze², ¹Fraunhofer ISE, ²University of Colorado at Boulder
- Weiterverbreitung:
 - EU-Projekt (IEE/SAVE): „Building EQ“ (www.buildingeq.eu)

D Fließbilder Prozessschritte

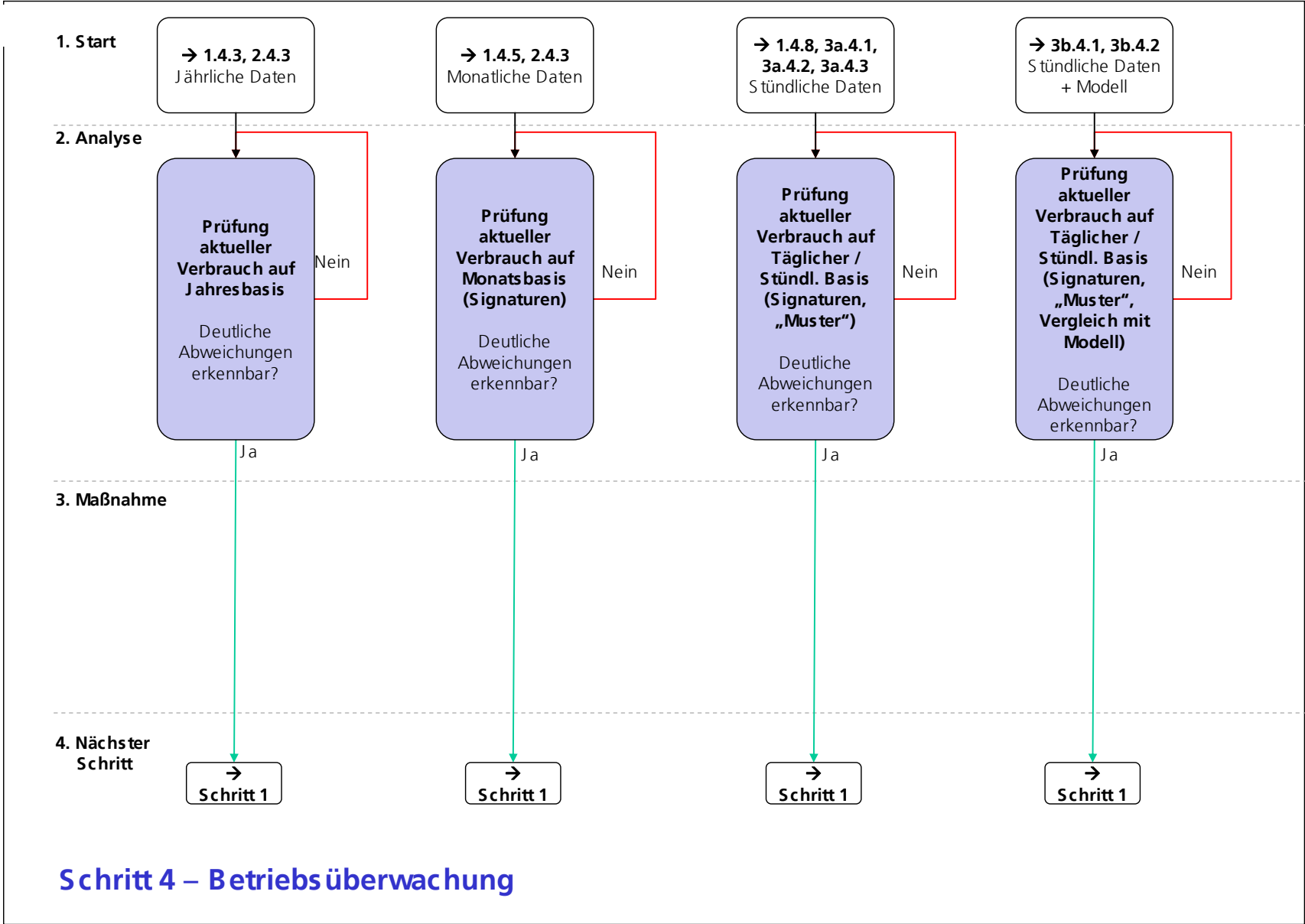






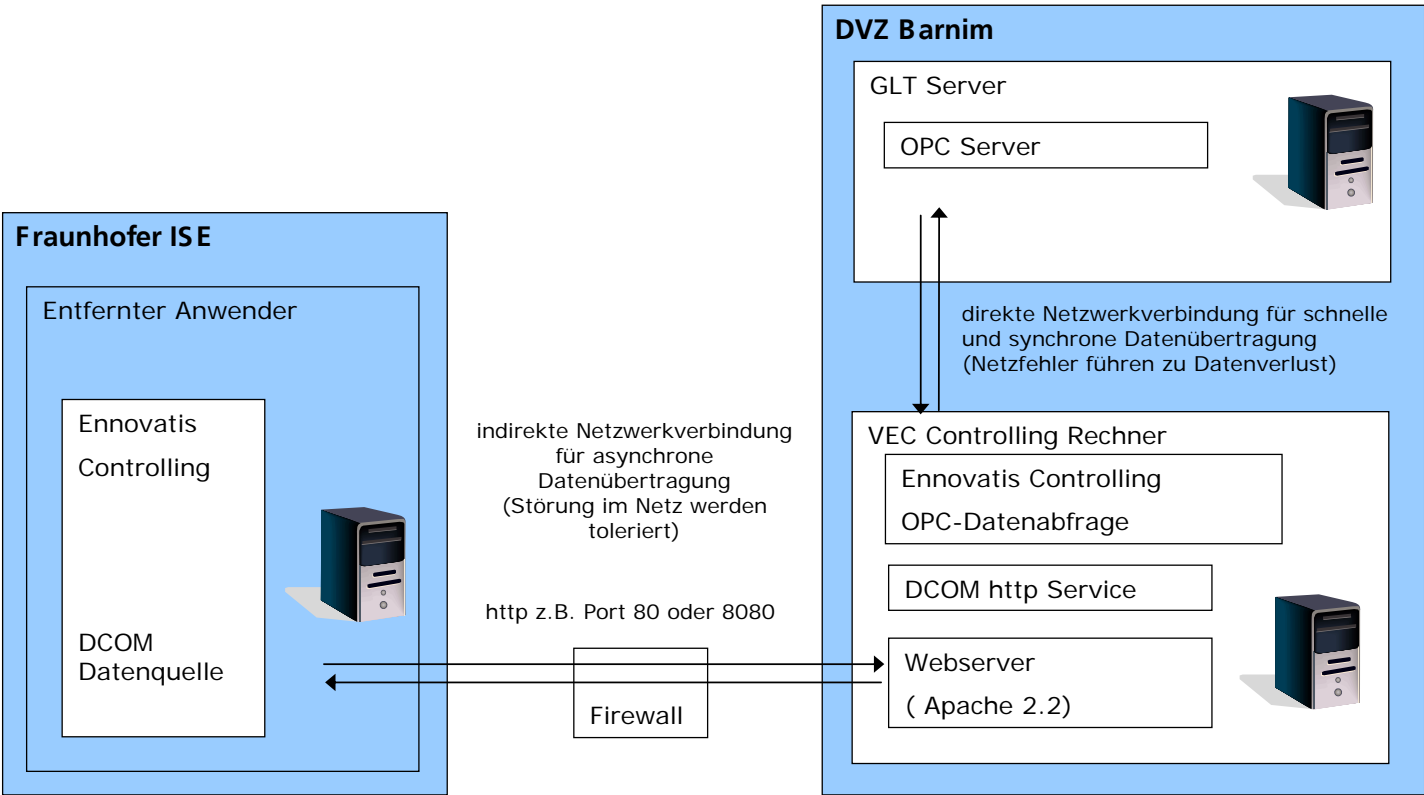


Schritt 3b – Systemspezifische Analyse / Optimierung

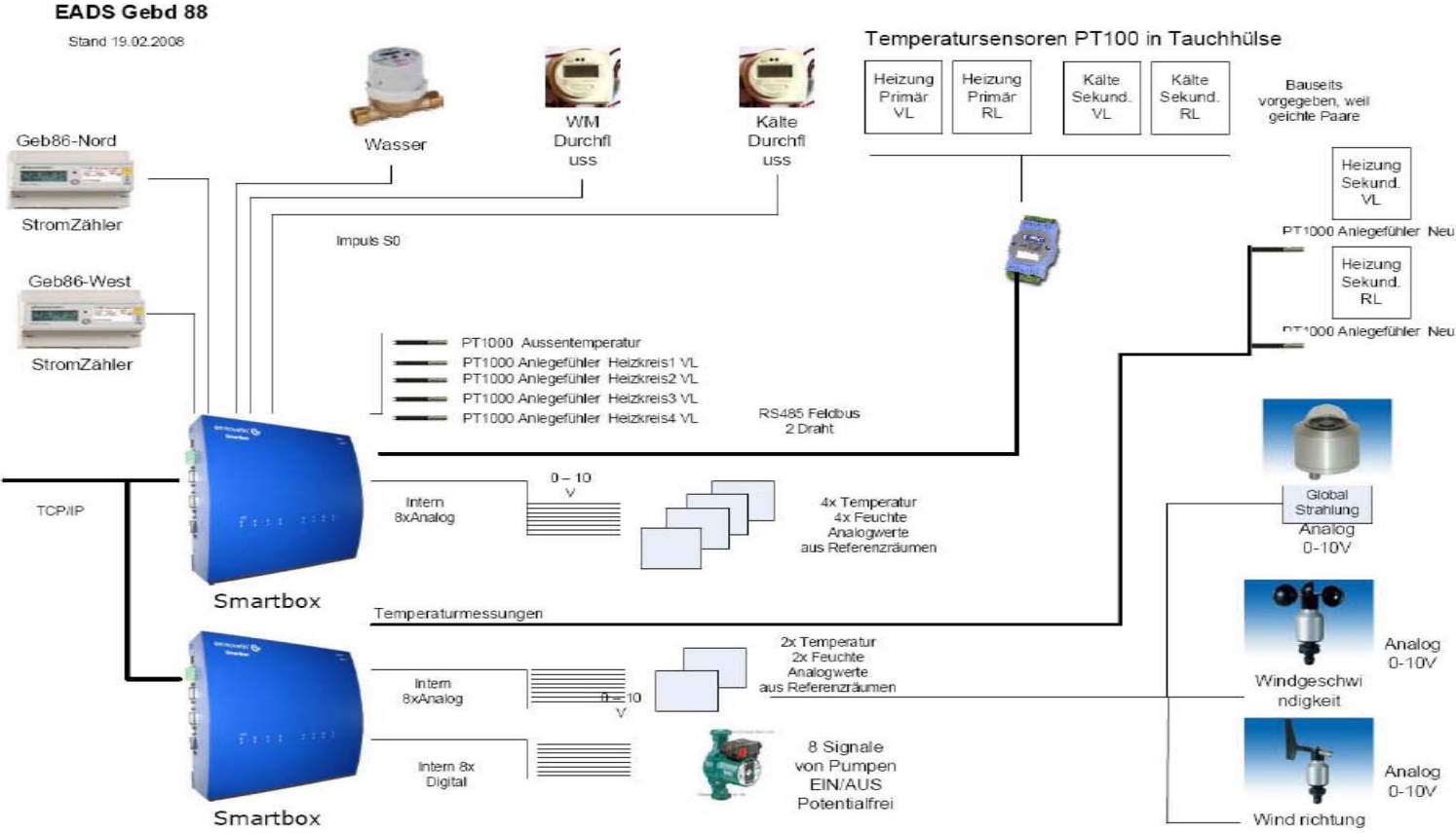


E Datenerfassung und –Transfer in den Demonstrationsgebäuden

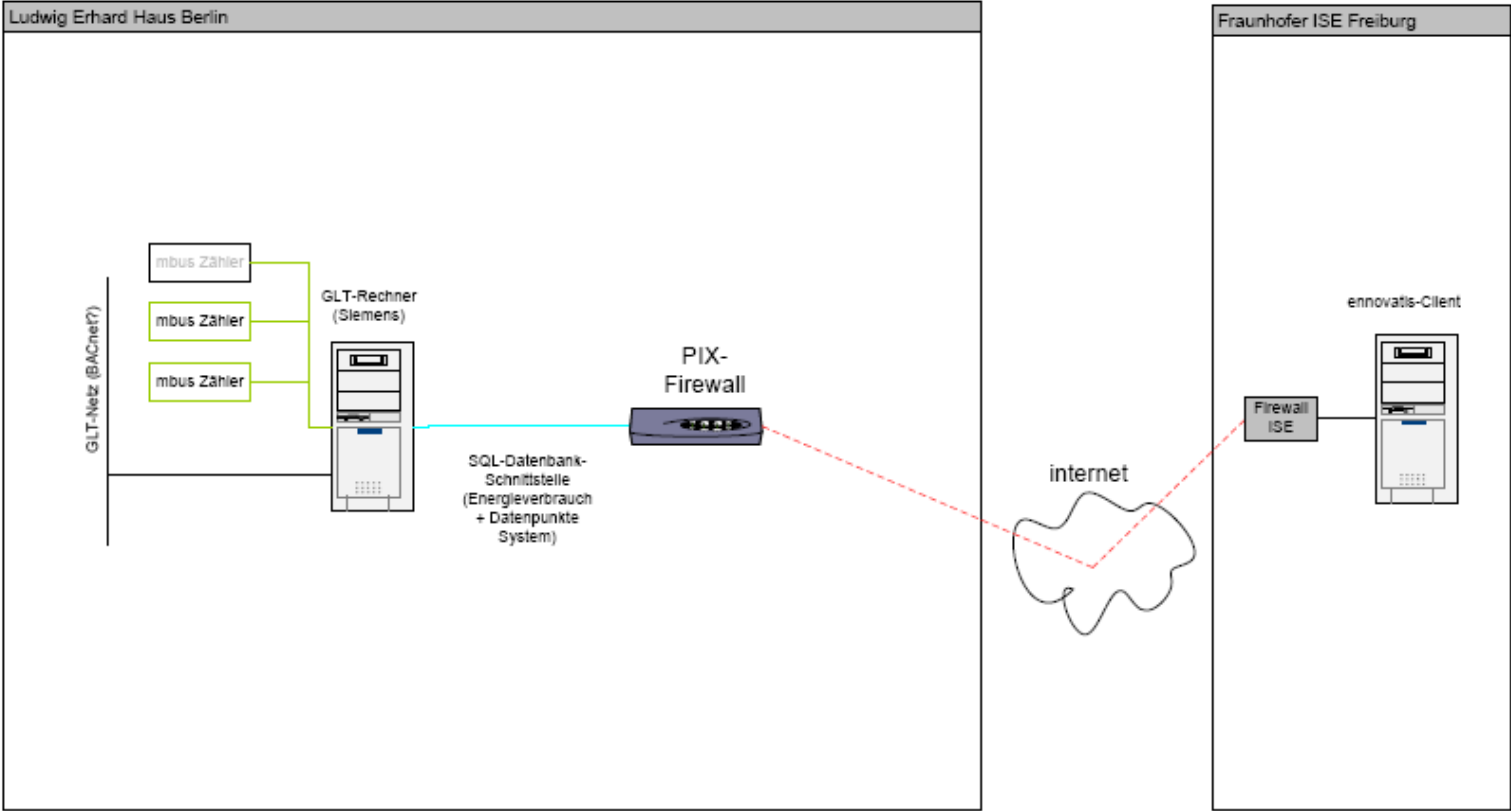
DVZ Barnim



EADS Gebäude 88, München

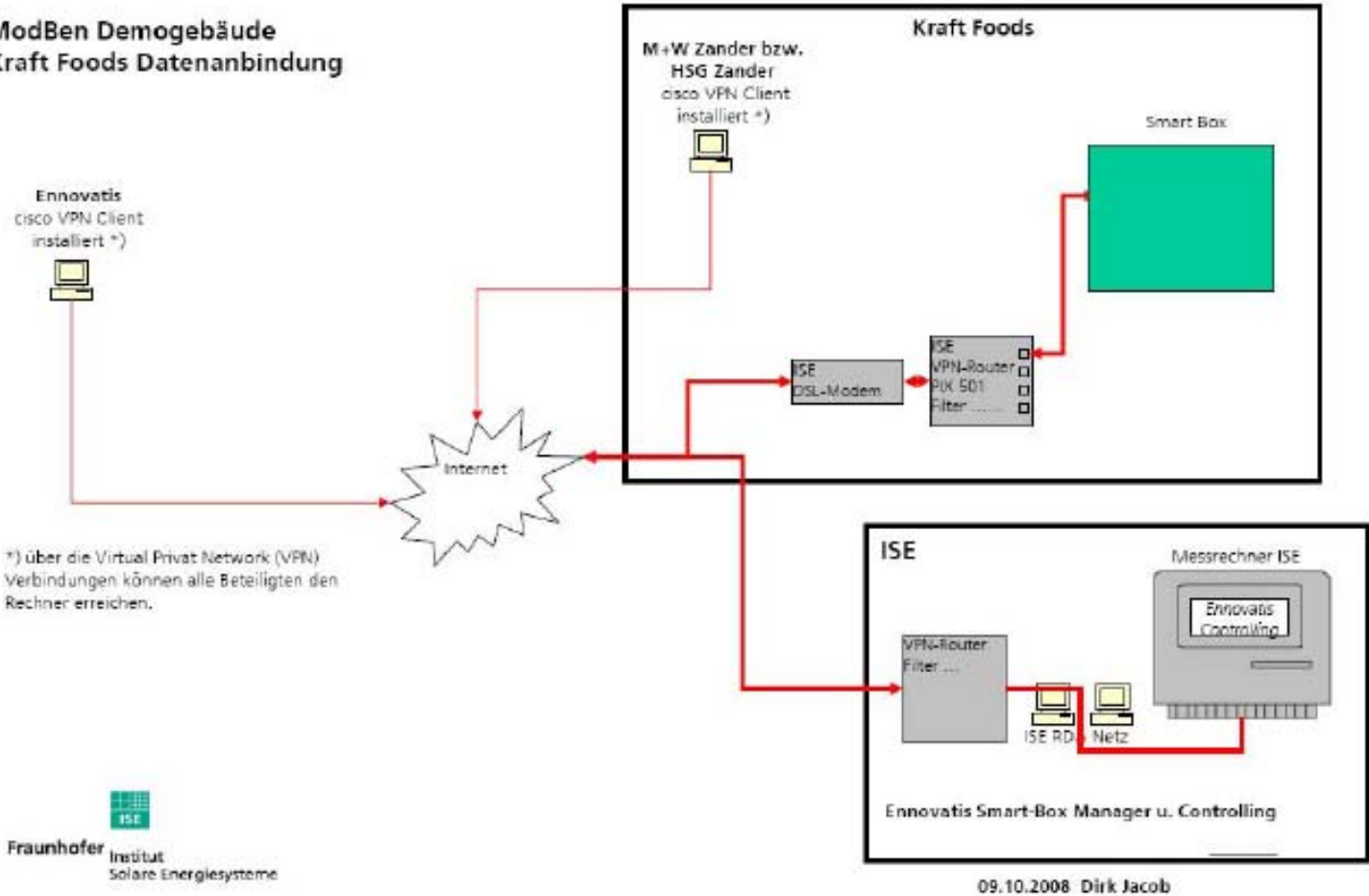


Ludwig Erhard Haus Berlin




Kraft Foods München

ModBen Demogebäude Kraft Foods Datenanbindung





F Checkliste Stufe 1

ModBen														
Datenerfassung Stufe 1														
<div style="display: flex; justify-content: space-between; align-items: center;"> <div style="display: flex; flex-direction: column; gap: 5px;"> <div style="background-color: #d4edda; width: 20px; height: 10px;"></div> Feld ausfüllen <div style="background-color: #d3d3d3; width: 20px; height: 10px;"></div> Feld nicht ausfüllen </div>  </div>														
Bereich	Spezifikation	Einheit	Wert / Eintragung	1. Erfassungsjahr	2. Erfassungsjahr	3. Erfassungsjahr	Hauptnutzung 1	Hauptnutzung 2	Hauptnutzung 3	Hauptnutzung 4	Hauptnutzung 5	Hauptnutzung 6	Erläuterung	
1	1. Allgemeine Daten													
2	Name Organisation	-												
3	Ansprechpartner Name	-												
4	Ansprechpartner Fax	-												
5	Ansprechpartner Telefon	-												
6	Ansprechpartner mail	-												
7	2. Allgemeine Objektdaten													
8	Standort/PLZ	-												Mindestens PLZ oder Ort, um die Klimabereinigung durchführen zu können
9	Baujahr	JJJJ												
10	Jahr etwaiger Sanierungen	JJJJ												
11	Anzahl Geschosse	-												
12	Bauwerkszuordnung, (ARGE Bau)	-												Hauptnutzung des Gebäudes nach beiliegendem Bauwerkszuordnungskatalog; Probleme bei der Zuordnung bitte unter Anmerkungen notieren.
13	3. Flächen/Bezugsgröße													
14	NGF	m ²												Alle umbauten Flächen, inkl. Keller, Abstellräume, Parkflächen, Techniktagen, etc.
15	BGF	m ²												Vorzugsweise alle vorhandenen Flächen angeben!
16	NF	m ²												Vorzugsweise alle vorhandenen Flächen angeben!
17	Mietfläche	m ²												Vorzugsweise alle vorhandenen Flächen angeben!
18	BRI	m ³												
19	Netto Rauminhalt	m ³												
20	Sonstige Bezugsgröße	-												Bspw. Wasseroberfläche, Hotelbetten, etc.
21	Leerstand	%												Dauerhafter Leerstand im Gebäude über den gesamten Abrechnungszeitraum, wenn die Leerstandsrate 10 % übersteigt. Keine Eingabe entspricht 0 %
22	Tiefgarage	m ² NGF												Jede umbaute Parkfläche, die mindestens beleuchtet ist
23	4. Energieverbrauch													
24	Strom													
25	Thermische Nutzung des Stroms?	W / K												W = Wärmeerzeugung (für Heizung, Warmwasser oder Luftbefeuchtung) K = Kälteerzeugung
26	Jahr	JJJJ												Entweder Erfassungsjahr oder Zeitraum
27	Erfassungsdatum Anfang	TT.MM.JJJJ												Es können auch mehrere zusammenhängende Jahre zusammengefasst werden

ModBen													
Datenerfassung Stufe 1													
<div style="display: flex; justify-content: space-between; align-items: center;"> <div style="display: flex; gap: 10px;"> <div style="width: 15px; height: 15px; background-color: #d9ead3; border: 1px solid #ccc;"></div> Feld ausfüllen <div style="width: 15px; height: 15px; background-color: #f2f2f2; border: 1px solid #ccc;"></div> Feld nicht ausfüllen </div> </div>													
Bereich	Spezifikation	Einheit	Wert / Eintragung	1. Erfassungsjahr	2. Erfassungsjahr	3. Erfassungsjahr	Hauptnutzung 1	Hauptnutzung 2	Hauptnutzung 3	Hauptnutzung 4	Hauptnutzung 5	Hauptnutzung 6	Erläuterung
28	Erfassungsdatum Ende	TT.MM.JJJJ											Es können auch mehrere zusammenhängende Jahre zusammengefasst werden
29	Verbrauch Gesamt (ohne Eigenerzeugung)	kWh											Bezogener Strom von Versorger OHNE Eigenerzeugung
30	Verbrauch Allgemein	kWh											Wenn nur der Allgemeinverbrauch bekannt ist, nur diesen eingeben
31	Verbrauch Mietbereich	kWh											
32	Eigenerzeugung Strom	kWh											Wenn zutreffend
33	davon ins Netz eingespeist	kWh											Kein Eintrag = nein
34	davon im Gebäude genutzt	kWh											Kein Eintrag = nein
35	Energieträger 2												
36	Art des Energieträgers												Gas, Öl, Holz, sonst. Brennstoffe, Fernwärme, Fernkälte
37	Nutzung des Energieträgers	W / K / S											W = Wärmeerzeugung K = Kälteerzeugung S = Stromerzeugung
38	Jahr	JJJJ											s.o.
39	Erfassungsdatum Anfang	TT.MM.JJJJ											s.o.
40	Erfassungsdatum Ende	TT.MM.JJJJ											s.o.
41	Verbrauch Gesamt	kWh											Die Verbrauchsdaten bitte unbereinigt eintragen. Zur Umrechnung von Brennstoffmengen auf kWh bitte beiliegende Tabelle nutzen
42	Verbrauch Allgemein	kWh											s.o.
43	Verbrauch Mietbereich	kWh											s.o.
44	Energieträger 3												
45	Art des Energieträgers	-											s.o.
46	Nutzung des Energieträgers	W / K / S / LBF											s.o.
47	Jahr	JJJJ											s.o.
48	Erfassungsdatum Anfang	TT.MM.JJJJ											s.o.
49	Erfassungsdatum Ende	TT.MM.JJJJ											s.o.
50	Verbrauch Gesamt	kWh											s.o.
51	Verbrauch Allgemein	kWh											s.o.
52	Verbrauch Mietbereich	kWh											s.o.
53	Energieträger 4												
54	Art des Energieträgers	-											s.o.
55	Nutzung des Energieträgers	W / K / S / LBF											s.o.
56	Jahr	JJJJ											s.o.
57	Erfassungsdatum Anfang	TT.MM.JJJJ											s.o.
58	Erfassungsdatum Ende	TT.MM.JJJJ											s.o.

ModBen													
Datenerfassung Stufe 1													
<div style="display: flex; justify-content: space-between; align-items: center;"> <div style="display: flex; gap: 10px;"> <div style="width: 15px; height: 10px; background-color: #d4edda;"></div> Feld ausfüllen <div style="width: 15px; height: 10px; background-color: #d3d3d3;"></div> Feld nicht ausfüllen </div> </div>													
Bereich	Spezifikation	Einheit	Wert / Eintragung	1. Erfassungsjahr	2. Erfassungsjahr	3. Erfassungsjahr	Hauptnutzung 1	Hauptnutzung 2	Hauptnutzung 3	Hauptnutzung 4	Hauptnutzung 5	Hauptnutzung 6	Erläuterung
59	Verbrauch Gesamt	kWh											s.o.
60	Verbrauch Allgemein	kWh											s.o.
61	Verbrauch Mietbereich	kWh											s.o.
62	5. Verbrauch Wasser												
63	Nutzungen Wasser	W_K / Bew / Kü / LBF / Pr											W_K = Waschen / Kochen Bew = Bewässerung Außenanlagen Kü = nasser Kühlraum LBF = Luftbefeuchtung Pr = sonstige Prozesse (Produktion, o.ä.)
64	Erfassungsjahr	JJJJ											
65	Erfassungsdatum Anfang	TT.MM.JJJJ											
66	Erfassungsdatum Ende	TT.MM.JJJJ											
67	Verbrauch Gesamt	m³											
68	Verbrauch Allgemein	m³											
69	Verbrauch Mietbereich	m³											
70	6. Hauptnutzungsarten												
71	Hauptnutzung 1	m² NGF											Hauptnutzungen entsprechend DIN V 18509 Teil 10. Nur Nutzungen angeben, die mehr als 10% der NGF abdecken oder einen deutlichen Einfluss auf den Energieverbrauch haben (z.B. Rechenzentrum). Zonen ähnlicher Nutzung (z.B. Einzelbüro / Gruppenbüro) können zusammengefasst werden. Verkehrsflächen werden der Hauptnutzung zugeordnet.
72	Hauptnutzung 2	m² NGF											
73	Hauptnutzung 3	m² NGF											
74	Hauptnutzung 4	m² NGF											
75	Hauptnutzung 5	m² NGF											
76	Hauptnutzung 6	m² NGF											
77	7. Anlagentechnische Ausstattung												
78	Heizung												Jeweilige Ausstattung der Hauptnutzungen mit einem "X" markieren.
79	Kühlung												
80	Lüftung												
81	Luft-Befeuchtung												
82	Luft-Entfeuchtung												
83	Warmwasserbereitung												

ModBen														
Datenerfassung Stufe 1														Feld ausfüllen Feld nicht ausfüllen
Bereich	Spezifikation	Einheit	Wert / Eintragung	1. Erfassungsjahr	2. Erfassungsjahr	3. Erfassungsjahr	Hauptnutzung 1	Hauptnutzung 2	Hauptnutzung 3	Hauptnutzung 4	Hauptnutzung 5	Hauptnutzung 6	Erläuterung	
84	Gebäudeautomationssystem													
85	8. Zusätzliche Angaben													
86	Monatswerte Energie-/Wasserverbrauch vorhanden?												Je Energieträger ausweisen, Werte als separate Liste mitschicken, wenn möglich für die letzten 3 Erfassungsjahre, kein Eintrag=Nein,	
87	Strom	J/N												
88	Energieträger 1	J/N												
89	Energieträger 2	J/N												
90	Energieträger 3	J/N												
91	Energieträger 4	J/N												
92	Wasser	J/N												
93	Untermessungen vorhanden													
94	Für Erzeuger:												G = Gesamt (Summe aller Erzeuger) E = Je Erzeuger N = Nicht vorhanden	
95	Erzeugte Wärme	G / E / N												
96	Erzeugte Kälte	G / E / N												
97	Erzeugter Strom	G / E / N												
98	Für Verbrauch:												G = Gesamt (Summe aller Nutzungsbereiche) NB = Je Nutzungsbereich N = Nicht vorhanden	
99	Wärme gesamt	G / NB / N												
100	Raumheizung	G / NB / N												
101	Warmwasser	G / NB / N												
102	Strom gesamt	G / NB / N												
103	Strom Beleuchtung	G / NB / N												
104	Strom Haustechnik	G / NB / N												
105	Kälte	G / NB / N												
106	9. Tarife													
107	Strom (NT)													
108	Arbeitspreis													
109	Leistungspreis													
110	Grundpreis													
111	Messpreis													
112	Strom (HT)													
113	Arbeitspreis													
114	Leistungspreis													
115	Grundpreis													
116	Messpreis													

ModBen													
Datenerfassung Stufe 1													
<div style="display: flex; justify-content: space-between; align-items: center;"> <div style="width: 15px; height: 10px; background-color: #90EE90; border: 1px solid black; display: inline-block;"></div> Feld ausfüllen <div style="width: 15px; height: 10px; background-color: #A9A9A9; border: 1px solid black; display: inline-block;"></div> Feld nicht ausfüllen  </div>													
Bereich	Spezifikation	Einheit	Wert / Eintragung	1. Erfassungsjahr	2. Erfassungsjahr	3. Erfassungsjahr	Hauptnutzung 1	Hauptnutzung 2	Hauptnutzung 3	Hauptnutzung 4	Hauptnutzung 5	Hauptnutzung 6	Erläuterung
117	Energieträger 1												
118	Arbeitspreis												
119	Leistungspreis												
120	Grundpreis												
121	Messpreis												
122	Energieträger 2												
123	Arbeitspreis												
124	Leistungspreis												
125	Grundpreis												
126	Messpreis												
127	Energieträger 3												
128	Arbeitspreis												
129	Leistungspreis												
130	Grundpreis												
131	Messpreis												
132	Energieträger 4												
133	Arbeitspreis												
134	Leistungspreis												
135	Grundpreis												
136	Messpreis												

G Checkliste Stufe 2

ModBen

Datenerfassung Stufe 2

**Anleitung****Allgemeines**

Die folgenden Tabellenblätter sollen zur detaillierten Datenerfassung in Stufe 2 des Projekts ModBen verwendet werden, um im Anschluss die Zertifizierung nach EnEV bzw. DIN V 18599 durchführen zu können.
Die Aufnahme der Daten teilt sich in den Teil "Gebäude + Zonen", "Anlagen" und den Teil "Bauteile".

Notwendige Voraussetzungen

Um ein Modell des Gebäudes mit der ennovatis Software erstellen und die Tabellenblätter vollständig ausfüllen zu können, werden möglichst folgende Unterlagen benötigt:

Planunterlagen mit Grundrissen, Ansichten, Schnitten und Lageplan
möglichst in elektronischer Form (dwg, dxf) oder auf Papier in M 1:100.

Angaben zum Aufbau der Bauteile bzw. deren Qualität (Wandaufbauten, Fensterarten)

Schemata zu den Gewerken Heizung, Lüftung, Sanitär, Elektro mit Angaben zu Nennleistungen, Durchflüssen, Solltemperaturen etc.

Art der Gebäudeautomation und Struktur der vorhandenen Energiezähler
vorhandene Wärmeschutznachweise

Tabellenblatt "Daten Gebäude+Zonen"

In diesem Tabellenblatt werden die Eigenschaften der Zonen zusammengestellt.

Abschnitt "Geometrie"

Da in unserem Projekt die Geometrie der Zonen mit den Werkzeugen von ennovatis als 3D Modell aufgenommen wird, werden detaillierte Flächenangaben hier nicht explizit erwähnt.

Allerdings findet sich im ersten Abschnitt zur Übersicht eine grobe Zusammenstellung der wichtigsten geometrischen Daten.

Abschnitt "Nutzung / Anforderung"

Hier werden die Daten zu internen Lasten, Sollwerten der Raumluft, Warmwasserbedarf und Sonnenschutz der jeweiligen Zonen eingetragen.

Abschnitt "Anlagentechnik in der Zone"

Hier werden Angaben zur Anlagentechnik in der Zone, d.h. zu den Übergabesystemen gesammelt.

Dies betrifft: Beleuchtung, Wärme- und Kälteübergabe sowie Lüftung.

Abschnitt "Flächen" (optional)

Eine Zusammenstellung der Flächen der Zonen. Da - wie oben erwähnt die Aufnahme der Geometrie mit dem 3D tool von ennovatis erfolgt, ist ein Ausfüllen nicht unbedingt notwendig.

ModBen

Datenerfassung Stufe 2

**Anleitung****Abschnitt "Wärmeschutz" (optional)**

Eine Zusammenstellung der U-Werte der Bauteile. Die Berechnung der U-Werte erfolgt jedoch wiederum mit dem tool von enovatis auf Grundlage der Daten aus dem Blatt "Bauteile".

Tabellenblatt "Daten Anlagen"

In diesem Tabellenblatt werden die Eigenschaften der Anlagentechnik zusammengestellt.

Neben den Daten der Erzeuger, Speicher, Verteilkreise und Lüftungsanlagen werden auch die jeweiligen Verknüpfungen der Anlagen untereinander aufgenommen. Dies geschieht in der Art, dass für die gewählte Anlage in der selben Zeile markiert wird, welche anderen Anlagen oder ggfls. Gebäudezonen über sie versorgt werden.

Abschnitt "Anlagen zur Rückkühlung / Erschließung Erdreich/ Grundwasser"

Hier werden Anlagen wie Rückkühlwerke, Erdsonden oder Grundwasserbrunnen eingetragen.

Neben den allgemeinen Angaben soll die Systemeinbindung (z.B. Raumheizung oder Kälteerzeugung) angegeben werden. Diese wird mit einem "x" beim jeweiligen System markiert.

Weiterhin soll unter "versorgte Anlage" angegeben werden, welche anderen Anlagen Energie von der jeweiligen Komponente erhalten. Diese wird mit einem "x" beim jeweiligen System markiert.

Die Anlagen sind folgendermaßen abgekürzt:

RKW / EWS - Rückkühlwerke / Erdsonden

WE - Wärmeerzeuger

KE - Kälteerzeuger

SP - Speicher

VK - Verteilkreise

Die Spezifikation dieser referenzierten Anlagen befindet sich dann weiter unten auf dem Tabellenblatt.

Abschnitt "Wärmeerzeuger / KWK Anlagen"

Hier werden Wärmeerzeuger wie Gaskessel oder KWK Anlagen wie Gas-BHKWs eingetragen

Ansonsten folgt die Systematik der des ersten Abschnitts

Abschnitt "Kälteerzeuger"

Hier werden Kälteerzeuger wie Kompressions- oder Absorptionskältemaschinen eingetragen

Ansonsten folgt die Systematik der des ersten Abschnitts

Abschnitt "Speicher"

Hier werden die Daten der Speicher eingetragen.

Ansonsten folgt die Systematik der des ersten Abschnitts

Abschnitt "Verteilkreise"

Hier werden die Daten der Verteilkreise eingetragen, die Energie von der Ebene der Erzeuger bzw. Speicher zu den Verbrauchern bzw. Zonen transportieren.

Unter "versorgte Zonen" werden die Zonen mit einem "x" markiert, die über den jeweiligen Kreis versorgt werden. Die Namen der Zonen sind mit dem Blatt "Daten Gebäude+Zonen" verknüpft.

ModBen

Datenerfassung Stufe 2

**Anleitung**

Unter "versorgte Lüftungsanlagen" werden die Lüftungsanlagen (LA) "x" markiert, die wasserseitig über den jeweiligen Kreis versorgt werden. Die Spezifikation der referenzierten Lüftungsanlagen erfolgt in nächsten Abschnitt

Abschnitt "Lüftungsanlagen"

Hier werden die Daten und Funktionen der Lüftungsanlagen eingetragen.

Unter "versorgte Zonen" werden die Zonen mit einem "x" markiert, die luftseitig über die jeweilige Lüftungsanlage versorgt werden. Die Namen der Zonen sind mit dem Blatt "Daten Gebäude+Zonen" verknüpft.

Tabellenblatt "Bauteile"

In diesem Tabellenblatt werden Angaben zu Aufbau und Qualität der Bauteile der Gebäude- bzw. Zonenhülle eingetragen.

Weiterhin könne zusätzliche Angaben zur Zonenzuordnung erfolgen.

Das Tabellenblatt teilt sich in die Abschnitte:

- Bauteile gegen Erdreich
- Dächer
- Bauteile gegen unbeheizte Zonen
- Außenfenster
- Innenwände
- Geschossdecken

Die Berechnung der U-Werte der opaken Bauteile erfolgt - wie schon erwähnt im ennovatis System

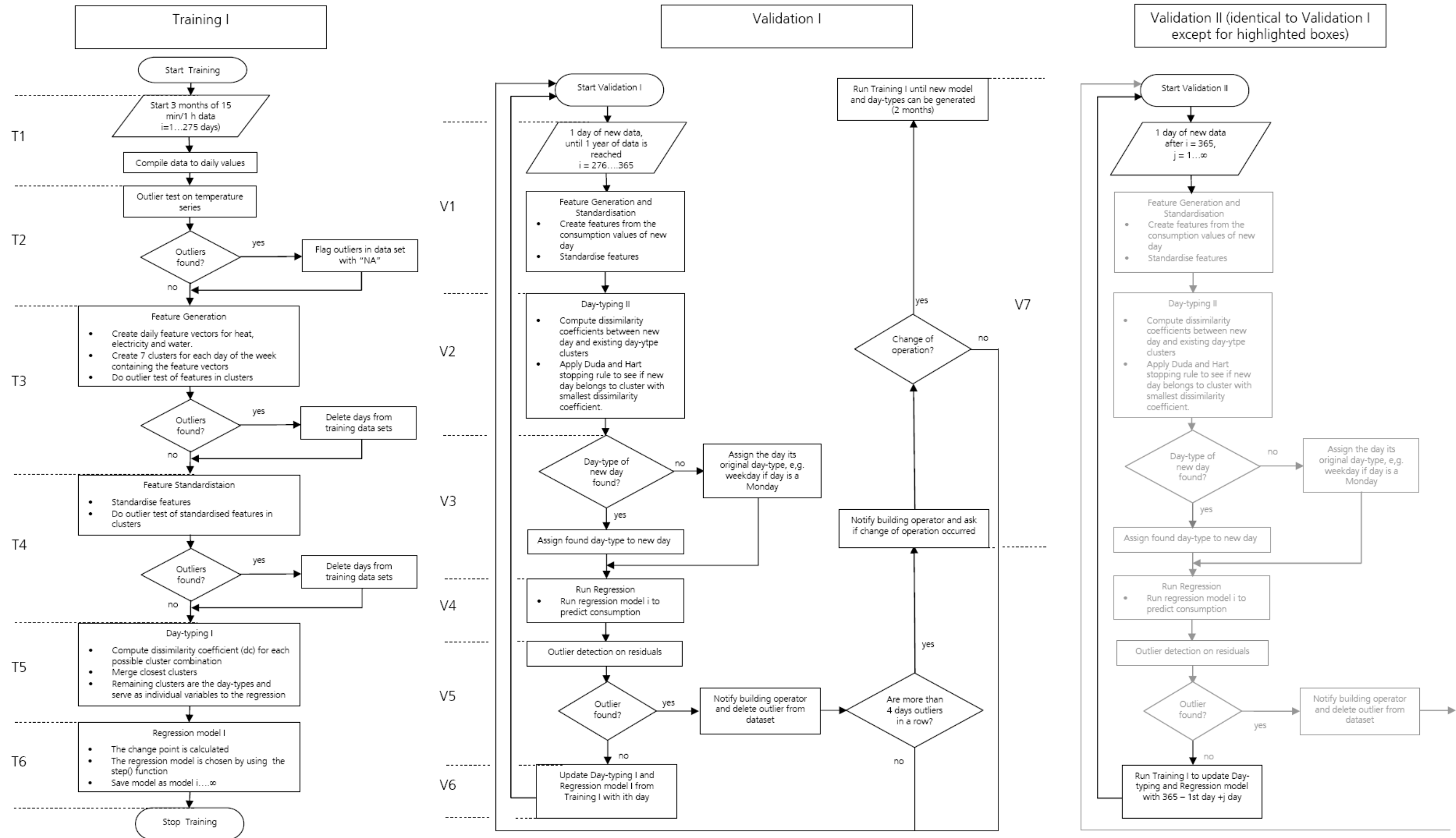
Tabellenblatt "Nutzungen DIN V 18599 -10"

Eine Tabelle mit den Namen der Normnutzung aus der DIN

Building-EQ		Fraunhofer ISE															
Datenerfassung Stufe 2		ModBen															
Gebäude und Anlagentechnik		Übergabe															
		Name Zone 1	Name Zone 2	Name Zone 3	Name Zone 4	Name Zone 5	Name Zone 6	Name Zone 7	Name Zone 8	Name Zone 9	Name Zone 10	Name Zone 11	Name Zone 12	Name Zone 13	Name Zone 14	Name Zone 15	Summe g-Werte
Geometrie																	
NGP	m ²																
SGP	m ²																
Raumhöhe (netto)	m																
Dachhöhe (Bauh)	m																
Dachhöhe	m																
Bauhöhe	m																
Hörfäche	m ²																
Flächenanteil der Fassade (Rohbauwerk)	%																
A/V-Verhältnis	-																
Nutzung / Anforderung																	
Nutzungstyp entsprechend DIN V 18500 - 10																	
interne Lasten																	
Anzahl der Nutzer	-																
Anzahl der Rechner-Arbeitsplätze	-																
Nutzungszeiten Mo-Fr	von																
	bis																
Nutzungszeiten Sa+So	von																
	bis																
installierte Leistung sonst elektrische Geräte	kW																
Einrachzeiten Mo-Fr	von																
	bis																
Einrachzeiten Sa+So	von																
	bis																
Raumluftanforderungen																	
Winter																	
Temperatur	°C																
Feuchte	% r.F.																
Luftwechsel	1/h																
Sommer																	
Temperatur	°C																
Feuchte	% r.F.																
Luftwechsel	1/h																
Warmwasser																	
Kaltwasserverbrauch	l/s																
Warmwasserverbrauch	l/s																
benötigte Warmwassertemperatur	°C																
Sonnenschutz																	
Art des Sonnenschutzsystems																	
Gesamt g-Wert (Sonnenschutz + Fenster)																	
bei aktiviertem Sonnenschutz																	
Art der Regelung																	
Anlagentechnik in der Zone																	
Beleuchtung																	
Art der Leuchtmittel																	
spez. Anschlussleistung	W/m ²																
Gesamtleistung	kW																
Art der Regelung																	
Betriebszeiten Beleuchtung Mo-Fr	von																
	bis																
Betriebszeiten Beleuchtung Sa+So	von																
	bis																
Wärmeübergabe in Zone																	
Heizkörper																	

Building-EQ													
Datenerfassung Stufe 2													
Gebäude und Anlagentechnik													
Übergabe													
Luftheizung, zentral	-												
Luftheizung, dezentral	-												
Fußbodenheizung	-												
Deckenheizung	-												
Betonarmierung	-												
Berträge	-												
Systemtemperaturen wasserseitig (T _{W/T_U})	°C												
Schickelung	W/m ²												
Betriebszeiten Heizung Mo-Fr													
	von												
	bis												
Betriebszeiten Heizung Sa-So													
	von												
	bis												
Kühllieferung in Zone													
Lüftung, zentral	-												
Lüftung, dezentral (über Kaltwasser)	-												
Lüftung, dezentral (Spitzgerät)	-												
Fußbodenlüftung	-												
Deckenlüftung	-												
Betonarmierung	-												
Berträge	-												
Systemtemperaturen wasserseitig (T _{W/T_U})	°C												
Schickelung	W/m ²												
Betriebszeiten Kühlung Mo-Fr													
	von												
	bis												
Betriebszeiten Kühlung Sa-So													
	von												
	bis												
Lüftung													
zentral	-												
dezentral	-												
Luftkondition?	-												
mit Wärmerückgewinnung?	-												
mit Erthalterückgewinnung?	-												
Funktion													
	heizen												
	kühlen												
	entfeuchten												
	befeuchten												
max. Lüftmenge	m ³ /h												
max. Luftwechsel	1/h												
Volumenstrom													
	variabel												
	konstant												
Art der Regelung (Zeit, Luftqualität)													
Betriebszeiten Lüftung Mo-Fr													
	von												
	bis												
Betriebszeiten Lüftung Sa-So													
	von												
	bis												
Flächen (bedarf strukturelle planung)													
Wärmeschutz (bedarf energetische planung)													

H Fließschema des Algorithmus zur automatischen Fehlerdetektion



I Einheitliche Datenpunktbezeichnung

Tabelle 33 zeigt die einheitliche Datenpunktbezeichnung für den minimalen Datensatz. Tabelle 34 listet die Abkürzungen, die in Tabelle 33 verwendet wurden.

Tabelle 33 Einheitliche Datenpunktbezeichnung für den minimalen Datensatz
 In runden Klammern () stehen mögliche alternative Erweiterungen für einen Eintrag, der zur genaueren Spezifikation verwendet werden kann
 In eckigen Klammern [] zeigen Inhalte an, die durch den Nutzer spezifiziert werden. Als Erweiterung sind diese optional

data point of minimal data set	Categories								
	Building	Zone	System	Subsystem1	Subsystem2	Medium	Position	Kind	Point
total consumption of district heat	[BUI]	WBD	DH	MTR.H		HW		MEA	E.H
total consumption of district cold	[BUI]	WBD	DC	MTR.C		CHW		MEA	E.C
total consumption of fuels	[BUI]	WBD	ESUP	MTR		FUEL		MEA	E
total consumption of electricity	[BUI]	WBD	ESUP	MTR.EL				MEA	E.EL
total consumption of water	[BUI]	WBD	WSUP	MTR.W		DCW		MEA	VOL
outdoor air temperature	[BUI]	WBD	WTH			OA		MEA	T
outdoor air rel. humidity	[BUI]	WBD	WTH			OA		MEA	RH
global irradiation	[BUI]	WBD	WTH	GLOBSENS				MEA	SOL
supply temperature of water circuit for heating, cooling or both	[BUI]	[ZONE]	WC.(H,C,HC).[Name]			(HW,CHW)	SUP.(PRIM,SEC)	MEA	T
return temperature of water circuit for heating, cooling or both	[BUI]	[ZONE]	WC.(H,C,HC).[Name]			(HW,CHW)	RET.(PRIM,SEC)	MEA	T
set value/signal of control signal/ status of pump of water circuit	[BUI]	[ZONE]	WC.(H,C,HC).[Name]	PU.[number]			(PRIM,SEC)	(SEV,SIG)	(CTRLSIG,STAT)
indoor air temperature of [ZONE]	[BUI]	[ZONE]				RA		MEA	T.[number]
indoor air rel. humidity of [ZONE]	[BUI]	[ZONE]				RA		MEA	RH.[number]
supply air temperature of AHU.[number] that servers [ZONE]	[BUI]	[ZONE]	AHU.[number]			SUPA		MEA	T
exhaust air temperature of AHU.[number] that servers [ZONE]	[BUI]	[ZONE]	AHU.[number]			EXHA		MEA	T
supply air rel. humidity of AHU.[number] that servers [ZONE]	[BUI]	[ZONE]	AHU.[number]			SUPA		MEA	RH
exhaust air rel. humidity of AHU.[number] that servers [ZONE]	[BUI]	[ZONE]	AHU.[number]			EXHA		MEA	RH
set value/signal of control signal/ status of supply fan of AHU.[number] that servers [ZONE]	[BUI]	[ZONE]	AHU.[number]	FAN		SUPA		(SEV,SIG)	(CTRLSIG,STAT)
set value/signal of control signal/ status of exhaust fan of AHU.[number] that servers [ZONE]	[BUI]	[ZONE]	AHU.[number]	FAN		EXHA		(SEV,SIG)	(CTRLSIG,STAT)
supply temperature of heating, cooling, pre-heating or pre-heating/cooling coil of AHU.[number] that servers [ZONE]	[BUI]	[ZONE]	AHU.[number]	(HC,CC,PREHC,PREHCC)		(HW,CHW,HCW)	SUP.(PRIM,SEC)	MEA	T
return temperature of heating, cooling, pre-heating or pre-heating/cooling coil of AHU.[number] that servers [ZONE]	[BUI]	[ZONE]	AHU.[number]	(HC,CC,PREHC,PREHCC)		(HW,CHW,HCW)	RET.(PRIM,SEC)	MEA	T
set value/signal of control signal/ status of pump of heating, cooling, pre-heating or pre-heating/cooling coil of AHU.[number] that servers [ZONE]	[BUI]	[ZONE]	AHU.[number]	(HC,CC,PREHC,PREHCC)	PU.[number]	(HW,CHW,HCW)	(PRIM,SEC)	(SEV,SIG)	(CTRLSIG,STAT)
set value/signal of control signal/ status of control valve of heating, cooling, pre-heating or pre-heating/cooling coil of AHU.[number] that servers [ZONE]	[BUI]	[ZONE]	AHU.[number]	(HC,CC,PREHC,PREHCC)	CTRV	(HW,CHW,HCW)	(PRIM,SEC)	(SEV,SIG)	(CTRLSIG,STAT)

Tabelle 34 Abkürzungsverzeichnis für einheitliche Datenpunktbezeichnung

No	Category	abbreviation	item
1	Building	free choice	building name
2	Zone	WBD	Whole Building
		free choice	all other zones
3	System	DH	District heat
		DC	District cold
		ESUP	Energy supply
		WSUP	Water supply
		WTH	Weather Station
		WC.H	heating circuit (water circuit for heating)
		WC.C	cooling circuit (water circuit for cooling)
		WC.HC	heating / cooling circuit (water circuit for heating / cooling)
		AHU	AHU
4	Subsystem_1	MTR	Meter for Fuel
		MTR.H	heat meter
		MTR.C	cold meter
		MTR.EL	electricity meter
		MTR.W	water meter
		GLOBSENS	Pyranometer
		PU	Pump
		FAN	Fan
		HC	heating coil
		CC	cooling coil
		PREHC	pre-heating coil
		PREHCC	pre-heating/cooling coil
5	Subsystem_2	PU	Pump
		CTRV	Control valve
6	Medium	HW	hot water
		CHW	chilled water
		HCW	hot / chilled water
		DCW	domestic cold water
		FUEL	any kind of fuel (gas, oil, wood, etc.)
		OA	outdoor air
		RA	room air
		SUPA	supply air
		EXHA	exhaust air
7	Position	SUP.(PRIM, SEC)	supply (on primary or secondary side of system)
		RET.(PRIM, SEC)	return (on primary or secondary side of system)
		PRIM, SEC	primary or secondary side of system
8	Kind	MEA	measured value
		SEV	set value

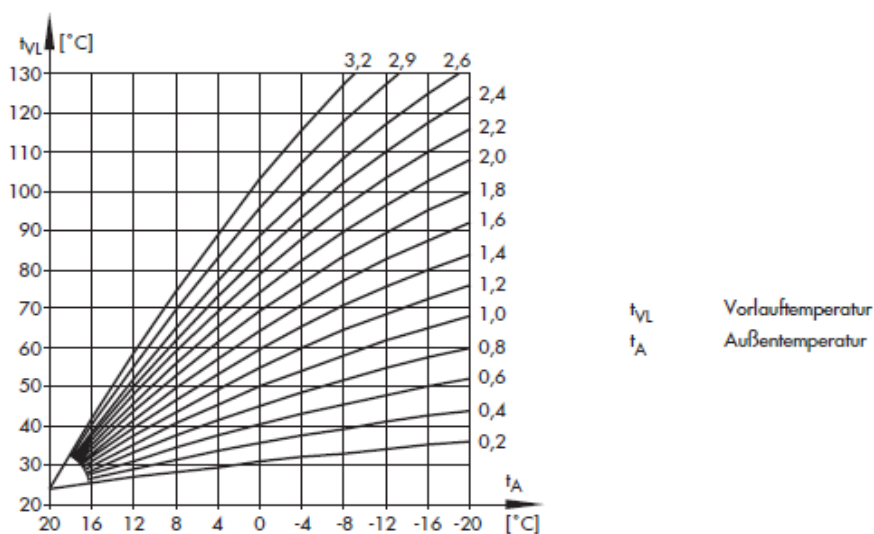
	SIG	signal (feedback from component)
9	datapoint	
	E	energy
	E.H	heating energy
	E.C	cooling energy
	E.EL	electric energy
	VOL	Volume
	T	temperature
	RH	relative humidity
	SOL	solar irradiation
	CTRLSIG	control signal (continuous 0-100%)
	STAT	status (1/0)

J Optimierung an Heizungsanlagen durch Fernzugriff auf Heizungsregler

In diesem Abschnitt wird die von ennovatis implementierte Optimierung der Heizungsregelung erläutert.

J.1 Anpassungen der Heizkennlinie

J.1.1 Steigung und Niveau



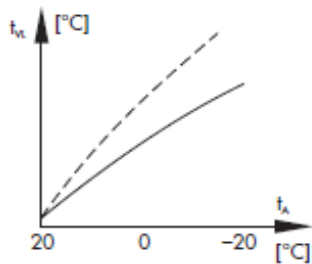
Anhang-Abbildung 1: Steigungskennlinien

Ein sehr wichtiger Punkt bei der Optimierung der Heizungsanlage ist die witterungsgeführte Regelung, da sich bei dieser die Vorlauftemperatur abhängig von der Außentemperatur einstellt. Dabei definiert die Heizkennlinie im Regler den Sollwert für die Vorlauftemperatur als Funktion der Außentemperatur. Es ist zwingend notwendig, dass die Außentemperatur entweder an einem Außensensor gemessen oder mittels 0 bis 10V-Eingang empfangen wird.

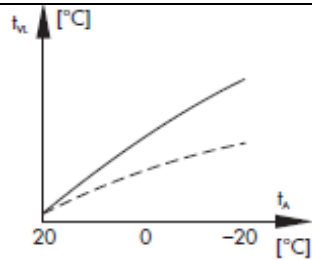
In Anhang-Abbildung 1 sind einige Heizkennlinien mit gleichem Niveau, aber mit unterschiedlicher Steigung dargestellt.

Es besteht grundsätzlich folgender Zusammenhang: Bei fallender Außentemperatur, steigt die Vorlauftemperatur, damit die Raumtemperatur konstant gehalten wird. Die Raumtemperatur wird bei fehlendem Raumfühler über einen festen (Soll-)Wert definiert.

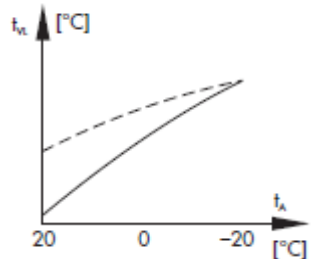
Die Heizkennlinie kann durch Variation von Steigung und Niveau an die individuellen Bedürfnisse angepasst werden (Anhang-Abbildung 2):



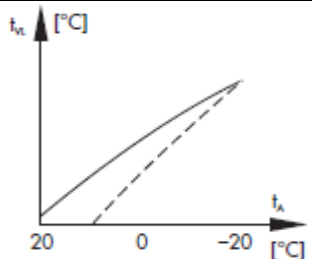
Sinkt die Raumtemperatur in der kalten Jahreszeit, ist eine Erhöhung der Steigung erforderlich.



Steigt die Raumtemperatur in der kalten Jahreszeit, ist eine Verringerung der Steigung erforderlich.



Sinkt die Raumtemperatur in der Übergangsjahreszeit, ist eine Erhöhung des Niveaus und gleichzeitige Verringerung der Steigung erforderlich.



Steigt die Raumtemperatur in der Übergangsjahreszeit, ist eine Verringerung des Niveaus und gleichzeitige Erhöhung der Steigung erforderlich.

Anhang-Abbildung 2 Heizkennlinienanpassung

Beispiele für Kennlinieneinstellung:

- Altbau, Heizkörperauslegung 90/70:Steigung ca. 1,8
- Neubau, Heizkörperauslegung 70/55:Steigung ca. 1,4
- Neubau, Heizkörperauslegung 55/45:Steigung ca. 1,0
- Fußbodenheizung (je nach Verlegung):Steigung kleiner 0,5

Parametrierung des Reglers mittels Smartbox:

Anhang-Tabelle 1: Benötigte Register für Kennlinie nach Steigung (Regelkreis 1)

Register		Beschreibung	Umrechnung	Werkseinstellung
analog	digital			
1005		Steigung Vorlauf Heizkennlinie	Steig*10, d.h. 16 = 1,6	18(1,8)
1006		Niveau Vorlauf Heizkennlinie	Niv*10, d.h. 100 = 10	0

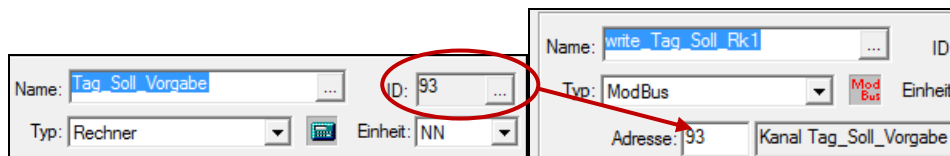
Anhang-Tabelle 2: Benötigte Register für Kennlinie nach Steigung (Regelkreis 2)

Register		Beschreibung	Umrechnung	Werkseinstellung
analog	digital			
1205		Steigung Vorlauf Heizkennlinie	Steig*10, d.h. 16 = 1,6	18(1,8)
1206		Niveau Vorlauf Heizkennlinie	Niv*10, d.h. 100 = 10	0

- Parametrierung des Reglers über ModBus-Protokoll
- Für jedes Register wird eine Rechner-Anweisung und jeweils eine Modbus-Anweisung zum Schreiben und eine zum Lesen benötigt
- In der Rechner-Anweisung wird der zuschreibende Wert eingetragen

Nr.	Funktion	Typ	Wert/Ref...	Operator
1		Wert	200.0000...	

- Die Modbus-Anweisungen zum Schreiben sind alle nach dem gleichen Prinzip aufgebaut:
 - Aussagekräftiger Name
 - Adresse: ID der passenden Rechner-Anweisung



- Angepasster Speicher- und Messzyklus (z.B. 1 Min)
- im Eingabefeld „Adresse“ (ModBus Anweisungen) muss die Modbus-Adresse (Stationsadresse) des Reglers eingetragen werden
- Modbus-Funktion: „[0x06] Write Single Register“
- Anzahl der Worte: „1“ (immer beim Schreiben von Registern)
- Parameter-Index gibt an, an welcher Stelle des Modbus-Registers ein Wert geschrieben werden soll

Beispiel Modbus Anweisung

ModBus Anweisungen

Vorbefehl: x 1 Dez. Hex. Hysterese: 0.000 [0...64.000]

Funktion: [0x06] Write Single Register

Steuerungs ID: ... Inverse Daten Baud: 9600

Adresse: 1 (0...255) Parität: None[N]

Anzahl Worte: 1 (1...128) Schnittstelle: Field 1

Parameter-Index: 1002 (0...65535) Werte Konfiguration

- Nach Aktivierung der Anweisungen, schreibt die Modbus-Anweisung den, von der Referenz ID übermittelten, Wert in das gewählte Register des Reglers.
- Zur Überprüfung des Schreibvorgangs ist es notwendig, dass eine weitere Modbus-Anweisung zum Lesen des Registers erstellt wird.

Diese sind wie folgt aufgebaut:

- Aussagekräftiger Name
- Adresse: 0
- Angepasster Speicher- und Messzyklus (z.B. 1 Min)
- im Eingabefeld „Adresse“ (ModBus Anweisungen) muss die Modbus-Adresse (Stationsadresse) des Reglers eingetragen werden
- Modbus-Funktion: „[0x03] Read Single Register“
- Anzahl der Worte: „1“
- Parameter-Index gibt an, an welcher Stelle des Modbus-Registers ein Wert gelesen werden soll (In Tabelle 1 sind die relevanten Register zur Parametrierung des Regelkreises 1 und in Tabelle 2 die für Regelkreis 2)
- Unter Werte Konfiguration Werte Konfiguration sind (entsprechend der Anzahl der festgelegten Worte) Konfigurationswerte vom Typ „SIGNED_WORD“ anzulegen

Beispiel Werte Konfiguration

ModBus Werte Konfiguration		
Nr.	Name	Typ
1	T_Soll_Tag_RK1	SIGNED_WORD

- Nachdem alle Werte in die passenden Register geschrieben wurden, können die Anweisungen deaktiviert werden.

J.1.2 Raumsollwert Tag/Nacht anpassen

Der Raumsollwert spielt in der Heizkennlinienanpassung nach Steigung eine wichtige Rolle, da anhand der Differenz zwischen Tag-Sollwert und Nacht-Sollwert die Heizkennlinie für die Nachtabenkung automatisch angepasst wird.

Parametrierung des Reglers mittels Smartbox:

Anhang-Tabelle 3: Raumsollwerte (Regelkreis 1)

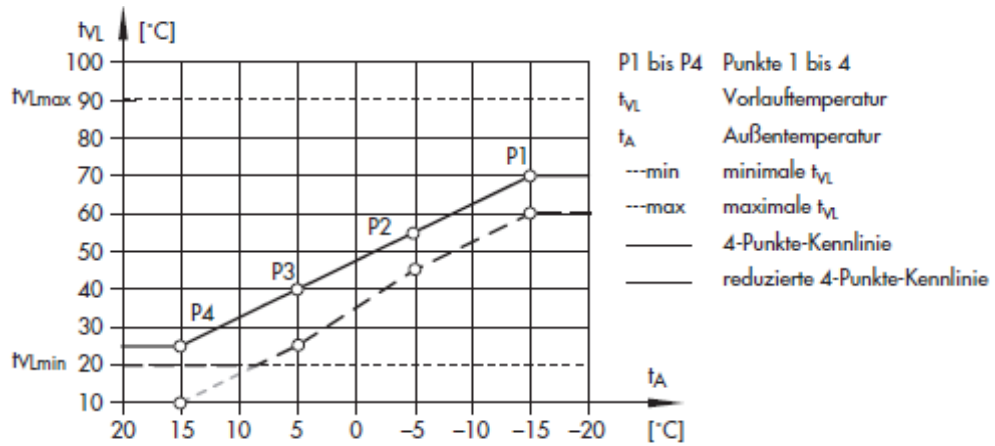
Register		Beschreibung	Umrechnung	Werkseinstellung
analog	digital			
1002		Raumsollwert Tag	Temp*10, d.h. 200 = 20°C	200(20°C)
1003		Raumsollwert Nacht	Temp*10, d.h. 200 = 20°C	150(15°C)

Anhang-Tabelle 4: Raumsollwerte (Regelkreis 2)

Register		Beschreibung	Umrechnung	Werkseinstellung
analog	digital			
1202		Raumsollwert Tag	Temp*10, d.h. 200 = 20°C	200(20°C)
1203		Raumsollwert Nacht	Temp*10, d.h. 200 = 20°C	150(15°C)

J.1.3 4-Punkte Heizkennlinie definieren

Es kann eine eigene Heizkennlinie definiert werden, bei der über 4 Punkte die entsprechenden Grenzwerte festgelegt werden können (siehe Abbildung 3).



Anhang-Abbildung 3: 4-Punkt-Kennlinie

Hierzu muss für jeden Punkt die Außentemperatur, Vorlauftemperatur im Tagbetrieb, Vorlauftemperatur im Nachtbetrieb und optional die Rücklauftemperatur eingetragen werden.

Die Aktivierung der Funktion **4-Punkt-Kennlinie** im Regler ist nur dann möglich, wenn die Funktion **Adaption** inaktiv gesetzt ist.

Parametrierung des Reglers mittels Smartbox:Anhang-Tabelle 5: Alle relevanten Register für 4-Punkt Kennlinie (Regelkreis 1)

Register		Beschreibung	Umrechnung	Werkseinstellung
analog	digital			
	1034	Berechnung der Heizkennlinie anhand der 4-Punktkenlinie	0 = INAKTIV 1 = AKTIV	0
	1031	Adaption	0 = INAKTIV 1 = AKTIV	0
	1012	Außentemperatur 1.Punkt	Temp*10, d.h. 200 = 20°C	-150(-15°C)
	1013	Außentemperatur 2.Punkt	Temp*10, d.h. 200 = 20°C	-50(-5°C)
	1014	Außentemperatur 3.Punkt	Temp*10, d.h. 200 = 20°C	50(5°C)
	1015	Außentemperatur 4.Punkt	Temp*10, d.h. 200 = 20°C	150(15°C)
	1016	Vorlauftemperatur Tagbetrieb 1.Punkt	Temp*10, d.h. 200 = 20°C	700(70°C)
	1017	Vorlauftemperatur Tagbetrieb 2.Punkt	Temp*10, d.h. 200 = 20°C	550(55°C)
	1018	Vorlauftemperatur Tagbetrieb 3.Punkt	Temp*10, d.h. 200 = 20°C	400(40°C)
	1019	Vorlauftemperatur Tagbetrieb 4.Punkt	Temp*10, d.h. 200 = 20°C	250(25°C)
	1020	Vorlauftemperatur Nachtbetrieb 1.Punkt	Temp*10, d.h. 200 = 20°C	600(60°C)
	1021	Vorlauftemperatur Nachtbetrieb 2.Punkt	Temp*10, d.h. 200 = 20°C	400(40°C)
	1022	Vorlauftemperatur Nachtbetrieb 3.Punkt	Temp*10, d.h. 200 = 20°C	200(20°C)
	1023	Vorlauftemperatur Nachtbetrieb 4.Punkt	Temp*10, d.h. 200 = 20°C	200(20°C)
	1024	Rücklauftemperatur 1.Punkt	Temp*10, d.h. 200 = 20°C	650(65°C)
	1025	Rücklauftemperatur 2.Punkt	Temp*10, d.h. 200 = 20°C	650(65°C)
	1026	Rücklauftemperatur 3.Punkt	Temp*10, d.h. 200 = 20°C	650(65°C)
	1027	Rücklauftemperatur 4.Punkt	Temp*10, d.h. 200 = 20°C	650(65°C)

Anhang-Tabelle 6: Alle relevanten Register für 4-Punkt Kennlinie (Regelkreis 2)

Register		Beschreibung	Umrechnung	Werkseinstellung
analog	digital			
	1234	Berechnung der Heizkennlinie anhand der 4-Punktkenlinie	0 = INAKTIV 1 = AKTIV	0
	1231	Adaption	0 = INAKTIV 1 = AKTIV	0
	1212	Außentemperatur 1.Punkt	Temp*10, d.h. 200 = 20°C	-150(-15°C)
	1213	Außentemperatur 2.Punkt	Temp*10, d.h. 200 = 20°C	-50(-5°C)
	1214	Außentemperatur 3.Punkt	Temp*10, d.h. 200 = 20°C	50(5°C)
	1215	Außentemperatur 4.Punkt	Temp*10, d.h. 200 = 20°C	150(15°C)
	1216	Vorlauftemperatur Tagbetrieb 1.Punkt	Temp*10, d.h. 200 = 20°C	700(70°C)
	1217	Vorlauftemperatur Tagbetrieb 2.Punkt	Temp*10, d.h. 200 = 20°C	550(55°C)
	1218	Vorlauftemperatur Tagbetrieb 3.Punkt	Temp*10, d.h. 200 = 20°C	400(40°C)
	1219	Vorlauftemperatur Tagbetrieb 4.Punkt	Temp*10, d.h. 200 = 20°C	250(25°C)
	1220	Vorlauftemperatur Nachtbetrieb 1.Punkt	Temp*10, d.h. 200 = 20°C	600(60°C)
	1221	Vorlauftemperatur Nachtbetrieb 2.Punkt	Temp*10, d.h. 200 = 20°C	400(40°C)
	1222	Vorlauftemperatur Nachtbetrieb 3.Punkt	Temp*10, d.h. 200 = 20°C	200(20°C)
	1223	Vorlauftemperatur Nachtbetrieb 4.Punkt	Temp*10, d.h. 200 = 20°C	200(20°C)
	1224	Rücklauftemperatur 1.Punkt	Temp*10, d.h. 200 = 20°C	650(65°C)
	1225	Rücklauftemperatur 2.Punkt	Temp*10, d.h. 200 = 20°C	650(65°C)
	1226	Rücklauftemperatur 3.Punkt	Temp*10, d.h. 200 = 20°C	650(65°C)
	1227	Rücklauftemperatur 4.Punkt	Temp*10, d.h. 200 = 20°C	650(65°C)

Zur Aktivierung der 4-Punkt-Kennlinie müssen neben analogen Registern auch digitale Register (Coils) geschrieben werden. Dafür wird genau wie bei den analogen Registern das ModBus-Protokoll verwendet. Der einzige Unterschied beim Erstellen der Anweisungen ist, dass zum Schreiben von digitalen Registern im Feld *ModBus-Funktion* „**[0x05] Write Single Coil**“ ausgewählt wird. Beim Lesen von Coils wird im Feld *ModBus-Funktion* „**[0x01] Read Output Coil Status**“ gewählt und unter „Werte Konfiguration“ ein Konfigurationswert vom Typ „ONE_BIT“ erstellt. Alle relevanten Register sind in den Tabellen 5&6 aufgeführt, jedoch ist die Art des Registers (analog oder digital) zu beachten.

J.1.4 Minimale und Maximale Vorlauftemperatur

Zu Energiesparzwecken kann eine Begrenzung der maximalen Vorlauftemperatur eines jeweiligen Heizkreises erfolgen. Hier sind Kenntnisse über die Auslegungsdaten der Heizungsanlage erforderlich.

Parametrierung des Reglers mittels Smartbox:

Anhang-Tabelle 7: Grenzen für Vorlauftemperatur (Regelkreis 1)

Register		Beschreibung	Umrechnung	Werkseinstellung
analog	digital			
1000		Maximale Vorlauftemperatur	Temp*10, d.h. 200 = 20°C	900(90°C)
1001		Minimale Vorlauftemperatur	Temp*10, d.h. 200 = 20°C	200(20°C)

Anhang-Tabelle 8: Grenzen für Vorlauftemperatur (Regelkreis 2)

Register		Beschreibung	Umrechnung	Werkseinstellung
analog	digital			
1200		Maximale Vorlauftemperatur	Temp*10, d.h. 200 = 20°C	900(90°C)
1201		Minimale Vorlauftemperatur	Temp*10, d.h. 200 = 20°C	200(20°C)

J.2 AT Abschaltwert Nennbetrieb und Reduzierbetrieb

Der betreffende Heizkreis wird sofort außer Betrieb genommen, wenn die Außentemperatur den Grenzwert *AT-Abschaltwert Nennbetrieb/Reduzierbetrieb* überschreitet. Dazu wird das Ventil geschlossen und die Pumpe nach $t = 2 \times$ Ventillaufzeit ausgeschaltet. Bei Unterschreitung des Grenzwertes wird sofort wieder der Heizbetrieb aufgenommen.

Bei Werkseinstellung schaltet die Anlage also in der warmen Jahreszeit im Nennbetrieb bei 22°C Außentemperatur und im Reduzierbetrieb bei 15°C Außentemperatur ab.

Wird der Grenzwert *AT-Einschaltwert-Nennbetrieb* unterschritten und der Heizkreis befindet sich im Reduzierbetrieb, Betriebsart Automatik, wird dieser automatisch in den Nennbetrieb versetzt. Der Reduzierbetrieb wird wieder eingeleitet, wenn es zur Überschreitung des Grenzwertes kommt

Diese Funktion wird bei großer Kälte aktiviert, um ein zu starkes Auskühlen des Gebäudes während der Nichtnutzungszeit bei tiefen Außentemperaturen zu verhindern.

Parametrierung des Reglers mittels Smartbox:

Anhang-Tabelle 9: Außentemperatur-Abschaltwert Nenn- und Reduzierbetrieb (Regelkreis 1)

Register		Beschreibung	Umrechnung	Werkseinstellung
analog	digital			
1035		AT-Abschaltwert Nennbetrieb	Temp*10, d.h. 200 = 20°C	220(22°C)
1036		AT-Abschaltwert Reduzierbetrieb	Temp*10, d.h. 200 = 20°C	150(15°C)
1037		AT-Einschaltwert Nennbetrieb	Temp*10, d.h. 200 = 20°C	-150(-15°C)

Anhang-Tabelle 10: Außentemperatur-Abschaltwert Nenn- und Reduzierbetrieb (Regelkreis 2)

Register		Beschreibung	Umrechnung	Werkseinstellung
analog	digital			
1235		AT-Abschaltwert Nennbetrieb	Temp*10, d.h. 200 = 20°C	220(22°C)
1236		AT-Abschaltwert Reduzierbetrieb	Temp*10, d.h. 200 = 20°C	150(15°C)
1237		AT-Einschaltwert Nennbetrieb	Temp*10, d.h. 200 = 20°C	-150(-15°C)

J.3 Sommerbetrieb

Hinweis: *Der Sommerbetrieb wird nur im Automatikbetrieb wirksam.*

Maßgebend für die Einleitung des Sommerbetriebs ist die Höhe der Tagesdurchschnittstemperatur (ermittelt zwischen 7.00 und 22 Uhr) im eingestellten Wirksamkeitszeitraum. Überschreitet sie an n aufeinanderfolgenden Tagen den *Außentemperaturgrenzwert Sommer*, wird am folgenden Tag der Sommerbetrieb wirksam: die Ventile aller Heizkreise werden geschlossen und die Umwälzpumpen nach $t = 2 \times \text{Ventillaufzeit}$ ausgeschaltet. Unterschreitet die Tagesdurchschnittstemperatur den *Außentemperaturgrenzwert Sommer* an m aufeinanderfolgenden Tagen, wird am Folgetag der Sommerbetrieb eingestellt.

Parametrierung des Reglers mittels Smartbox:

Anhang-Tabelle 11: Sommerbetrieb

Register		Beschreibung	Umrechnung	Werkseinstellung
analog	digital			
112		Datum Beginn Sommerzeitraum	Datum*100, d.h. 3112=31.12	106(01.06)
113		Datum Ende Sommerzeitraum	Datum*100, d.h. 3112=31.12	3009(30.09)
114		Anzahl Tage für Sommerbetrieb EIN		2
115		Anzahl Tage für Sommerbetrieb AUS		1
116		AT-Grenzwert Sommerbetrieb	Temp*10, d.h. 200 = 20°C	180(18°C)

T

J.4 Trinkwasseraufbereitung

Parametrierung des Reglers mittels Smartbox:

Anhang-Tabelle 12: Trinkwasseraufbereitung

Register		Beschreibung	Umrechnung	Werkseinstellung
analog	digital			
1799		Sollwert der Temperatur des Warmwasserspeichers	Temp*10, d.h. 200 = 20°C	550(55°C)
1800		Maximale Einstellgrenztemperatur des Warmwassersollwerts	Temp*10, d.h. 200 = 20°C	400(40°C)
1801		Minimale Einstellgrenztemperatur des Warmwassersollwerts	Temp*10, d.h. 200 = 20°C	600(60°C)
1805		Maximale Ladetemperatur des Warmwasserspeichers	Temp*10, d.h. 200 = 20°C	800(80°C)
1806		Haltewert Warmwasserspeicher	Temp*10, d.h. 200 = 20°C	400(40°C)

J.5 Thermische Desinfektion

Bei allen Anlagen mit Trinkwassererwärmung wird an dem ausgewählten Wochentag oder täglich eine thermische Desinfektion des Trinkwassers durchgeführt.

Die *Haltezeit Desinfektionstemperatur* bestimmt, wie lange die Desinfektionstemperatur innerhalb des eingestellten Zeitraumes gehalten werden muss, damit der Vorgang erfolgreich gewertet wird.

Parametrierung des Reglers mittels Smartbox:

Anhang-Tabelle 13: Thermische Desinfektion

Register		Beschreibung	Umrechnung	Werkseinstellung
analog	digital			
1829		Desinfektionstemperatur (Thermische Desinfektion)	Temp*10, d.h. 200 = 20°C	700(70°C)
1830		Wochentag der thermischen Desinfektion	1 = Montag, ..., 7 = Sonntag	3(Mittwoch)
1831		Startzeit der thermischen Desinfektion	Zeit*100, d.h. 2345=23:45	0(00:00)
1832		Stoppzeit der thermischen Desinfektion	Zeit*100, d.h. 2345=23:45	400(04:00)
1838		Haltezeit Desinfektionstemperatur	0... 255 min	0 min

J.6 Temperaturabsenkung

Die *Temperaturabsenkung* bestimmt, um welche Temperatur (pro Stunde) der Sollwert für den Tagbetrieb zur Erreichung des Nachtsollwertes abgesenkt wird.

Parametrierung des Reglers mittels Smartbox:

Anhang-Tabelle 14: Temperaturabsenkung

Register		Beschreibung	Umrechnung	Werkseinstellung
analog	digital			
1061		Temperaturabsenkung Rk1	Absenkung*10, d.h. 50 = 5°C/h	0
1261		Temperaturabsenkung Rk2	Absenkung*10, d.h. 50 = 5°C/h	0