

Anne Hagemeyer

Messdatengestützte
dynamische Simulation
zur Analyse des
Energieverbrauchs
in Krankenhäusern

Dissertation

Messdatengestützte dynamische Simulation zur Analyse des Energieverbrauchs in Krankenhäusern

Dissertation

zur

Erlangung des Grades

Doktor-Ingenieur

der

Fakultät Architektur und Bauingenieurwesen

der Technischen Universität Dortmund

von

Anne Hagemeyer

aus Herdecke

Dortmund 2018

Tag der Abgabe:	21.04.2017
Tag der mündlichen Prüfung:	29.08.2017
Erster Gutachter:	Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Willems
Zweiter Gutachter:	Prof. Dr.-Ing. Christian Doetsch

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftliche Mitarbeiterin in der Abteilung Energiesysteme am Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik UMSICHT in Oberhausen. Viele Menschen haben mich im Laufe der Arbeit begleitet und unterstützt, bei denen ich mich an dieser Stelle bedanken möchte.

Zunächst einmal gilt mein Dank meinem Doktorvater Prof. Wolfgang Willems für die langjährige Betreuung der Arbeit, ebenso Prof. Christian Doetsch für die Übernahme des Zweitgutachtens.

Ein weiterer Dank gebührt meinen Kolleginnen und Kollegen bei Fraunhofer UMSICHT für die gemeinsame, produktive Projektarbeit. Dabei gilt mein Dank insbesondere meinem Bürokollegen Matthias Schnier, der für die vielen Messungen im Krankenhausprojekt verantwortlich war und meinem Abteilungsleiter Carsten Beier, in dessen thematische Fußstapfen ich mit der Fortführung des Krankenhausthemas treten durfte.

Während der Promotionszeit habe ich einige Abschlussarbeiten betreut und möchte Cornelius Schill, Susanne Strecker, Esther Cremer und Daniel Jäger für die sehr gute Zusammenarbeit und ihren Beitrag danken.

Weiterhin gab es im Kollegenkreis viele konstruktive Gespräche und Diskussionen, die für den Entstehungsprozess der Arbeit sehr wichtig waren. Nicht unerwähnt bleiben sollte dabei das Doktorandenbashing, welches ein immer wieder hilfreicher Prüfstand für die Inhalte der Arbeit war. Auch das Schreibcoaching und die gemeinsamen Schreibnachmittage haben erheblich zum Erfolg der Arbeit beigetragen. Weiterhin danke ich allen Kolleginnen und Kollegen für das Korrekturlesen der Arbeit, das Schokoladevorbeibringen an langen Arbeitstagen, die tolle Arbeitsatmosphäre und die vielen gemeinsamen Mittagspausen, die die Promotionszeit zu einer sehr schönen Zeit gemacht haben.

Nicht zuletzt danke ich meiner Familie und meinen Freunden, die mich phasenweise wenig (und nur in Kombination mit meinem Laptop) zu Gesicht und ab und zu auch eine gewisse Frustration zu spüren bekommen haben, für ihre Unterstützung und ihr Verständnis. Ein ganz besonderer Dank gilt dabei Nadja Bienert für die vielen gemeinsamen Schreib- und Lernnachmittage und das Korrekturlesen der gesamten Arbeit.

Kurzfassung

Mit Hilfe einer energetischen Gebäudesimulation können der Energieverbrauch eines Gebäudes analysiert und Parameter sowie Betriebsweisen mit einem hohen Einfluss auf den Energieverbrauch bestimmt werden. Als Folge können somit beispielsweise Einsparmaßnahmen identifiziert werden. Insbesondere in Krankenhäusern ist die Zusammensetzung der Energiebilanz oftmals nicht bekannt. Zudem liegt häufig ein hohes Energieeinsparpotenzial vor, sodass eine Gebäudesimulation hierzu wichtige Erkenntnisse liefern kann. Mit der großen Diversität ihrer Flächennutzungen und der Komplexität der technischen Anlagen stellen Krankenhäuser jedoch eine Herausforderung für die Simulation dar. Da bisher nur wenige detaillierte Untersuchungen der Energiebilanz von Krankenhäusern durchgeführt wurden, liegen zudem nur wenige Vergleichsdaten vor.

Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, das Vorgehen und die Randbedingungen für die energetische Simulation eines Krankenhauses zu erarbeiten. Dazu sollen der Detaillierungsgrad, nötige Eingangsdaten, deren Einfluss auf die Ergebnisse und ein Vorgehen für die Auswertung bestimmt werden. Um dieses Ziel zu erreichen, wurde der Stand der Forschung zum methodischen Vorgehen bei den einzelnen Arbeitsschritten einer Gebäudesimulation ausgewertet und untersucht, welche für die Simulation eines Krankenhauses relevanten Fragestellungen durch das bisherige Wissen nicht abgedeckt werden und welche Besonderheiten beachtet werden müssen. Die Untersuchung erfolgte anhand einer Fallstudie, in der ein Krankenhaus basierend auf Messdaten energetisch simuliert wurde und Eingangsdaten für die Simulation von Krankenhäusern erarbeitet wurden.

Als erster Schritt wurde der nötige Detailgrad für die Einteilung des Gebäudes in thermische Zonen untersucht. Für die meisten Bereiche reicht eine grobe Zonierung nach Himmelsrichtungen aus. Ausnahmen sind Bereiche mit geringem Heizwärmebedarf und mechanisch belüftete Bereiche mit Abluftregelung. Im nächsten Schritt wurden die Beleuchtungsnutzung erhoben, einzelne Geräte vermessen und daraus Raumprofile für typische Räume in Pflege- und Behandlungsbereichen generiert, mit deren Hilfe die Laststrukturen für die Simulation abbildet werden können. Eine Validierung mit gemessenen Verbräuchen einer Abteilung zeigte, dass mit dem Verfahren der reale Verbrauch bis auf eine Abweichung von etwa 5 % nachgebildet wird. Weitere Verbrauchsmessungen einzelner Verbraucher komplettieren die erhobene Datenbasis.

Weiterhin wurden über Sensitivitäts- und Unsicherheitsanalysen die Einflüsse der Eingangsparameter auf die Ergebnisse bestimmt und die relevantesten Parameter für verschiedene Bereiche des Krankenhauses identifiziert. Somit wurde der Bestimmung dieser Parameterwerte eine besondere Aufmerksamkeit geschenkt. Schließlich wurde eine Methodik zur Kalibrierung der Modelle mit Messdaten entwickelt. Dazu wurden die thermischen Energiemengen einzelner Gebäude über mehrere Wochen vermessen, sodass hochaufgelöste Daten für die Kalibrierung zur Verfügung standen. Die Werte der Eingangsparameter mit dem höchsten Einfluss auf die Ergebnisse wurden in einem mehrschrittigen Prozess angepasst, bis die Messergebnisse mit den Simulationsergebnissen übereinstimmten und die Grenzwerte nach ASHRAE für die Kalibrierung eingehalten wurden. Schließlich wurden mit Hilfe des Modells beispielhafte Auswertungen vorgenommen. Es wurden die Energiebilanz des Krankenhauses analysiert und Einsparmaßnahmen untersucht.

Abstract

A building energy simulation offers the opportunity to analyze the energy consumption of a building and to determine parameters and operation modes that have a strong influence on the energy consumption. As a consequence, energy conservation measures can be identified. In hospitals, there is often a great potential for energy conservation, however the composition of the energy balance in hospitals is frequently unknown. The diversity of the different uses and the complexity of the technical facilities pose a challenge for simulations. Currently, only a few detailed studies of the energy balance of hospitals have been conducted. As a result, there is little comparative data available.

The objective of this thesis is to assess the requirements and give recommendations for building energy simulations of hospitals. The necessary level of detail, input data, their influence on the results and a procedure for the assessment of the results shall be determined. For that purpose, the state of research and relevant methodological studies have been evaluated for each step of a simulation, in order to determine which questions that are relevant for the assessment of hospitals are not covered by previous research. These findings were applied to the case of a specific hospital by means of a case study, where primary data of hospital energy usage was gathered and characteristics for the simulation of hospitals were determined.

As a first step, the level of detail for the definition of the thermal zones was determined. For most areas, a coarse zoning strategy, with one zone for internal areas and one zone for each orientation of external areas is sufficient. Exceptions include areas with a low demand for heating energy and areas with mechanical ventilation and exhaust air temperature control. The next step was to generate input data for the simulation. A bottom-up-method was used. Data acquisition for lighting energy usage and readings from monitoring devices attached to small electrical devices in wards and treatment units were used to create room profiles for typical rooms. The method was validated by comparing the combined room profiles with ward-level measurements. An accuracy of 5% of the measured value was achieved by the estimation of the energy consumption by means of the room profiles.

The parameters with a strong influence on the results were identified via sensitivity and uncertainty analyses. As a consequence, a focus can be placed on data collection for these parameters in future. In the next step, the models of different buildings of the hospital complex were calibrated with measured data. Thermal energy consumption of these buildings was measured over a period of several weeks in order to generate high resolution data for calibration. The values with the highest influence on the results were changed in an iterative process, until simulated consumption matched with measured consumption and the allowable tolerances according to ASHRAE were met. Finally, the calibrated model was used to evaluate potential energy conservation measures and analyze the energy balance of the hospital.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	v
Tabellenverzeichnis	viii
Nomenklatur	xi
1 Einleitung	1
1.1 Problemlage und Zielstellung	1
1.2 Aufbau der Arbeit	2
2 Grundlagen	3
2.1 Situation der Krankenhäuser	3
2.2 Bauformen von Krankenhäusern	4
2.3 Energieverbrauch in Krankenhäusern	5
2.3.1 Energetische Infrastruktur und Verbrauchsanteile	5
2.3.2 Energiekennwerte	9
2.3.3 Einsparpotenzial	10
2.3.4 Maßnahmen	11
2.4 Gebäudesimulation	13
2.4.1 Chancen und Grenzen der Gebäudesimulation	13
2.4.2 Modellierung von Gebäuden in der Betriebsphase	16
2.4.3 Modellierung von Krankenhäusern	16
2.5 Fazit	19
3 Modellierungsumgebung und Modellierungsgegenstand	20
3.1 Modellierungsumgebung	20
3.1.1 Modelica	20
3.1.2 Grundlegende Prinzipien der Bibliothek	21
3.1.3 Aufbau der Bibliothek	22
3.1.4 Anwendung der Bibliothek	22
3.1.5 Modellierung des Gebäudes	23
3.1.6 Modellierung der Anlagentechnik	24
3.1.7 Modellierung der Wetterdaten	26
3.2 Überblick über das Krankenhaus	26
3.2.1 Energieversorgung und Energieverbrauch	27
3.2.2 Beschreibung einzelner Stationen	27

4	Zonierung	32
4.1	Hintergrund zur Zonierung	32
4.1.1	Vorgehen bei der Zonierung	33
4.1.2	Anzahl der Zonen	34
4.1.3	Fazit	35
4.2	Eigene Untersuchungen zur Zonierung	35
4.2.1	Erstellte Zonierungen	36
4.2.2	Ergebnisse	39
4.2.3	Fazit	44
5	Bestimmung der Eingangsdaten	47
5.1	Überblick über vorhandene Daten	47
5.1.1	Krankenhausspezifische Daten	48
5.1.2	Nutzungsabhängige Daten anderer Gebäudetypen	52
5.1.3	Fazit	56
5.2	Eigene Bestimmung von Eingangsdaten	56
5.2.1	Vorgehen zur Erhebung der nutzungsabhängigen Daten	56
5.2.2	Einteilung der Raumtypen	57
5.2.3	Erfassung der Beleuchtung	59
5.2.4	Messung von Kleingeräten	62
5.2.5	Messung von Abteilungen	66
5.2.6	Erstellung von Raumprofilen für Beleuchtung und Geräte	67
5.2.7	Validierung der Raumprofile	67
5.2.8	Weitere elektrische Verbraucher	69
5.2.9	Raumtemperaturen im Krankenhaus	71
5.2.10	Lüftung	72
5.2.11	Fazit	74
6	Sensitivität und Unsicherheit der Eingangsdaten	76
6.1	Hintergrund zur Sensitivität der Eingangsdaten	76
6.1.1	Definition und Zielsetzung von Unsicherheits- und Sensitivitätsana- lysen	76
6.1.2	Methoden	77
6.1.3	Wahrscheinlichkeitsverteilung der Eingangsdaten	81
6.1.4	Fazit	83
6.2	Vergleichende Analyse der Parametersensitivitäten in Gebäudesimulatio- nen aus der Literatur	83
6.2.1	Auswahl der Studien	83
6.2.2	Gruppierung der Parameter	84
6.2.3	Klassifizierung der Parameter	84
6.2.4	Auswertung	84
6.3	Eigene Untersuchung von Parametersensitivitäten	87
6.3.1	Unsicherheiten der Eingangsparameter	88
6.3.2	Durchführung der Sensitivitätsanalyse	88
6.3.3	Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse	90

6.3.4	Ergebnisse der Unsicherheitsanalyse	96
6.3.5	Fazit	98
7	Kalibrierung	100
7.1	Hintergrund zur Kalibrierung	100
7.1.1	Nutzen der Kalibrierung	100
7.1.2	Herausforderungen	101
7.1.3	Methoden	101
7.1.4	Fazit	103
7.2	Entwicklung und Anwendung einer eigenen Kalibrierungsmethodik	104
7.2.1	Methode	104
7.2.2	Vergleichsdaten für die Kalibrierung	105
7.2.3	Initiales Modell	106
7.2.4	Iterative Monte-Carlo-Analyse	107
7.2.5	Kalibriertes Modell	111
7.2.6	Fazit	112
8	Durchführung von Auswertungen	114
8.1	Hintergrund zur Durchführung von Auswertungen	114
8.1.1	Berechnung von Einsparmaßnahmen durch energetische Gebäude- simulation	114
8.1.2	Fazit	117
8.2	Fallstudie zur Durchführung von Auswertungen	117
8.2.1	Zusammensetzung der Energiebilanz des Krankenhauses	117
8.2.2	Simulation von Einsparmaßnahmen	122
8.2.3	Fazit	124
9	Zusammenfassung und Ausblick	126
9.1	Zusammenfassung	126
9.2	Ausblick	130
	Literaturverzeichnis	131
	Anhang	151
A	Beleuchtungs-, Geräte- und Raumprofile	152
A.1	Beleuchtung	152
A.2	Messergebnisse der Kleingeräte	153
A.3	Messergebnisse von Großverbrauchern	172
A.3.1	Medizinische Großgeräte	172
A.3.2	Aufzüge	173
A.3.3	Druckluftherzeugung	174
A.4	Berechnung von Raumprofilen aus Messungen von Gesamtabteilungen . . .	175
A.4.1	OP-Stationen	175
A.4.2	Intensivstationen	178
A.5	Raumprofile der einzelnen Raumtypen	180

B Fensteröffnung	203
C Sensitivitätsanalyse	204
C.1 Variation der Eingangswerte der Sensitivitäts- und Unsicherheitsanalyse . .	204
C.2 μ^*/σ -Diagramme für die Modelle mit Altbaustandard	209

Abbildungsverzeichnis

3.1	Aufbau der Modelica-Bibliothek	22
3.2	Grundriss des Krankenhauses	26
3.3	Süd- und Nordfassade des Haupthauses	28
3.4	Grundriss der ersten Etage des Süd-Ost-Flügels des Haupthauses	29
3.5	Westansicht des Wahlleistungsgebäudes	29
3.6	Grundriss einer Pflegestation des Wahlleistungsgebäudes	30
3.7	Grundriss der beiden OP-Stationen	31
4.1	Schema der Zonierungsvarianten des Süd-Ost-Flügel des Haupthauses	37
4.2	Schema der Zonierungsvarianten einer Etage des Wahlleistungsgebäudes	37
4.3	Zonierungsvarianten der OP-Stationen	38
4.4	Heizenergiebedarfe der Zonierungsvarianten für die einzelnen Bereiche des Haupthauses	39
4.5	Wärmeströme der Zonierungsvarianten für den Süd-Ost-Flügel	41
4.6	Heizenergiebedarfe der Zonierungsvarianten für die einzelnen Bereiche des Wahlleistungsgebäudes	42
4.7	Thermische Energiebedarfe der Zonierungsvarianten für die OP-Stationen	43
5.1	Tagesgänge des Energiebedarfes für die Trinkwarmwasserbereitung	49
5.2	Möglichkeiten zur Abbildung des Nutzerverhaltens im Modell	52
5.3	Schema der Erstellung der Raumprofile	57
5.4	Aufnahme einer Krankenhausfassade zur Bestimmung des Anteils eingeschalteter Beleuchtung	61
5.5	Anteile eingeschalteter Beleuchtung in vier beispielhaften Raumtypen	61
5.6	Schema der Erstellung des Beleuchtungsprofils für ein Bettzimmer	62
5.7	Kleingerätemessung	63
5.8	Tagesmessung eines Fernsehers	64
5.9	Mittleres Profil der normierten Betriebsleistung der Fernseher	65
5.10	Vereinfachtes, normiertes Profil des Fernsehers	66
5.11	Messung an einer el. Unterverteilung	67
5.12	Vergleich von gemessenen und durch Aggregation der Raumprofile gebildete Lastgänge der Abteilung	68
5.13	Gemessener, gemittelter und vereinfachter Lastgang des MRTs	69
5.14	Mittlerer Tagesgang eines Wochentages der thermischen Energie zur Trinkwarmwassererwärmung	71
5.15	Raumtemperaturverlauf bei drei Krankenhausrundgängen	72
5.16	Raumtemperaturverlauf in zwei Bettzimmern aus der GLT	72
5.17	Anteile geöffneter Fenster in Abhängigkeit der Außentemperatur	73
5.18	Anteile geöffneter Fenster für die vier Raumtypengruppen	74

5.19	Vergleich des erhobenen Anteiles geöffneter Fenster für Büroräume und Bettenzimmer im Krankenhaus mit Werten aus der Literatur	75
6.1	Schema eines Morris-Screenings	79
6.2	Dichtefunktionen der Wahrscheinlichkeitsverteilungen	81
6.3	Ursachen für Unsicherheiten in den Eingangsparametern	82
6.4	Ergebnisse des Screenings des Wahlleistungsgebäudes	92
6.5	Ergebnisse des Screenings für die OP-Station	95
6.6	Histogramm und Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion der Ergebnisse der Un- sicherheitsanalyse für die Heizenergie	97
6.7	Mittelwert, Standardabweichung und oberes Quartil der Gesamtenergie für unterschiedliche Stichprobenumfänge	97
7.1	Ablaufschema der Kalibrierung	104
7.2	Vergleich der Mess- und Simulationsergebnisse des initialen Modells	107
7.3	Ergebnisse der ersten Monte-Carlo-Analyse zur Kalibrierung des Wahlleis- tungsgebäudes	108
7.4	Verteilung der Eingangswerte für Zuluftvolumenstrom und -temperatur der besten und schlechtesten zehn Ergebnisse der RLT-Kälteenergie	109
7.5	Ergebnisse der Monte-Carlo-Analyse zur Kalibrierung des Wahlleistungs- gebäudes nach zwei Iterationen	110
7.6	Vergleich der Messwerte und Simulationsergebnisse nach 14 Iterationen . .	112
7.7	Ergebnisse der Monte-Carlo-Analyse zur Kalibrierung des Wahlleistungs- gebäudes nach 14 Iterationen	113
8.1	Anteile der verschiedenen Raumtypen am Gesamtverbrauch der jeweiligen Station	119
8.2	Energieeinsparung durch Änderungen der Zulufttemperatur	123
8.3	Werte für die Betriebsparameter der besten und schlechtesten zehn Para- meter	125
A.1	Normiertes Profil der Wasserkocher	155
A.2	Normiertes Profil der Kaffeemaschinen	156
A.3	Normiertes Profil der Mikrowellen	157
A.4	Normiertes Profil der Computer im Dienstzimmer	158
A.5	Normiertes Profil der Monitore im Dienstzimmer	159
A.6	Normiertes Profil der Drucker im Dienstzimmer	160
A.7	Normiertes Profil der Computer im Büro	161
A.8	Normiertes Profil der Monitore in Büroräumen	162
A.9	Normiertes Profil der Drucker in Büroräumen	163
A.10	Normiertes Profil der Kaffeemaschinen in Büroräumen	164
A.11	Normiertes Profil der Computer in Arztzimmern	165
A.12	Normiertes Profil der Monitore in Arztzimmern	166
A.13	Normiertes Profil der Monitore in Behandlungsräumen	167
A.14	Normiertes Profil der Kopierer	168
A.15	Normiertes Profil der Steckbeckenspülen	169

A.16	Normiertes Profil der Ultraschallgeräte	170
A.17	Normiertes Profil der Dialysegeräte	171
A.18	Mittlere elektrische Profile medizinischer Großgeräte	172
A.19	Messergebnisse für zwei Aufzüge	173
A.20	Mittleres Profil der Druckluftherzeugung	174
A.21	Profile für OP-Saal, Einleitung und Aufwachraum	177
A.22	Vergleich der gemessenen und aus den Raumprofilen aggregierten Verbräuche der drei OP-Stationen	177
A.23	Gemessene und aus den Raumprofilen aggregierte Profile der Intensivstation	179
A.24	Beleuchtungsprofil für einen Flur	180
A.25	Beleuchtungs- und Geräteprofile für ein 1-Personen-Bettzimmer	181
A.26	Beleuchtungs- und Geräteprofile für ein 1-Personen-Wahlleistungszimmer .	182
A.27	Beleuchtungsprofil für einen Lagerraum	183
A.28	Beleuchtungs- und Geräteprofile für ein Büro	184
A.29	Beleuchtungsprofil für eine Etage eines Treppenhauses	185
A.30	Beleuchtungs- und Geräteprofile für einen Behandlungsraum Typ I	186
A.31	Beleuchtungs- und Geräteprofile für einen Behandlungsraum Typ II	187
A.32	Beleuchtungs- und Geräteprofile für einen Aufenthaltsraum	188
A.33	Beleuchtungs- und Geräteprofile für einen Warteraum	189
A.34	Beleuchtungs- und Geräteprofile für einen Einleitungsraum	190
A.35	Beleuchtungs- und Geräteprofile für einen Aufwachraum	190
A.36	Beleuchtungs- und Geräteprofile für ein Arztzimmer	191
A.37	Beleuchtungs- und Geräteprofile für eine Teeküche im Pflegebereich	192
A.38	Beleuchtungs- und Geräteprofile für eine ambulante Teeküche	193
A.39	Beleuchtungs- und Geräteprofile für ein Dienstzimmer	194
A.40	Raumprofil für einen Operationssaal	195
A.41	Beleuchtungs- und Geräteprofile für ein Intensivzimmer	196
A.42	Beleuchtungs- und Geräteprofile für die Cafeteria	197
A.43	Beleuchtungs- und Geräteprofile für einen unreinen Pflegearbeitsraum . . .	198
A.44	Profil der Großküche	199
A.45	Profil der ZSVA	200
A.46	Beleuchtungs- und Geräteprofile für einen Kopierraum	202
C.1	Ergebnisse des Screenings des Wahlleistungsgebäudes mit Altbaustandard und geringer Unsicherheit der U-Werte	209
C.2	Ergebnisse des Screenings des Wahlleistungsgebäudes mit Altbaustandard und hoher Unsicherheit der U-Werte	210
C.3	Ergebnisse des Screenings der Bettenstation	211
C.4	Ergebnisse des Screenings des Bürotrakts	212

Tabellenverzeichnis

2.1	Anteile verschiedener Verbraucher am Stromverbrauch des Krankenhauses	7
2.2	Energieverbrauchskennwerte von Krankenhäusern	9
2.3	Energieeinsparmaßnahmen in Krankenhäusern	12
2.4	Fehlerquellen in der Gebäudesimulation	14
3.1	Übersicht der simulativen Untersuchungen der Gebäudeteile in den Kapiteln	28
4.1	Gewählte Zonenzahlen bei der Simulation bestehender Gebäude	34
4.2	Eigenschaften der für die Zonierungsuntersuchungen ausgewählten Gebäude	36
4.3	Berechnete Varianten für die drei Krankenhausbereiche	39
4.4	Relative Abweichungen der Simulationen der Gebäude von der jeweils detailliertesten Simulation	45
5.1	Quellen für nutzerunabhängige Eingangsdaten einer Gebäudesimulation . .	47
5.2	Warmwassermengen und Energieverbrauch für die Trinkwassererwärmung	48
5.3	Elektrische Energieverbräuche von Krankenhausgeräten	50
5.4	Elektrische Energieverbräuche von Krankenhausbereichen	51
5.5	Empfohlene Gleichzeitigkeitsfaktoren nach Wilkins und Hosni (2011) . . .	55
5.6	Einteilung der Raumtypen	58
5.7	Installierte Beleuchtungsleistungen in verschiedenen Raumtypen	59
5.8	Anteile der Räume mit eingeschalteter Beleuchtung	60
5.9	Durchschnittliche Ausstattungen der Raumtypen in den Pflegestationen .	63
5.10	Ergebnisse der Fernsehermessungen	65
5.11	Raumtypen in der Wahlleistungsstation	68
5.12	Vermessene Großgeräte	69
5.13	Gemessene Energieverbräuche der Trinkwarmwassererwärmung für die einzelnen Gebäude und das Gesamtkrankenhaus	70
5.14	Koeffizienten für das Logit-Modell	74
6.1	Empfohlene Stichprobenzahl für eine Monte-Carlo-Analyse von Gebäude- modellen	80
6.2	Übersicht über Sensitivitätsanalysen in verschiedenen Studien	85
6.3	Übersicht über die in den Sensitivitätsanalysen untersuchten Parameter . .	86
6.4	Parameter mit hohem und geringem Einfluss auf Heiz-, Kühl-, und elek- trische Energie	87
6.5	In der Sensitivitätsanalyse betrachtete Parameter	89
6.6	Varianten der Gebäude für die Sensitivitätsanalyse	90
6.7	Ergebnisse der Unsicherheitsanalyse	96
6.8	Übersicht über die durch das Screening identifizierten relevanten Parameter	98

7.1	Toleranzen für eine Kalibrierung nach ASHRAE Guideline 14-2002	102
7.2	Gemessene thermische Energiemengen im Wahlleistungsgebäude	106
7.3	Fehler der initialen Simulation im Vergleich zu den Messdaten	106
7.4	Werte der Parameter für die erste Iterationrechnung der Kalibrierung . . .	107
7.5	Abweichungen der besten und schlechtesten Ergebnisse im Vergleich zu den Messwerten für die 1. Iteration	108
7.6	Werte der Parameter für die zweite Iterationrechnung der Kalibrierung . .	109
7.7	Abweichungen der besten und schlechtesten Ergebnisse im Vergleich zu den Messwerten nach der zweiten Iterationsrechnung	110
7.8	Werte der Parameter für die 14. Iterationrechnung der Kalibrierung	111
7.9	Abweichungen der besten und schlechtesten Ergebnisse im Vergleich zu den Messwerten nach 14 Iterationen	111
8.1	Anteile verschiedener Verbraucher am Gesamtstromverbrauch des Kran- kenhauses	118
8.2	Charakteristika der Pflegestationen des Krankenhauses	119
8.3	Einsparpotenziale durch die untersuchten Strategien	121
A.1	Anteile eingeschalteter Beleuchtung während der Nachtstunden für die ver- schiedenen Raumtypen	152
A.2	Messergebnisse Wasserkocher	155
A.3	Messergebnisse Kaffeemaschine	156
A.4	Messergebnisse Mikrowellen	157
A.5	Messergebnisse Computer Dienstzimmer	158
A.6	Messergebnisse Monitor Dienstzimmer	159
A.7	Messergebnisse Drucker Dienstzimmer	160
A.8	Messergebnisse Computer Büro	161
A.9	Messergebnisse Monitor Büro	162
A.10	Messergebnisse Drucker Büro	163
A.11	Messergebnisse Kaffeemaschine Büro	164
A.12	Messergebnisse Computer Arztzimmer	165
A.13	Messergebnisse Monitor Arztzimmer	166
A.14	Messergebnisse Monitor Behandlungsraum	167
A.15	Messergebnisse Kopierer	168
A.16	Messergebnisse Steckbeckenspüle	169
A.17	Messergebnisse Ultraschallgerät	170
A.18	Messergebnisse Dialysegerät	171
A.19	Flächen der Raumtypen in den drei vermessenen OP-Stationen	176
A.20	Zusammensetzung der Räume auf der Intensivstation	178
A.21	Parameter des Raumprofils Flur	180
A.22	Parameter des Raumprofils Bettzimmer	181
A.23	Parameter des Raumprofils Bettzimmer Wahlleistung	182
A.24	Parameter des Raumprofils Lager	183
A.25	Parameter des Raumprofils Büro	184
A.26	Parameter des Raumprofils Treppenhaus	185
A.27	Parameter des Raumprofils Behandlungsraum Typ I und Typ II	186

A.28	Parameter des Raumprofils Aufenthalt	188
A.29	Parameter des Raumprofils Warteraum	188
A.30	Parameter des Raumprofils Arztzimmer	191
A.31	Parameter des Raumprofils Teeküche	192
A.32	Parameter des Raumprofils Dienstzimmer	194
A.33	Parameter des Raumprofils unreiner Pflegearbeitsraum	198
A.34	Parameter des Raumprofils Kopierraum	202
B.1	Anteil der Räume mit geöffneten Fenstern in Abhängigkeit der Außentemperatur	203
B.2	Koeffizienten der Logit-Funktion für die Fensteröffnung in verschiedenen Raumtypen	203
C.1	Parameter der Sensitivitätsanalyse	204

Nomenklatur

Abkürzungen

A	Ambulanz
BHKW	Blockheizkraftwerk
CT	Computertomograph
CV(RMSE)	Variationskoeffizient der Wurzel der mittleren Fehlerquadratsumme (<i>engl.:</i> coefficient of variation of the root mean square error)
DSA	Differentielle Sensitivitätsanalyse
GLT	Gebäudeleittechnik
KH	Krankenhaus
MBE	Relativer Fehler (<i>engl.:</i> mean bias error)
MRT	Magnetresonanztomograph
N	Anzahl
NWG	Nichtwohngebäude
OAT	One factor at a time
OP	Operationssaal
PET	Positron-Emissionstomograph
P	Pflegebereich
RLT	Raumlufttechnik
RMSE	Wurzel der mittleren Fehlerquadratsumme (<i>engl.:</i> root mean square error)
SA	Sensitivitätsanalyse
TRY	Testreferenzjahr (<i>engl.:</i> test reference year)

UB	Untersuchungs- und Behandlungstrakt
ULK	Umluftkühlgerät
WE	Wochenende
WG	Wohngebäude
W	Wochentag
ZSVA	Zentrale Sterilgutversorgungsabteilung

Symbole

A_{AW}	Außenwandfläche in m^2
A_F	Fensterfläche in m^2
A_I	Fläche der Innenwände in m^2
$a_{kon,B}$	konvektiver Anteil der Wärmeabgabe durch die Beleuchtung
A_{kond}	konditionierte Fläche eines Gebäudes in m^2
$a_{kon,G}$	konvektiver Anteil der Wärmeabgabe durch Geräte
$a_{kon,P}$	konvektiver Anteil der Wärmeabgabe durch Personen
α	Absorptionsgrad der Außenwände
a_R	Rahmenanteil des Fensters
A/V	Oberflächen-zu-Volumen-Verhältnis eines Gebäudes
C_{AW}	Wärmekapazität der Außenwände in J/K
C_B	Wärmekapazität des Bodens in J/K
C_D	Wärmekapazität des Daches in J/K
C_{IW}	Wärmekapazität der Innenwände in J/K
C_G	Wärmekapazität des Gebäudes, inkl. Zwischenwände und Mobiliar in J/(K)
c_P	spezifische Wärmekapazität in kJ/(kg K)
E_{ges}	Gesamter Energieverbrauch des Gebäudes als Summe aus Wärmeenergie und elektrischer Energie in kWh

$E_{Primär}$	Primärenergieverbrauch des Gebäudes in kWh
ϵ	Emissionsgrad der Außenwände
η	Wirkungsgrad
η_{Kessel}	Wirkungsgrad des Heizkessels
η_V	Wirkungsgrad des Ventilators
$f_{\dot{V}_{Ab}}$	Faktor zur Variation des Abluftvolumenstroms
f_S	Faktor zur Variation der Verschattung
$f_{V,Z}$	Faktor zur Variation des Luftaustausches zwischen den Zonen
$f_{\dot{V}_{Zu}}$	Faktor zur Variation des Zuluftvolumenstroms
g	Gesamtenergiedurchlassgrad des Fensters (g-Wert)
h	Wärmeübergangskoeffizient in W/(m ² K)
f_{Etage}	Höhe einer Etage in m
l/b	Längen- zu Breitenverhältnis des Gebäudes
m	Masse in kg
M_i	Messwert
\bar{M}	Mittelwert der Messwerte
μ	Mittelwert
N	Anzahl
n	Luftwechselrate in 1/h
n_{50}	Luftwechselrate bei einer Druckdifferenz von 50 Pa in 1/h
n_{Inf}	Luftwechselrate durch Infiltration in 1/h
n_{mech}	Luftwechselrate durch mechanische Belüftung in 1/h
N_P	Anzahl der Parameter
P	Leistung in W

p	Wahrscheinlichkeit
$P_{Betrieb}$	Betriebsleistung eines Gerätes in W
P_{el}	Elektrische Leistung des Gebäudes in kW
P_{ges}	Gesamte Leistung des Gebäudes, als Summe aus Heizleistung und elektrischer Leistung in kW
P_H	Heizleistung des Gebäudes in kW
P_{Inst}	Installierte Leistung in W
P_K	Kühlleistung des Gebäudes in kW
P_P	Pumpenleistung in W
P_{norm}	normierte Leistung eines Gerätes in W
$P_{Standby}$	Standbyleistung in W
P_V	Ventilatorleistung in W
Q	Wärmemenge in kW
q_{50}	Infiltrierter Luftvolumenstrom bei einer Druckdifferenz von 50 Pa in $m^3/(h m^2)$
\dot{Q}_B	Wärmeabgabe der Beleuchtung in W
\dot{Q}_G	Wärmeabgabe der Geräte in W
Q_H	Heizenergiebedarf des Gebäudes in kW
$\dot{Q}_{IL,ges}$	Wärmeabgabe der inneren Lasten in W
\dot{Q}_{Inf}	Wärmegewinne/-verluste der Zone durch Infiltration in W
Q_K	Kühlenergiebedarf des Gebäudes in kW
\dot{Q}_{Meta}	Metabolismusrate in W/Person
\dot{Q}_P	Wärmeabgabe der Personen in W
\dot{Q}_{RLT}	Wärmegewinne/-verluste der Zone durch mechanische Belüftung in W
\dot{Q}_{Str}	Wärmeaustausch über Strahlung in W
\dot{Q}_{Umg}	Wärmeaustausch der Zone mit der Umgebung über Außenbauteile in W

R	Wärmeleitwiderstand in $\text{m}^2 \text{K}/\text{W}$
R_v	Wärmeleitwiderstand der virtuellen Bodenschicht nach DIN 13370 in $\text{m}^2 \text{K}/\text{W}$
σ	Standardabweichung
S_i	Simulierter Wert
t	Zeit/Betriebszeit
t_B	Nutzungszeit der Beleuchtung in h
t_G	Nutzungszeit von Geräten in h
t_P	Nutzungszeit durch Personen in h
t_{RLT}	Betriebszeit der raumlufttechnischen Anlage in h
T	Trajektorie des Screenings nach Morris
T	Temperatur
T_a	Außentemperatur in $^{\circ}\text{C}$
T_{Heiz}	Raumtemperatursollwert in der Heizperiode in $^{\circ}\text{C}$
$T_{Kühl}$	Raumtemperatursollwert in der Kühlperiode in $^{\circ}\text{C}$
T_{Zone}	Temperatur einer thermischen Zone in $^{\circ}\text{C}$
$T_{V,H}$	Vorlauftemperatur des Heizungsnetzes in $^{\circ}\text{C}$
$T_{V,K}$	Vorlauftemperatur des Kaltwassernetzes in $^{\circ}\text{C}$
T_{Zu}	Zulufttemperatur in $^{\circ}\text{C}$
U	Wärmedurchgangskoeffizient (U-Wert) in $\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$
U_{AW}	Wärmedurchgangskoeffizient (U-Wert) der Außenwand in $\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$
U_B	Wärmedurchgangskoeffizient (U-Wert) des Bodens in $\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$
U_D	Wärmedurchgangskoeffizient (U-Wert) des Dachs in $\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$
U_F	Wärmedurchgangskoeffizient (U-Wert) des Fensters in $\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$
U_{IW}	Wärmedurchgangskoeffizient (U-Wert) der Innenwände in $\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$

\dot{V}_{Gas}	Gasverbrauch in m ³ /h
ϕ_{min}	Minimalwert der Zuluftfeuchte in %
φ	Orientierung des Gebäudes in °
x	Eingangsparameter in die Simulation
y	Simulationsergebnis

Kapitel 1

Einleitung

1.1 Problemlage und Zielstellung

Etwa 40 % des europäischen Energiebedarfs werden von Gebäuden verursacht (ODYSEEMURE, 2015). Dieser Anteil könnte erheblich reduziert werden, wenn das vorhandene Energieeinsparpotential ausgeschöpft würde. Krankenhäuser weisen durch hohe Luftwechselraten, energieintensive Geräte und die 24-stündige Nutzung besonders hohe Energieverbräuche pro Gebäudefläche auf. Auch hier sind viele Einsparungen möglich. Dass diese oftmals nicht umgesetzt werden, ist durch verschiedene Faktoren begründet. Unter anderem sind die sehr komplexe Struktur der Energieversorgung, fehlende Investitionsmittel und fehlende zeitliche und personelle Ressourcen zu nennen. Ein weiterer Grund ist die oftmals schlechte Datenlage, durch die es schwerfällt, Ineffizienzen zu identifizieren und Effekte von Einsparmaßnahmen abzuschätzen.

Die Durchführung einer energetischen Gebäudesimulation ist ein möglicher Ansatz, um Verbräuche in Krankenhäusern transparent zu machen. Dies ist eine allgemein anerkannte Methode zur energetischen Bewertung von Gebäuden und zur Identifikation von Ineffizienzen. Für eine Gebäudesimulation ist eine Vielzahl an Eingangsdaten nötig, deren Bestimmung, vor allem in älteren Gebäuden, in der Regel mit hohem Aufwand verbunden ist. Unter den Eingangsdaten stellen die Nutzungsdaten eine besondere Herausforderung dar, da diese nur schwer abgeschätzt werden können.

Eine Vielzahl bisheriger Simulationsstudien befasst sich mit Büro- und Wohngebäuden. Simulative Untersuchungen von Krankenhäusern wurden hingegen selten durchgeführt oder konzentrieren sich auf Teilaspekte, beispielsweise die Simulation einzelner Bereiche. Während für andere Gebäudetypen viele Vergleichsdaten vorliegen, ist die Datenbasis für Krankenhäuser sehr dünn.

Aus den genannten Schwierigkeiten leitet sich die Zielstellung der vorliegenden Arbeit ab. Es wird untersucht, welche über den aktuellen Stand der Forschung hinausgehenden Informationen und methodischen Vorgehensweisen nötig sind, um ein Krankenhaus modellieren zu können. Dazu werden offene Fragestellungen identifiziert und diese anhand einer Fallstudie, bei der ein konkretes Krankenhaus simuliert wird, untersucht. Es werden die Besonderheiten im Vergleich zur Simulation anderer Gebäude herausgestellt, methodische Empfehlungen für die Simulation von Krankenhäusern und der Bewertung energetischer Einsparmaßnahmen abgeleitet und Eingangsdaten erhoben, die soweit möglich, auch auf

andere Krankenhäuser übertragbar sind. Die Eingangsdaten betreffen vor allem die Nutzungsdaten, die sich zum Teil erheblich von denen anderer Gebäudetypen unterscheiden. Die bauphysikalischen Eigenschaften und technischen Anlagen hingegen sind vergleichbar mit anderen Gebäuden.

1.2 Aufbau der Arbeit

Im folgenden Kapitel 2 werden die Grundlagen der Arbeit erläutert. Es wird sowohl auf die nicht-energetischen und energetischen Gegebenheiten in Krankenhäusern eingegangen, als auch die Gebäudesimulation erläutert und eine Übersicht über bisherige Arbeiten gegeben. Die verwendete Simulationsumgebung und das exemplarisch untersuchte Krankenhaus werden in Kapitel 3 vorgestellt und relevante Bereiche im Detail beschrieben.

Der weitere Aufbau der Arbeit orientiert sich an dem Vorgehen einer Gebäudesimulation. In jedem Kapitel wird ein einzelner Arbeitsschritt beschrieben. Im ersten Teil des Kapitels wird der aktuelle Stand der Forschung zu dem jeweiligen Schritt erfasst und fehlendes Wissen identifiziert. Im zweiten Teil wird diese Fragestellung anhand der Simulation des Beispielkrankenhauses untersucht und wenn möglich werden allgemeingültige Vorgehensweisen abgeleitet.

Als erster Schritt der Simulation erfolgt die Zonierung. Diese ist Bestandteil des Kapitels 4, in dem untersucht wird, welche Zonierungsgenauigkeit für verschiedene Bereiche des Krankenhauses notwendig ist.

Im nächsten Schritt werden die Eingangsdaten festgelegt. Um diese zu bestimmen, wird in Kapitel 5 eine Reihe von Messungen im Krankenhaus vorgestellt und ausgewertet.

Um zu untersuchen, wie hoch der Einfluss der jeweiligen Eingangsdaten auf die Simulationsergebnisse ist und welche Ergebnisunsicherheit zu erwarten ist, wird in Kapitel 6 eine Sensitivitäts- und Unsicherheitsanalyse durchgeführt.

Liegen reale Messdaten für ein Gebäude vor, so sollte das Modell mit Hilfe dieser Messdaten kalibriert werden, damit der reale Gebäudebetrieb durch das Modell abgebildet wird. In Kapitel 7 wird daher eine Kalibrierung durchgeführt und die verwendete Methode zur Kalibrierung beschrieben.

In Kapitel 8 erfolgt eine beispielhafte Auswertung, indem die Zusammensetzung der Energiebilanz des Krankenhauses untersucht und Einsparmaßnahmen simuliert werden. Abschließend werden die Ergebnisse in Kapitel 9 zusammengefasst.

Kapitel 2

Grundlagen

In diesem Kapitel wird die Forschungsfrage dieser Arbeit hergeleitet, indem sowohl auf den Hintergrund der Energienutzung in Krankenhäusern als Objekt der Simulation, als auch auf die Gebäudesimulation als angewandte Methode eingegangen wird. Bevor die Energieversorgung und -nutzung und im Krankenhaus beschrieben wird, werden zunächst einige nicht-energetische Gegebenheiten im Krankenhaus genannt, da diese Rahmenbedingungen auch einen Einfluss auf die energetische Situation haben.

2.1 Situation der Krankenhäuser

Krankenhäuser sind laut Krankenhauspflegegesetz in der Fassung der Bekanntmachung vom 10. April 1991 „Einrichtungen, in denen durch ärztliche und pflegerische Hilfeleistung Krankheiten, Leiden oder Körperschäden festgestellt, geheilt oder gelindert werden sollen oder Geburtshilfe geleistet wird und in denen die zu versorgenden Personen untergebracht und verpflegt werden können“. Aus diesen Aufgaben resultieren Gebäude mit einer komplexen Struktur und Ausstattung, wobei es zwischen den einzelnen Krankenhäusern große Unterschiede gibt. Ein Krankenhaus der Grundversorgung weist entweder eine Abteilung der Fachrichtung Innere Medizin oder Chirurgie auf und verfügt über weniger als 200 Betten. Krankenhäuser der Maximalversorgung sind häufig Unikliniken mit einer Vielzahl an Fachabteilungen, hoch differenzierten medizinisch-technischen Einrichtungen und weit über 500 Betten (Roeder und Hensen, 2009; Nagel, 2007). Insgesamt gab es in Deutschland im Jahr 2015 knapp 2000 Krankenhäuser mit 500 000 aufgestellten Betten, in denen 19 Mio. Fälle behandelt wurden. Die Bettenauslastung lag im Schnitt bei 77,5 % (Destatis, 2016).

Die aktuelle Entwicklung von Krankenhäusern ist durch viele Umbrüche und Änderungen geprägt (Singer und Tschudi, 2009). „The one constant thing in a hospital is change – change in personnel, change in patient demographics, change in technology, change in treatment methods and change in space demands“ (IEEE 602:2007). So ist beispielsweise ein Rückgang der Krankenhauszahlen und der Zahl der aufgestellten Betten zu beobachten. Zu den Veränderungen zählt weiterhin ein Rückgang der Verweildauer, die sich in den letzten 20 Jahren annähernd halbiert hat. Aufgrund dessen sank, trotz eines Anstieges der Fallzahlen, auch die durchschnittliche Bettenauslastung. Immer mehr Häuser befinden sich in privater Trägerschaft. Zudem verändert sich das Angebot der Krankenhäuser. Eine größere Spezialisierung einzelner Krankenhäuser ist zu beobachten und Behandlungen werden zunehmend ambulant oder teilstationär durchgeführt. Fallzahlen im psychiatri-

schen Bereich sind in den letzten zwanzig Jahren um über 100 % gestiegen (Destatis, 2012).

Verschiedene Gesundheitsreformen beeinflussten die Krankenhäuser ebenfalls erheblich. Hier ist vor allem die Reform von 2004 zu nennen, in der das Abrechnungssystem verändert wurde, das seither nicht mehr nach Pflegetagen, sondern nach Fallpauschalen erfolgt (Destatis, 2012). Während früher ein Fokus auf der Erfüllung des Versorgungsauftrags lag, wird heute somit die wirtschaftliche Leistungserstellung immer bedeutsamer (Taboga, 2014). So stehen Krankenhäuser zunehmend im Wettbewerb miteinander und es wird für sie fortwährend wichtiger, sich am Markt zu positionieren, die Qualität zu erhalten oder zu steigern und ihre Angebote zu erweitern (Viering und Söhnle, 2010).

Aufgrund dieser Veränderungen sowohl der Rahmenbedingungen im Gesundheitswesen als auch der Veränderungen von Prozessabläufen durch technische Fortschritte sind kontinuierlich Umbaumaßnahmen im Krankenhaus notwendig (Börner-Kleindienst, 2006). Untersuchungs- und Behandlungsbereiche werden vergrößert und für ambulante Behandlungen nutzbar gemacht sowie Bettenanteile verringert, beziehungsweise umgebaut, um Sonderleistungen zu ermöglichen.

Viele Bereiche sind stark reglementiert. Gesetze, Normen, Verordnungen und Richtlinien regeln Ausstattung und Betrieb, sodass ein baulicher und betrieblicher Grundstandard eingehalten wird und dieser somit für verschiedene Krankenhäuser bis zu einem gewissen Grad vergleichbar ist (ÖPP Deutschland AG, 2012). Auch diese Richtlinien sind nicht starr, sondern wandeln sich im Laufe der Zeit. So werden beispielsweise Grenzwerte verändert und Vereinfachungen zugelassen (Leittretter, 2005).

Die Finanzierung von Krankenhäusern erfolgt über ein duales System: Investitionskosten werden von den Bundesländern finanziert, während die laufenden Betriebskosten von den Krankenkassen gedeckt werden. Insgesamt ist die finanzielle Lage in vielen Krankenhäusern als schlecht einzustufen. Selbst wenn laufende Kosten gedeckt werden können, ist häufig die Investitionsfähigkeit sehr gering (Leittretter, 2005; Viering und Söhnle, 2010).

2.2 Bauformen von Krankenhäusern

Die Bauweise eines Gebäudes hat aufgrund des Verhältnisses von Oberfläche zu Volumen (A/V-Verhältnis) und der baulichen Gestaltung der Hüllflächen einen großen Einfluss auf den Energiebedarf. Über die Außenbauteile findet der Wärmeaustausch mit der Umgebung statt, der den Heiz- und Kühlbedarf beeinflusst. Zudem wird über den Anteil der transparenten Bauteile und die Ausgestaltung der Innenräume das Tageslichtangebot bestimmt, welches einen Einfluss auf den Energiebedarf für die künstliche Beleuchtung hat.

Die historische Entwicklung der Krankenhausbauweise hat zu sehr unterschiedlichen Bauformen geführt. Zu Beginn des 20. Jahrhunderts galt der Pavillon-Stil als moderne und richtungsweisende Bauweise. Durch die dezentrale Anordnung einzelner Gebäude innerhalb eines Parkgeländes sollten hygienische Probleme vermieden und die Ausbreitung von Krankheiten verhindert werden. Da davon ausgegangen wurde, dass die von Kranken aufsteigende, kontaminierte Luft zu einer Ansteckungsgefahr in den oberen Stockwerken

führt, waren die Gebäude zumeist einstöckig. Zudem waren die Krankenhäuser häufig an der Stadtgrenze oder außerhalb der Städte angesiedelt (Börner-Kleindienst, 2006; Murken, 2011). Als Nachteile dieser Bauform stellten sich vor allem die langen Transportwege zwischen den einzelnen Gebäuden heraus, sodass ein Übergang zu zentraleren Bauweisen stattfand. Bei dem Trabantensystem wurden mehrere Stationen in einem Gebäude zusammengefasst, sodass ein blockartiger Hauptbau und einzelne autarke Gebäude in Pavillon-Art entstanden. Auch hierbei resultierten jedoch lange Transportwege (Spiegel, 1961). Weitere Bauformen auf dem Weg zur Zentralisierung bestanden im Kammsystem und schließlich im Blockbau. Im Kammsystem wurden die einzelnen, mehrgeschossigen Gebäude über einen Verbindungsgang verbunden, sodass erstmalig Korridorbauten entstanden. Beim Blockbau wurden die Stationen in ein Gebäude gruppiert und in einzelnen, mit einander verbundenen Gebäudetrakten angeordnet. Da die Bauten höher wurden, konnten auf der gleichen Grundfläche mehr Betten untergebracht werden, als dies bei einer dezentralisierten Bauweise der Fall war. Seit den 1960er Jahren werden Krankenhäuser zumeist als Hochhäuser errichtet. Vorteile sind kurze Wege, eine leichtere Installation der Haustechnik und eine Variabilität in der Anordnung der Pflegestationen (Vogler und Hasenpflug, 1951; Murken, 2011).

Grundsätzlich werden durch die hohe technische Ausstattung der Behandlungs- und Untersuchungsbereiche heute weitaus größere Raumflächen von diesen eingenommen; die Pflegebereiche nehmen deutlich kleinere Flächenanteile ein als frühere Krankenhäuser (Holleck, 2007). Trotz der starken Wandlung der Bauformen im Laufe des 20. Jahrhunderts finden sich viele heutige Krankenhäuser, die aus dem Pavillonstil und den darauf folgenden Bauformen hervorgegangen sind. Häufig sind Krankenhäuser gewachsene Gebäude, die innerhalb eines Krankenhauskomplexes Bauteile verschiedenster Baualter und damit auch verschiedener Energieeffizienzstandards vereinen.

2.3 Energieverbrauch in Krankenhäusern

Durch 24-stündige Nutzung einiger Bereiche, die hohen Energiebedarfe einzelner medizinischer Geräte und die vielfältigen Funktionsbereiche, wie Küchen, Sterilisation, OPs, etc., gehören Krankenhäuser zu dem Gebäudetyp mit einem der höchsten flächenspezifischen Energieverbräuche (Hu et al., 2004; Singer et al., 2009).

2.3.1 Energetische Infrastruktur und Verbrauchsanteile

Technische Anlagen versorgen das Krankenhaus mit Wärme, Kälte, Frischluft, Strom, Wasser und Druckluft. Die Anlagen sind Querschnittstechnologien, die in der gleichen Form auch in anderen Gebäudetypen eingesetzt werden. Durch die Größe und die vielfältigen Aufgaben der Krankenhäuser weisen die Versorgungsanlagen und Verbraucher jedoch eine hohe Komplexität und Vielfalt auf. Es müssen die Bedürfnisse von sowohl Patienten als auch Personal und Besuchern berücksichtigt werden. In Krankenhäusern gelten häufig Sonderanforderungen bezüglich Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit. Zum Teil sind Anlagen rund um die Uhr im Betrieb, sodass die Laufzeiten länger sind als in anderen Gebäudetypen (ÖPP Deutschland AG, 2012). Weiterhin sind die geförderten Luftmengen

und Außenluftstraten höher und strenge hygienische Anforderungen müssen eingehalten werden (Singer und Tschudi, 2009).

Wärmeerzeugung

70 bis 80 % des Gesamtenergieeinsatzes werden für die Wärmeerzeugung eingesetzt (Via-medica, 2009). Die erzeugte Wärme wird für die Raumheizung, Trinkwarmwasserbereitung und zum Teil für die Dampferzeugung verwendet. Abnehmer für den Dampf sind Küchen, Sterilisation und Wäschereien. Da jedoch immer weniger Krankenhäuser eigene Wäschereien betreiben und auch Küchen zunehmend ausgelagert werden, nimmt die Bedeutung der Dampferzeugung ab (Tippkötter et al., 2009). Zunehmend wird der Dampf für die verbleibenden Verbraucher dezentral erzeugt.

Die Wärmeerzeugung erfolgt in der Regel über gas- und ölbefeuerte Warmwasserkessel, zum Teil sind in älteren Krankenhäusern auch Dampfkessel im Einsatz (Tippkötter et al., 2009). Bereits 30 % der Krankenhäuser setzen wärmegeführte Blockheizkraftwerke (BHKWs) für die Wärmeerzeugung ein (Blum et al., 2014). 50 % der Krankenhäuser beziehen Fernwärme zur Deckung ihres Wärmebedarfes. Auch regenerative Energiequellen können zur teilweisen Deckung des Wärmebedarfs eingesetzt werden. 4 % der Krankenhäuser haben eine solarthermische Anlage installiert (Blum et al., 2014).

Kälteerzeugung

Kälte wird im Krankenhaus zur Kühlung von Räumen mit hohen Wärmelasten (z.B. Operationssäle, Serverräume) benötigt sowie zur direkten Kühlung einiger medizinischer Geräte. Auch Patientenzimmer und Verwaltungsbereiche werden zunehmend klimatisiert. Weitere Abnehmer sind beispielsweise Sterilisatoren. Zur Entfeuchtung der Zuluft in den raumlufttechnischen Anlagen wird zusätzliche Kälte benötigt (Via-medica, 2009). Die Kälte gelangt über reine Nur-Luft-Anlagen oder Luft-/Wasser-Anlagen (Kühldecken, Umluftkühlgeräte) in die Räume. Die Kälteerzeugung erfolgt zumeist über eine oder mehrere zentrale Kälteanlagen. In der Regel werden Kompressionskältemaschinen eingesetzt, vereinzelt werden auch thermische Kältemaschinen verwendet.

Raumlufttechnik (RLT)

Mit Hilfe von raumlufttechnischen Anlagen werden ausreichende Luftwechselraten gewährleistet, Wärmelasten, Schad- und Geruchsstoffe abgeführt und zudem in sensiblen Bereichen wie Operationssälen und Intensivstationen Keimarmut geschaffen. In den zentralen Luftaufbereitungsgeräten wird die Luft gefiltert, auf die erforderliche Temperatur gekühlt oder erwärmt und unter Umständen zusätzlich be- und entfeuchtet. Dabei müssen je nach Raumnutzung verschiedene Anforderungen eingehalten werden, die für Krankenhäuser durch DIN 1946-4:2005-04 vorgegeben werden. So muss beispielsweise in allen Operationssälen ein Überdruck herrschen, indem die zugeführte Luftmenge die abgeführte Luftmenge übersteigt, eine dreistufige Filterung der Luft vorgenommen und eine Außenluftstrate von mindestens $1200 \text{ m}^3/\text{h}$ eingehalten wird. Für Operationssäle der Raumklasse Ia muss zudem eine turbulenzarme Verdrängungslüftung gewährleistet sein, die besondere Keimarmut in einem begrenzten Schutzbereich gewährleistet.

Elektrische Verbraucher

Die elektrische Energie wird in der Regel aus dem öffentlichen Versorgungsnetz bezogen. In einigen Fällen wird ein Teil der elektrischen Energie vor Ort erzeugt, sei es mittels Kraft-Wärme-Kopplung in Blockheizkraftwerken oder über die Nutzung von Solarenergie. 11 % der Krankenhäuser haben eine Photovoltaik-Anlage auf dem Dach installiert (Blum et al., 2014). Neben der Anlagentechnik mit Pumpen, Ventilatoren und Kompressionskältemaschinen gibt es eine Vielzahl von elektrischen Verbrauchern, von denen einige wichtige im Folgenden genannt werden. Diese können in verschiedenen Krankenhäusern einen unterschiedlichen Anteil am Gesamtstromverbrauch aufweisen (Tabelle 2.1).

Tabelle 2.1: Anteile verschiedener Verbraucher am Stromverbrauch des Krankenhauses

Verbraucher	Anteil Stromverbrauch	Quelle
Beleuchtung	20-30 %	Aspinall, 2004; CEUS, 2006; Jensen und Petersen, 2011
Büroausstattung	2-5 %	Babu, 2010; CEUS, 2006; Singer et al., 2009
med. Geräte	10-36 %	Aspinall, 2004; Hu et al., 2004
Aufzüge	5 %	Beier 2009
ZSVA	4 % ¹	Kah et al., 2013
Küche	12 %	EnCO2de, 2006

¹ Anteil des Primärenergiebedarfes

- Beleuchtung: Durch eine hohe Anzahl innenliegender Räume und die 24-stündige Nutzung einiger Bereiche ist die Beleuchtung rund um die Uhr relevant. Sie muss die Anforderungen sowohl von Patienten als auch Personal und Besuchern erfüllen und gleichzeitig ein visuell angenehmes Umfeld schaffen. Da ein Beleuchtungssystem Emotionen und Gefühle beeinflussen kann, ist dies gerade im Krankenhaus für den Genesungsprozess von hoher Bedeutung (Alzubaidi und Soori, 2012).
- Büroausstattung: Immer mehr Prozesse im Krankenhaus werden durch EDV unterstützt und eine hohe Anzahl an Verwaltungsaufgaben ist notwendig.
- Medizinische und Laborgeräte: Diese umfassen Geräte zur Erkennung, Verhütung, Überwachung, Behandlung oder Linderung von Krankheiten, Verletzungen oder Behinderungen. Die medizinischen Geräte haben sehr unterschiedliche Leistungsbereiche von sehr geringen Leistungen von wenigen Watt bis hin zu medizinischen Großgeräten mit mehreren Kilowatt elektrischer Leistung. 70 bis 90 % des Energieverbrauches des medizinischen Equipments fällt im Standby-Zustand an (Jensen und Petersen, 2011).
- Aufzüge: Während des Betriebes treten hohe Leistungen auf, doch durch die hohen Standby-Anteile von 65 bis 70 % ist auch der Standby-Verbrauch relevant (Beier, 2009). Der Energieverbrauch einer Aufzugsanlage im Bestand ist schwer abzuschätzen, er hängt sowohl von den technischen Details als auch der Nutzung des Aufzuges

ab. Zwischen verschiedenen Aufzugstypen kann der Energieverbrauch um den Faktor drei variieren (Sachs, 2005).

- Druckluftherzeugung: Druckluft wird im Krankenhaus sowohl für medizinische als auch technische Zwecke benötigt (van Heur, 2008). Die Anforderungen an die Bereitstellung der Druckluft sind im Europäischen Arzneibuch festgelegt. Während auch eine Versorgung über Gasflaschen oder Gasmischereinheiten möglich ist, wird die medizinische Druckluft in der Mehrheit der deutschen Krankenhäuser über Kompressoren und eine Druckluftaufbereitungsanlage selbst hergestellt. Um die Ausfallsicherheit zu gewährleisten, sind die Anlagen redundant ausgeführt. Die Aufbereitung der Luft erfolgt über Adsorptionstrocknung oder Kältetrocknung, bei der die Luft auf 5 °C abgekühlt wird. Mit der Adsorptionstrocknung können geringere Grenzwerte bezüglich Wasserdampfgehalt und anderer Gaskomponenten erreicht werden (Beuster und Herbig, 2013).
- Sterilisation: Die Zentrale Sterilgutversorgungsabteilung (ZSVA) ist für die Aufbereitung von Medizinprodukten verantwortlich. Die einzelnen Arbeitsschritte bestehen in dem Vorbereiten, Reinigen, Prüfen, Verpacken und Sterilisieren der Produkte (KRINKO, 2012). Die Vorreinigung kann mechanisch, mit Hilfe von Ultraschall oder Dampfstrahlern erfolgen. Die eigentliche Reinigung geschieht in sogenannten Reinigungs- und Desinfektionsautomaten. Die Sterilisation erfolgt in der Regel über eine Dampfsterilisation im Autoklav. Dies ist der energieintensivste Schritt und benötigt pro Zyklus etwa 10 bis 20 kWh für die Dampfbereitstellung und die Erzeugung eines Vakuums (Goullet, 2008; Gulde, 2013; Kugler, 2013).
- Küche: In der Küche werden sowohl die Mahlzeiten für die Patientenverpflegung zubereitet, als auch in vielen Fällen für eine Personalkantine oder eine öffentlich zugängliche Cafeteria. Zum Teil werden weitere Einrichtungen wie Kindergärten oder Altenheime mit versorgt. Im Durchschnitt stellten die Krankenhäuser im Jahr 2012 pro Tag 276 volle Haupt- und Zwischenmahlzeiten (Beköstigungstage) bereit (Blum und Lehmann, 2014). Energieintensive Prozesse sind das Garen der Lebensmittel, das Spülen von Geschirr und Besteck, sowie Kühlung der Lebensmittel und Belüftung der Küche (HKI, 2011). Pro warmer Mahlzeit werden etwa 1,1 kWh Endenergie inklusive der erforderlichen Haustechnik benötigt (Kah et al., 2013).
- Wäscherei: Hier werden Bettwäsche, Handtücher, OP-Textilien und Berufsbekleidung des Personals desinfizierend gereinigt. Laut Krankenhausbarometer 2013 haben jedoch 80 % der Krankenhäuser die Wäscherei ausgelagert, nur noch in wenigen Krankenhäusern wird demnach überhaupt eine Wäscherei betrieben (Blum et al., 2014). Wäschereien benötigen zum einen eine hohe Menge an Dampf, zum anderen benötigen die Prozesse des Trocknens und Bügelns eine hohe Energiemenge. Hinzu kommt der Energiebedarf für die mechanische Belüftung. (Katsanis und Tsarabaris, 2010) geben einen Energieverbrauch von 1,96 kWh_{th} und 0,09 kWh_{el} pro kg trockener Wäsche an. Pro Pflage tag fallen für ein Beispielkrankenhaus mit 500 Betten 5000 kg Wäsche an (Ackermann, 2012).

2.3.2 Energiekennwerte

In Tabelle 2.2 sind verschiedene Energieverbrauchskennwerte für Krankenhäuser aufgeführt. Es sind jeweils die Mittelwerte verschiedener, in der jeweiligen Quelle erfassten Krankenhäuser angegeben. Innerhalb der einzelnen Vergleichsstudien treten hohe Unterschiede des Energieverbrauches der Krankenhäuser auf. Dafür verantwortlich sind nicht nur unterschiedliche Energieeffizienzstandards, sondern auch die verschiedenen Spezialisierungen und Ausstattungen der Häuser.

Tabelle 2.2: Energieverbrauchskennwerte von Krankenhäusern

Titel des Benchmarks	Wärme		Strom		Quelle
	kWh/m ²	kWh/Bett	kWh/m ²	kWh/Bett	
infas Enermetrics 2008	238	22 932	119	11 358	Tippkötter et al., 2009
Ages 1999		27 629		6781	Ages, 2001
Energieeffizienz- tisch RP	220	17 000	115	8700	Arqum, 2009
Krankenhaus- Barometer'14 ¹	324		105 ² + 39 ³		Blum et al., 2014

¹ keine Witterungs- oder Prozessbereinigung

² Fremdbezug

³ Eigenerzeugung

Eine wichtige Vergleichsstudie ist das Projekt *Energetisches Benchmarking für Krankenhäuser*, welches durch die infas Enermetrics GmbH durchgeführt wird. Seit dem Jahr 2000 werden mit Hilfe einer Fragebogenaktion jährlich die Energieverbräuche von mehreren Hundert Krankenhäusern ausgewertet. Werden die Verbrauchskennwerte getrennt für die einzelnen Größenkategorien der Krankenhäuser betrachtet, so zeigt sich, dass der spezifische Strom- und Wärmeverbrauch mit zunehmender Größe des Krankenhauses zunimmt.

Über die Bilanzjahre 2000 bis 2008 zeigt sich ein Abfall des Wärmeverbrauches pro Nettogrundfläche um etwa 30 %. Der Wärmeverbrauch pro Bett sank ebenfalls über die Jahre, jedoch nur um etwa 7 %. Der Stromverbrauch pro Bett stieg in den Jahren 2000 bis 2008 um 45 % an. Die Stromverbräuche pro Nettogrundfläche weisen hingegen eine starke Streuung über die einzelnen Jahreswerte auf, sodass sich kein einheitlicher Trend feststellen lässt. Weiterhin lässt sich eine Zunahme des Anteils der elektrischen Energie am Gesamtenergieverbrauch der Krankenhäuser von einem Prozentpunkt pro Jahr erkennen. Zukunftsprognosen zeigen, dass sich der Trend des sinkenden Bedarfs an Heizwärme und steigenden Bedarfs an elektrischer und Kühlenergie weiter fortsetzen wird (ECG, 2012). Dies ist durch zunehmende Geräteausstattungen begründet. So ist beispielsweise immer mehr bildgebendes Equipment vorhanden (Singer und Tschudi, 2009). Durch verstärkte elektronische Datensammlung und -verwaltung wird auch die IT-Ausstattung weiter ausgeweitet (Kah et al., 2013).

Schwierigkeiten, die im Rahmen der Erhebung von Energieverbrauchskennwerten auftreten, sind unterschiedliche Flächendefinitionen und abweichende Einbeziehung von Flächen in die Berechnung. Während einige Krankenhäuser Angaben zu Brutto-Flächen machen, verwenden andere Netto-Flächen, einige Krankenhäuser beziehen Labore und Parkflächen ein, andere wiederum nicht (Stymiest, 2010). Einzelne Krankenhäuser weisen energieintensive Bereiche wie Sterilgutversorgung, Küchen und Wäschereien auf, die in anderen Krankenhäusern ausgelagert wurden und somit nicht in den Energiebedarf des Krankenhauses einfließen (Tippkötter et al., 2009). Auch bezüglich der Wetterbedingungen ist eine Normalisierung notwendig, um eine Vergleichbarkeit zu schaffen (Singer, 2009).

Weiterhin sind hauptsächlich Kennzahlen zu den Gesamtenergieverbräuchen der Krankenhäuser verfügbar. Durch die hohen Unterschiede in der Ausstattung der Krankenhäuser sind diese jedoch nur bedingt aussagekräftig. Detaillierte Daten liegen häufig auch in den einzelnen Krankenhäusern nicht vor. „The lack of reliable information about resolved and system-level energy use in hospitals is suggested by many experts as one of the highest-priority needs to advance healthcare energy efficiency effort“ (Singer und Tschudi, 2009).

Daher wurden in Beier (2009) detailliertere Kennwerte, beispielsweise Energieverbräuche und Betriebsparameter von Trinkwarmwassererwärmung, Lüftungsanlagen, Wärmeversorgung und Kältemaschinen, erhoben. Doch auch hier zeigte sich, dass die Energiebedarfe von vielen Faktoren abhängig sind und eine starke Variation zwischen den Krankenhäusern aufweisen, sodass einheitliche Aussagen kaum möglich sind.

2.3.3 Einsparpotenzial

In Krankenhäusern ist häufig ein hohes Energieeinsparpotenzial vorhanden. Die Stiftung viamedica nennt typische Einsparmöglichkeiten von 40 % des Stromverbrauches und 30 % des Wärmebedarfs (Viamedica, 2009). Der VDE ermittelte in einer Studie ein Einsparpotenzial von 40 % der Energie und somit eine mögliche, bundesweite Kostenersparnis von 600 Mio. Euro (VDE, 2011).

Dies ist unter anderem begründet durch die Komplexität der Häuser mit sehr unterschiedlichen Anforderungen an die Konditionierung der einzelnen Bereiche. Die technischen Anlagen müssen zudem hohe Anforderungen bezüglich Hygiene und Zuverlässigkeit erfüllen. Die Einstellung optimaler Betriebsbedingungen stellt das technische Personal somit vor eine Herausforderung. Beim Betrieb der Anlagen werden oftmals Lösungen gewählt, die „funktionieren“, aber nicht notwendigerweise zu energieeffizientem Betrieb führen. Änderungen werden häufig nur vorgenommen, um Beschwerden entgegenzuwirken und Störungen zu beheben. Unwissenheit des technischen Personals über bessere Lösungen führt ebenfalls zu unnötig hohen Verbräuchen (Singer und Tschudi, 2009). Auch die fortwährenden Umbauten und Betriebsänderungen im Krankenhaus tragen zu einer Zunahme der Komplexität bei, da nicht immer nötige Anpassungen am Betrieb der Versorgungsanlagen vorgenommen werden. Die Auslagerung von Serviceeinheiten trägt ebenfalls dazu bei, dass Bedarf und installierte Kapazitäten nicht mehr übereinstimmen und ineffizienter Betrieb resultiert. Laut Energieagentur NRW sind beispielsweise Wärmeerzeugungsanlagen in vielen Krankenhäusern um den Faktor zwei bis drei überdimensioniert (Tippkötter et al., 2009). Weiterhin können die vielen Richtlinien und Verordnungen, die den Betrieb

von Anlagen im Krankenhaus regeln und Grenzwerte für die Konditionierung festlegen, die Energieeffizienz einschränken. Ein Beispiel hierfür ist die Abschaltung der Lüftungsanlagen im OP außerhalb der Nutzungszeit, die zwar in anderen Ländern praktiziert wird, nach deutschen Vorschriften jedoch nicht erlaubt ist (Kluge, 2013).

Die finanzielle Situation führt ebenfalls dazu, dass notwendige Sanierungen nicht durchgeführt werden und veraltete und damit ineffiziente Anlagen in Betrieb bleiben. Oft ist die finanzielle Lage so schlecht, dass selbst Amortisationszeiten von wenigen Jahren zu lang oder zu riskant sind (Singer und Tschudi, 2009). Die Energiekosten machen zudem nur etwa 2.5 % der Gesamtkosten aus und nehmen damit neben anderen Kostenfaktoren wie den Personalkosten einen sehr geringen Stellenwert ein (Destatis, 2015). Die Zusammensetzung der Energiekosten ist in der Regel nicht bekannt. Gespart wird daher bevorzugt in Bereichen, in denen die Kostenzusammensetzung transparenter ist, beispielsweise dem Personalbereich. Auch bei neu installierten Anlagen wird häufig kein Augenmerk auf eine energieeffiziente Auslegung gelegt (Schmitt et al., 2008).

2.3.4 Maßnahmen

Mögliche Einsparmaßnahmen umfassen beispielsweise den Austausch veralteter Anlagentechnik und die Verwendung alternativer Technologien, die Veränderung von Betriebsparametern, die Isolierung von Verteilleitungen und Speichern sowie den Einsatz effizienter Pumpen und Ventilatoren. Die installierten Leistungen sollten an den tatsächlichen Bedarf angepasst werden. Auch auf der Verbraucherseite bietet sich in vielen Bereichen ein Einsparpotenzial, indem effiziente Geräte und Beleuchtung verwendet und diese bei Nichtnutzung ausgeschaltet werden.

Laut Krankenhausbarometer 2014 haben 40 % der Krankenhäuser in den Jahren 2011 bis 2013 größere Investitionen oder Modernisierungsmaßnahmen im Bereich der Energieversorgung getätigt, 50 % planen Investitionen in den nächsten drei Jahren (Blum et al., 2014). In der Regel werden vor allem Standardmaßnahmen, wie etwa die Installation energieeffizienter Beleuchtung, durchgeführt. Andere große Einsparpotenziale wie etwa Sparmaßnahmen in medizinischen Bereichen werden oft nicht realisiert, aus Unwissenheit und weil ungern Maßnahmen auf der Prozessseite durchgeführt werden (Singer und Tschudi, 2009). Bei der Auswahl von Maßnahmen wird sich in der Regel auf Expertenwissen und Erfahrungswerte verlassen. Da dies nicht immer genau ist, ist ein hoher Sicherheitsfaktor nötig und nur sehr sichere Maßnahmen werden durchgeführt (Heo et al., 2012). Rezepte zur Durchführung lassen sich nicht eins zu eins in andere Krankenhäuser übertragen. Neben den technischen Voraussetzungen und dem Einsparpotenzial spielt auch das Engagement der Häuser und der Nutzer eine Rolle (Leittritter, 2005).

Tabelle 2.3 listet Energieeinsparmaßnahmen auf, die in verschiedenen Krankenhäusern im Rahmen von Maßnahmenbündeln umgesetzt wurden. Die Grundgesamtheit der betrachteten Krankenhäuser umfasst 45 Krankenhäuser, von denen jedes eine umfangreiche Sanierung unternommen hat. Die Prozentangabe gibt den Anteil der Krankenhäuser an, die die angegebene Maßnahme als einen Bestandteil ihrer Sanierung umgesetzt haben. Die verwendeten Daten stammen hauptsächlich von Krankenhäusern, die das BUND-Gütesiegel „Energiesparendes Krankenhaus“ erhalten haben. Dieses wird vom BUND an Krankenhäu-

Tabelle 2.3: Energieeinsparmaßnahmen in Krankenhäusern und Anteile der Krankenhäuser, die die jeweilige Maßnahme im Rahmen einer Sanierung umgesetzt haben nach BUND; Gordo et al. (2011); Leittretter (2005)

Maßnahmen im Bereich elektrischer Verbraucher	
Spitzenlastbegrenzung	18 %
Optimierung der Drucklufterzeugung	11 %
Austausch von Küchengeräten	18 %
Optimierung der Dampferzeugung	16 %
Beleuchtung gesamt	76 %
Installation von Präsenzmeldern	33 %
Reduktion der Beleuchtungsleistung	16 %
Installation energieeffizienter Beleuchtung	69 %
Maßnahmen im Bereich der raumlufttechnischen Anlagen	
RLT gesamt	67 %
Austausch von Ventilatoren	38 %
Installation einer Wärmerückgewinnungsanlage	38 %
Bedarfsanpassung von Betriebszeiten und Luftmengen	27 %
Maßnahmen im Bereich der Wärmeversorgung\ -verteilung	
Wärme gesamt	100 %
Erneuerung des Heizkessels	49 %
Einbau eines BHKWs	58 %
Neueinstellung der Anlagenparameter	18 %
Optimierung der Trinkwarmwasserversorgung	32 %
Optimierung der Heizungssteuerung	18 %
Isolation von Rohrleitungen	20 %
Hydraulischer Abgleich	36 %
Austausch von Pumpen	66 %
Einbau/Austausch von Thermostatventilen	11 %
Absenkung der Raumtemperatur	16 %
Maßnahmen im Bereich der Außenhülle	
Außenhülle gesamt	47 %
Sanierung der Fenster	31 %
Dämmung der Fassade	31 %
Dämmung des Daches	22 %
Maßnahmen im Bereich der Kältebereitstellung	
Kälte gesamt	47 %
Austausch von Kältemaschinen	24 %
Nutzung freier Kühlung	11 %
Nutzung adiabater Kühlung	9 %

ser verliehen, die bestimmte Parameter erfüllen (Reduzierung des CO₂-Ausstoßes um 25 %, Energieverbrauch unter den Grenzwerten der VDI-Richtlinie 3807, Implementierung eines Energiemanagements). Auf der Homepage werden die Krankenhäuser und deren durchgeführte Maßnahmenpakete veröffentlicht (BUND). Weitere Daten stammen aus Leittretter (2005) und Gordo et al. (2011) .

Es ist erkennbar, dass Maßnahmen im Bereich der Beleuchtung einen hohen Stellenwert einnehmen, da hier ein hohes Einsparpotenzial vorhanden ist. Zudem ist der Austausch der Leuchtmittel mit wenig Aufwand verbunden und der Einspareffekt zeigt sich deutlich. Weiterhin hat jedes der Krankenhäuser zumindest eine Maßnahme im Bereich der Wärmeerzeugung, -verteilung oder zur Reduktion des Wärmeverbrauchs durchgeführt. Auch die raumlufttechnischen Anlagen, an denen 70 % der Krankenhäuser Optimierungen durchgeführt haben, nehmen einen hohen Stellenwert ein. Maßnahmen, bei denen Sanierungen der Außenbauteile oder eine Optimierung der Kälteversorgung vorgenommen wurden, wurden jeweils in weniger als 50 % der Krankenhäuser durchgeführt.

In 40 % der betrachteten Krankenhäuser werden regenerative Energien als Folge der Sanierungsmaßnahme eingesetzt. Besonders häufig wurden Photovoltaikanlagen installiert (23 % der gesamten Krankenhäuser), aber auch mit Holzhackschnitzeln oder Holzpellets betriebene Kessel (11 %) oder solarthermische Anlagen (9 %) wurden eingesetzt. Ein Großteil der Krankenhäuser hat weiterhin eine Form des Energiemanagements eingesetzt, indem Verbrauchs- und Betriebsdaten erfasst und regelmäßig ausgewertet werden und Zielsetzungen für die Einsparung festgelegt werden.

2.4 Gebäudesimulation

In den folgenden Abschnitten werden die Gebäudesimulation im Allgemeinen und die bisherigen Arbeiten zur Simulation von Krankenhäusern im Besonderen beschrieben.

2.4.1 Chancen und Grenzen der Gebäudesimulation

Gebäude können durch ihre Größe und Komplexität nicht als Prototyp gebaut und getestet werden und in der Regel sind kaum zwei Gebäude gleich. Somit ist die Simulation besonders wichtig, da sie als virtueller Prototyp dienen kann und das Testen von Alternativen ermöglicht (Samuelson et al., 2012). Gerade in modernen Gebäuden ist das Zusammenspiel zwischen Klima, Bewohnern und den technischen Anlagen zudem so komplex, dass das Gebäudeenergieverhalten nur durch Simulation verstanden werden kann (Salvalai et al., 2010). Bei einer Gebäudesimulation wird ein mathematisches Modell erstellt, welches die thermischen Zustände und Energieströme des Gebäudes bestimmt, die sich im Zusammenspiel von Außenklima, Gebäudehülle, Anlagen und Nutzung ergeben. Das Ergebnis sind Zeitreihen thermischer und energetischer Größen (Temperaturen, Wärme-/Kältemengen, elektrische Leistungen) über den betrachteten Zeitraum. Dieser umfasst typischerweise ein Jahr. Die Datenverfügbarkeit und die Modellierungsaufgabe bestimmen die Wahl des Simulationsprogramms und der nötigen Detaillierung.

Die Gebäudesimulation wird in allen Phasen eines Gebäudezyklus angewandt. Unter an-

derem werden die folgenden Zielsetzungen verfolgt:

- Vergleich von architektonischen Alternativen in der frühen Designphase (Maile et al., 2007).
- Identifikation von Ineffizienzen und Energieeinsparoptionen (Ahmad und Culp, 2006). (Bertagnolio et al., 2010).
- Überprüfung der Einhaltung von Standards und Normen (Hong et al., 2000).
- Klassifizierung des Gebäudes in Rating-Systemen (z.B. LEED-Zertifizierung) (Eisenhower et al., 2012b).
- Auswahl von Materialien der Gebäudehülle, mechanischen und elektrischen Systemen, individuellem Equipment sowie Regelungsstrategien, sowohl im Design als auch für Sanierungsmaßnahmen (Hampton, 2011).
- Verständnis der Reaktion komplexer Gebäude auf Veränderungen von Anlagen, Regelungen und Sollwerten (DeBaillie, 2012).

Die nötige Detaillierung des Modells wird von der Zielsetzung bestimmt. Für eine Bestimmung der Energieverbräuche wird ein weniger hoher Detaillierungsgrad benötigt als für das Testen von Regelstrategien (Trčka und Hensen). Je höher die Detaillierung des Modells ist, desto mehr Kenntnisse über das System werden benötigt. Somit nimmt mit zunehmender Genauigkeit zwar der Fehler durch die Abstraktion der Realität ab, jedoch nimmt die Datenunsicherheit zu. Detaillierte Modelle vermitteln durch die Vielzahl der Eingangsdaten ein Gefühl von hoher Aussagekraft und Gültigkeit. Dieses ist in der Realität jedoch nicht in jedem Fall gegeben, da sich durch die vielen Parameter auch mehr Fehlerquellen ergeben (Burhenne et al., 2010b).

Da eine Gebäudesimulation immer eine Vereinfachung der Realität ist, sollten die Ergebnisse mit Vorsicht betrachtet werden. Eine Vielzahl von Faktoren kann zu Abweichungen zwischen Simulation und Realität beitragen (Tabelle 2.4).

Tabelle 2.4: Fehlerquellen in der Gebäudesimulation nach Judkoff et al. (2008) und Trčka und Hensen

interne Fehlerquellen	<ul style="list-style-type: none"> • Abstraktionsfehler: Abweichung zw. mathemat. Modell und Realität • numerische Fehler • Code-Fehler
externe Fehlerquellen	<ul style="list-style-type: none"> • ungenaue Eingangsdaten • gewähltes Modell für Gebäude oder Klima nicht anwendbar • Zeit, Erfahrung und Können des Anwenders

Interne Fehlerquellen hängen von dem verwendeten Modellierungs-Programm ab. Durch die Validierung des Simulationsprogramms können die internen Fehlerquellen reduziert werden. Dabei werden verschiedene Arten der Validierung unterschieden. Bei der analytischen Validierung wird die Lösung des Simulationsprogramms mit einer analytischen

Lösung verglichen, bei der komparativen mit der Lösung eines bereits validierten Vergleichsprogramms und bei der empirischen Validierung mit den Messwerten eines realen Gebäudes. Während die analytische Validierung einen Wahrheitswert als Vergleich hat, muss bei den anderen beiden Methoden beachtet werden, dass die Vergleichswerte selbst fehlerbehaftet sein können. Da nur für wenige Fälle eine analytische Lösung existiert, ist die analytische Validierung lediglich für grundlegende, einfache Komponenten geeignet. Die anderen beiden Methoden eignen sich für komplexere Programme, sind jedoch auch deutlich zeit- und kostenaufwändiger. Je komplexer der Testfall ist, desto schwieriger ist es zudem, die Fehlerursachen zu ermitteln (Witte et al., 2001).

Neben der Genauigkeit des für die Simulation verwendeten Programms hängt die Verlässlichkeit der simulierten Ergebnisse zudem in hohem Maße von der Qualität und Detaillierung der Eingangsdaten ab (externe Fehlerquellen). Das Ergebnis kann immer nur so genau sein, wie die Eingangsdaten dies erlauben (Maile et al., 2007). Gerade bei einem Einsatz der Simulation in der Designphase, wenn viele Nutzungsdaten noch nicht bekannt sind und nicht überprüft werden können, da das Gebäude noch nicht existiert, treten große Unterschiede zum tatsächlichen Verbrauch des Gebäudes auf. Diese Differenz ist bekannt als *Performance Gap* (Daly et al., 2014). Doch auch bei der Simulation von bestehenden Gebäuden treten Fehler auf, wenn ungenaue Annahmen für den Betrieb getroffen werden oder allein nach Auslegungsdokumenten modelliert wird. Ein gutes Verständnis des Betriebes des Gebäudes ist somit wichtig für die Modellierung (Hampton, 2011).

Auch der Nutzer spielt eine große Rolle für die Qualität der Simulationsergebnisse. Durch die vielen Eingangsparameter können sich unbemerkte Eingabefehler einschleichen oder die Daten werden von unterschiedlichen Nutzern abweichend interpretiert. In einer Studie durch Guyon (1997) wurde dies anschaulich demonstriert. Zwölf Anwender bekamen die gleiche Gebäudedokumentation zur Verfügung gestellt und simulierten mit demselben Programm dasselbe Gebäude. Dennoch wichen die Einzelergebnisse des jährlichen Energieverbrauchs um bis zu 40 % von dem Durchschnittswert aller Simulationen ab.

Dennoch sind menschliche Entscheidungen trotz der Rechenleistung von Computern immer noch wichtig bei der Simulation. Viele komplexe Systeme und Probleme können nicht von Computeralgorithmen erfasst werden. Wissen über Thermodynamik, Gebäudephysik, den Designprozess und interdisziplinäres Wissen über die verschiedenen Gebäudesysteme und auch die verwendete Software sind unerlässlich (CBC, 2011). Es ist oftmals schwer zu erkennen, ob die Ergebnisse sinnvoll und richtig sind. Selbst wenn das Programm keine Fehlerwarnungen ausgibt, können die Ergebnisse falsch sein und der Nutzer muss diese basierend auf seiner Erfahrung auswerten (Hong et al., 2000).

Zusammenfassend lässt sich mit den Worten von Hampton über die Gebäudesimulation sagen: „Done well, it can drive and improve the efficiency of a building. Done poorly, it is not only a waste of time and money but can also lead to poor design decisions and a substandard solution“ (Hampton, 2011).

2.4.2 Modellierung von Gebäuden in der Betriebsphase

Die Modellierung von Gebäuden in der Betriebsphase bietet einige Besonderheiten verglichen mit der Simulation in der Designphase. Bei dem Vergleich von architektonischen und frühen Design-Alternativen sind ungenaue Angaben weniger gravierend, wenn die verschiedenen Alternativen jeweils die gleichen fehlerhaften Angaben nutzen (Maile et al., 2007). Für bestehende Gebäude, die realistisch abgebildet werden sollen, um Einsparmaßnahmen zu bewerten, ist es jedoch wichtig, dass simulierte Energieflüsse den realen entsprechen. Bei einer Simulation bestehender Gebäude in der Betriebsphase wird in der Regel ein umfassendes Audit des Gebäudes durchgeführt, um die nötigen Eingangsparameter zu erheben. Viele Daten können jedoch nicht oder nur mit hohem Aufwand bestimmt werden. Zu diesen gehören beispielsweise Infiltrationsraten oder Nutzungsdaten. Bei der Simulation von bestehenden Gebäuden, bei denen reale Verbrauchsdaten des Gebäudes vorliegen, sollte demnach immer eine Kalibrierung des Modells auf das tatsächliche Gebäude stattfinden. Der zulässige Fehler nach der Kalibrierung hängt von der Fragestellung ab, die mit dem Modell beantwortet werden soll.

Grundsätzlich ergibt sich eine Schwierigkeit, da der Verbrauch des realen Gebäudes alle fehlerhaften Betriebsweisen sowie die Unwägbarkeiten des Nutzerverhaltens beinhaltet. Durch die Simulation wird der ideale Bedarf des Gebäudes berechnet. Über die Kalibrierung wird der berechnete Bedarf so angepasst, dass er dem realen Verbrauch entspricht.

Da ein hoher Aufwand betrieben werden muss, um das Modell auf das bestehende Gebäude zu kalibrieren, lohnt sich die Durchführung einer Gebäudesimulation nur, wenn umfassende Maßnahmen geplant sind. Für Verbesserungen einzelner Anlagen sind der Aufwand und die Kosten für eine Simulation zu hoch (Hampton, 2011).

2.4.3 Modellierung von Krankenhäusern

Krankenhäuser weisen dieselben Eigenschaften und Probleme auf wie andere Gebäudetypen. Dennoch gibt es einige Punkte, in denen Krankenhäuser von anderen Gebäuden abweichen. Während beispielsweise in Büro- oder Verwaltungsgebäuden die Nutzungsspezifika über die Fläche wenig variieren, weisen Krankenhäuser eine große Inhomogenität der Nutzungsflächen auf, mit der sich auch die entsprechenden baulichen und technischen Ausstattungen verändern (ÖPP Deutschland AG, 2012). Die Räume reichen von Betenzimmern, die rund um die Uhr in Nutzung sind, jedoch wenig Lasten aufweisen und in der Regel mechanisch belüftet sind, über Büroräume bis hin zu Operationssälen mit einer hohen Ausstattung an Geräten und hohen Ansprüchen an die Hygiene und einer aufwändigen Anlagentechnik. Weiterhin sind verschiedene medizinische und auch technische Großverbraucher sowie Servicebereiche wie Küchen, Wäschereien, Sterilisation und Labore abzubilden. Dementsprechend variieren auch die energetischen Eigenschaften und Verbräuche der einzelnen Bereiche stark, sodass eine hohe Zonenanzahl des Modells nötig ist. Auch das Gebäude ist häufig sehr inhomogen, indem einzelne Anbauten aus sehr verschiedenen Bauzeiträumen stammen und somit stark variierende Energieeffizienzstandards aufweisen. Durch krankenhausspezifische Geräte und die besondere Nutzung treten Abweichungen in den inneren Lasten im Vergleich zu anderen Gebäuden auf. Nutzungsprofile

können somit nicht uneingeschränkt übernommen werden. Während für die Simulation von Bürogebäuden viele Untersuchungen durchgeführt wurden und somit Standardwerte existieren, liegen diese Standardwerte für die Nutzung für Krankenhäuser nicht vor.

Die im Krankenhaus verwendeten technischen Anlagen sind Querschnittstechnologien und somit dieselben wie in anderen Gebäudetypen. Durch hohe hygienische Anforderungen, eine hohe geforderte Zuverlässigkeit und zum Teil höhere Laufzeiten ergeben sich dennoch Unterschiede zu den Anlagen anderer Gebäudetypen.

Bisher wurden Krankenhäuser vor allem im technischen Rahmen untersucht und es liegen viele technische Maßnahmenkataloge zu Krankenhäusern vor. Akademische Studien zu Krankenhäusern und auch Simulationen von Krankenhäusern wurden jedoch nur in geringem Umfang durchgeführt.

Im Rahmen des EU ICT Policy Support Programms wurde das Excel-basierte Werkzeug *HosPilot* entwickelt. Das Modell des Krankenhauses wird dabei aus einzelnen Raumtypen, für die Lastprofile vordefiniert sind, aufgebaut. Die Berechnung basiert auf einfachen Gradtags-Beziehungen. Ziel war die Entwicklung eines schnell anwendbaren Werkzeuges zur Identifikation von Einsparmaßnahmen (Čongradac et al., 2012).

In einem ähnlichen Ansatz wurden durch Martini et al. (2007) an der Universidad Nacional de La Plata in Argentinien einzelne energetisch relevante Module eines Krankenhauses identifiziert. Ein Modul entspricht beispielsweise einem Bettzimmer. Für jedes der Module wurden Typologiecharts für typische, reale und energetisch optimierte Module entwickelt. Die thermischen Verbräuche werden für jedes Modul aus einer statischen Energiebilanz mit Gradtagen berechnet, elektrische Verbräuche über die Geräte- und Beleuchtungsnutzung. Die Module werden zu Gesamtkrankenhäusern aggregiert, die wiederum als Baustein des gesamten Gesundheitsnetzwerkes dienen. Über den Vergleich zwischen realen und theoretischen Energieverbräuchen werden Energieeinsparpotenziale deutlich.

In einigen Arbeiten wurden nur einzelne Räume oder Stationen eines Krankenhauses simuliert. Ozyogurtcu et al. (2011) simulierten Operationssäle und verschiedene Konfigurationen der zugehörigen raumlufttechnischen Anlagen für verschiedene türkische Standorte. Adamu et al. (2012) simulierten ein einzelnes Bettzimmer, um Strategien zur natürlichen Belüftung zu bewerten. Esmaeili et al. (2011) simulierten eine einzelne Radiologiestation und verglichen die berechneten Energieverbräuche mit anderen Berechnungsmethoden. In dem Projekt *Design and Delivery of Robust Hospital Environments in a Changing Climate* der Universität Cambridge wurden Strategien gegen die Überhitzung von Pflegestationen in Krankenhäusern bei durch den Klimawandel erhöhten Außentemperaturen untersucht. Dazu wurden unter anderem dynamische Simulationen einzelner Räume oder Stationen durchgeführt (Giridharan et al., 2013; Lomas und Giridharan, 2012).

Das US Department of Energy hat eine Serie von Referenzgebäuden in dem Programm *EnergyPlus* modelliert, die 80 % der kommerziellen Gebäudetypen in den USA abdecken. Diese *commercial reference building models* sollen zur Bewertung von neuen Technologien und zur Optimierung von Design, Regelungen, Beleuchtung, Raumlufttechnik und Luftqualität verwendet werden (Deru et al., 2011). Eines der Modelle ist das eines Krankenhauses. Dieses bildet kein konkretes, real existierendes Krankenhaus ab, sondern soll

ein Referenzgebäude mit typischen Layouts und Ausstattungen nachbilden. Das Krankenhaus mit einer Fläche von 22 422 m² und 5 Stockwerken wurde in EnergyPlus mit 55 Zonen modelliert (Ng et al., 2013).

Pagliarini et al. (2012) simulierten ein Krankenhaus in Italien, um ein Kraft-Wärme-Kälte-System für dieses auszulegen. Da diese Anlage nur einen Teil des Krankenhauses versorgen soll, wurde auch nur dieser Teil simuliert. Es handelte sich dabei um sechs Gebäude mit einer Gesamtfläche von knapp 94 000 m². Die Simulation erfolgte mit *TRNSYS*. Dabei wurden zwischen 9 und 32 Zonen pro Gebäude angenommen. Die elektrischen Lasten wurden aufgrund von Messungen des Gesamtkrankenhauses berechnet und eine einheitliche elektrische Leistung pro Quadratmeter für alle Gebäude angenommen. Der Heiz- und Kühlbedarf wurde über das Modell berechnet und darüber eine energetische, exergetische und ökonomische Analyse für verschiedene Varianten der Kraft-Wärme(-Kälte)-Kopplung durchgeführt.

Ascione et al. (2013) beschäftigten sich mit Energieeinsparungen in Krankenhäusern durch Sanierung der Fassade. Dazu simulierten sie ein Krankenhaus mit 10 000 m² Fläche als Modell mit 38 Zonen mit der Software *EnergyPlus*. Zur Definition der inneren Lasten der jeweiligen Zonen wurden keine Angaben gemacht, stattdessen wurden der Aufbau der Gebäudehülle und verschiedene Anlagenkonfigurationen für die Heizung, Kühlung und Belüftung des Gebäudes detaillierter beschrieben. Der thermische und elektrische Energiebedarf wurde jeweils für die verschiedenen Anlagenkonfigurationen und die bestehende und eine optimierte Gebäudehülle berechnet. Gleichzeitig wurde der Einfluss auf das Innenklima bestimmt.

Khodakarami et al. (2009) führten ebenfalls eine Analyse der Gebäudehülle für ein iranisches Krankenhaus durch. Das Krankenhaus, welches aus zwei einstöckigen Gebäuden mit einer Gesamtfläche von 2239 m² besteht, wurde mit einer zonalen Auflösung von 38 Zonen in dem Programm *HTB2* simuliert. Neben der Geometrie, den Wandaufbauten und den Sollwerten der Innenraumtemperaturen wurden keine Angaben zu verwendeten Eingangsdaten gemacht. Heiz- und Kühlbedarf werden für einzelne Zonen abhängig von verschiedenen Konfigurationen der Außenwand berechnet.

Buonomano et al. (2014) simulierten vier Gebäude eines italienischen Krankenhauses mit dem Ziel, Einsparmaßnahmen zu simulieren. Diese Einsparmaßnahmen wurden zuvor durch das Krankenhausmanagement ausgewählt. Zudem wurde eine Analyse des thermischen Komforts durchgeführt. Ein Schwerpunkt lag auf den technischen Anlagen. Zur Bestimmung der Betriebsparameter wurde ein umfangreiches Audit durchgeführt. Angaben zur Wahl der inneren Lasten wurden nicht gemacht. Eine Kalibrierung fand nicht statt, lediglich ein Abgleich mit punktuellen Messungen wurde durchgeführt.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass zwar Simulationen von Krankenhäusern vorgenommen wurden, jedoch sind diese entweder stark vereinfacht und beziehen sich ausschließlich auf Teilaspekte, wie die detaillierte Simulation nur einzelner Räume. Die zonale Auflösung ist zumeist gering und es wurden keine Angaben zur Datenherkunft und Annahmen der Eingangsdaten gegeben. Zudem sind die durchgeführten Simulationen in der Regel ein Werkzeug, um eine bestimmte Fragestellung zu beantworten. Eine umfassende,

simulationsbasierte Analyse der Energieverbräuche und der Zusammenhänge wurde bisher nicht vorgenommen.

2.5 Fazit

Da Krankenhäuser häufig ein hohes Energieeinsparpotenzial aufweisen, welches in der Regel mit den bestehenden Methoden nicht voll ausgeschöpft wird, besteht ein Bedarf an wissenschaftlichen Untersuchungen von Krankenhäusern, um die Verbrauchsstrukturen zu analysieren und Einsparpotenziale identifizieren zu können. Weiterhin fehlen Vergleichsmöglichkeiten, um den Energieverbrauch eines einzelnen Krankenhauses einordnen zu können. Die Nutzung von Energiekennwerten führt dabei nicht zu dem gewünschten Erfolg, da diese die Komplexität und die vielen Einflussfaktoren in Krankenhäusern nicht adäquat wiedergeben und sich somit eine breite Spanne der Kennzahlwerte ergibt.

Eine Möglichkeit, den Energieverbrauch und dessen Einflussfaktoren zu untersuchen, besteht in der Durchführung von energetischen Gebäudesimulationen. Simulative Untersuchungen für Krankenhäuser wurden jedoch bisher nur für Teilbereiche oder für sehr spezifische Fragestellungen durchgeführt. Somit sind keine Erfahrungswerte für die Simulation der Besonderheiten von Krankenhäusern und insbesondere auch keine Vergleichswerte vorhanden.

Somit soll in dieser Arbeit die Forschungsfrage untersucht werden, inwieweit Krankenhäuser mit den bisherigen Ansätzen und mit vorhandenen Informationen simulativ abgebildet werden können. Können diese Ansätze nicht oder nur teilweise auf Krankenhäuser angewandt werden, bzw. fehlen Informationen, so werden weitergehende Untersuchungen durchgeführt, offene Fragen beantwortet und Vorgehensweisen für die Simulation von Krankenhäusern sowie Eingangsdaten abgeleitet.

Dies geschieht, indem anhand einer Fallstudie eine messdatengestützte Simulation eines konkreten Krankenhauses durchgeführt wird und die erarbeiteten Vorgehensweisen dieser Fallstudie, wenn möglich, auf allgemeine Krankenhäuser abstrahiert werden.

Kapitel 3

Modellierungsumgebung und Modellierungsgegenstand

Die in dieser Arbeit durchgeführte Fallstudie umfasst die Modellierung und Simulation des Krankenhauses Huysens-Stiftung der Kliniken Essen-Mitte. Ziel der Simulation ist es, die jährlichen Energieverbräuche und deren Einflussfaktoren zu bestimmen. Im ersten Teil des Kapitels wird die verwendete Modellbibliothek beschrieben und im zweiten Teil das untersuchte Krankenhaus vorgestellt.

3.1 Modellierungsumgebung

Die Simulationen in der vorliegenden Arbeit wurden mit Hilfe einer selbst entwickelten Modelica-Bibliothek in der Simulationsumgebung Dymola durchgeführt. Die Bibliothek enthält Modelle zur Simulation von Gebäuden und wurde im Rahmen des Forschungsprojekts *Hospital Engineering* entwickelt. Die Vorteile der Verwendung einer eigenen Bibliothek liegen in der genauen Kenntnis der zugrundeliegenden Annahmen und der Möglichkeit, den Detailgrad genau an die Anforderungen anzupassen. Die im Rahmen dieser Arbeit gewonnenen Erkenntnisse über die Vorgehensweise zur Simulation von Krankenhäusern gelten jedoch programmunabhängig und können auch mit anderer Gebäudesimulationssoftware umgesetzt werden.

3.1.1 Modelica

Modelica ist eine objektorientierte, gleichungsbasierte Modellierungssprache. Bei der objektorientierten Modellierung werden Daten und Funktionen in Klassen zusammengefasst. Dadurch werden eine Wiederverwendbarkeit und eine bessere Verständlichkeit des Codes erreicht. Die Objektorientierung vereinfacht die hierarchische Strukturierung des Modells und verringert somit die Komplexität der Modelle. Neue Module können auch nachträglich noch problemlos implementiert werden. Durch die Gleichungsbasiertheit und Objektorientierung wird eine natürlichere Repräsentation von Systemen erlaubt (Wetter, 2011).

Modelica ist ein frei verfügbarer Sprachstandard, der von der Modelica Association entwickelt wird. Diese gibt außerdem die Modelica Standardbibliothek heraus, die grundlegende, vordefinierte Modelle für eine Vielzahl von Anwendungen enthält (Modelica). Verschiedene weitere Bibliotheken für unterschiedliche Bereiche werden von Nutzern angeboten und sind zum Teil frei, zum Teil kommerziell verfügbar. Zur Anwendung von Modelica wird

eine Simulationsumgebung benötigt. In dieser Arbeit wird Dymola in der Version 2013 FD01 verwendet (Dymola). Diese bietet eine grafische Benutzeroberfläche zur Erstellung der Modelle und einen Übersetzer für Modelica.

In den letzten Jahren wurde Modelica zunehmend für die Simulation von Gebäuden verwendet (Burhenne et al., 2013). Die objektorientierte Modellierung mit ihrer hierarchischen Struktur ist für die Abbildung von Gebäuden gut geeignet, da Gebäude von sich aus sehr hierarchisch strukturierte Objekte sind, die sich in einzelne Ebenen (z. B. Raum, Etage und Gesamtgebäude) unterteilen lassen. Die Gebäudeelemente der geringeren Ebenen haben einen grundlegenden Charakter und können damit häufig wiederverwendet werden (Nytsch-Geusen und Bartsch, 2001).

3.1.2 Grundlegende Prinzipien der Bibliothek

Die in der Bibliothek enthaltenen Modelle stellen einen Grundstock an Bausteinen dar, mit deren Hilfe die energetischen Vorgänge in einem Gebäude mathematisch abgebildet werden können. Die Bibliothek kann fortwährend erweitert und um weitere Komponenten, beispielsweise Regelungsmodule oder Anlagentypen ergänzt werden.

Die Zielsetzung, für die die Bibliothek konzipiert wurde, ist die energetische Abbildung von bestehenden Gebäuden. Ein Fokus liegt auf der Definition unterschiedlicher Raumlastprofile, aus denen die Verbraucherseite modular aufgebaut werden kann. Im Gegensatz zu bestehenden Modelica-Bibliotheken zur Gebäudesimulation erfolgt die Simulation der Anlagentechnik und der Wärme- und Kälteverteilung im Gebäude rein energetisch. Rohrleitungen, Lüftungskanäle, Heizkörper, Wärme-/Kälteerzeuger und Speicher werden nicht detailliert hydraulisch abgebildet und auch die Temperatur der Verteilung nicht berechnet. Bei einem solch komplexen Gebäude wie dem eines Krankenhauses würde eine detaillierte hydraulische Berechnung zu einer langen Rechenzeit und Schwierigkeiten bei der Initialisierung führen. Stattdessen wird von der Anlagentechnik jeweils direkt die Wärme-/Kältemenge bereitgestellt, die in den Zonen benötigt wird. Verteilverluste werden über Faktoren berücksichtigt.

Die Bibliothek enthält sowohl Modelle für die Modellierung der Verbrauchsseite (thermische Zonen) als auch der technischen Anlagen des Krankenhauses (raumluftechnische Anlagen, Kältemaschinen und Wärmeversorgung). In den Zonenmodellen wird die thermische Bilanz der Zone berechnet, in die sowohl die Abwärme der inneren Lasten, als auch die Wärmeübertragung von und zur Umgebung eingeht. Außerdem werden die elektrischen Verbräuche jeder Zone erfasst.

Eine Validierung der Zonenmodelle erfolgte über die von der International Energy Agency entwickelten Testfälle des Building Energy Simulation Test (BESTest) (Judkoff und Neymark, 1995). Die Anlagenmodelle wurden über den Vergleich mit Messdaten validiert (siehe UMSICHT, 2017).

3.1.3 Aufbau der Bibliothek

Der Aufbau der Bibliothek ist in Abbildung 3.1 dargestellt. Die Modelle wurden grundlegend in Verbrauchermodelle und Modelle zur Abbildung der Anlagentechnik unterteilt.

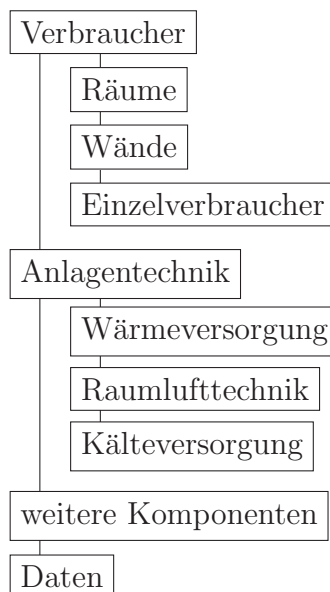


Abbildung 3.1: Aufbau der Modelica-Bibliothek

Die Verbrauchermodelle enthalten Modelle für die thermischen Zonen. In diesen wird die thermische Bilanz der Zone berechnet, in die sowohl die Abwärme der inneren Lasten als auch die Wärmeübertragung von und zu der Umgebung eingeht. Außerdem werden die elektrischen Verbräuche jeder Zone erfasst. Weiterhin enthält der Ordner weitere Verbraucher, die nicht den thermischen Zonen zugeordnet werden. Der Unterordner *Wände* enthält Modelle für Zwischenwände, über die der thermische Austausch zwischen den Zonen berechnet wird, bzw. Modelle für Dächer und Böden.

Zu den Modellen für die technischen Anlagen des Krankenhauses gehören Modelle für Lüftungsanlagen, Kältemaschinen und die Wärmeversorgung. Zu den weiteren Komponenten zählen beispielsweise ein Wetterdatenmodell, Schnittstellenmodelle und Modelle zum Erfassen der Energieströme. Im Ordner *Daten* sind die bauphysikalischen Daten der Außenbauteile sowie die Nutzerdaten der einzelnen Raumtypen hinterlegt.

3.1.4 Anwendung der Bibliothek

In der Anwendung wird das Krankenhaus auf der grafischen Benutzeroberfläche aus den verschiedenen vordefinierten Untermodellen zusammengesetzt. So werden die einzelnen Zonen parametrisiert und zu Abteilungen aggregiert, die wiederum zu Etagen und Gebäuden zusammengesetzt und mit den entsprechenden Anlagenmodellen verknüpft werden. Für jede Zone kann ausgewählt werden, zu welchem Raumtyp diese zählt. Für die Lastverläufe der inneren Lasten sind Kurven hinterlegt, die entsprechend dem gewählten Raumtyp als innere Lasten dieser Zone gewählt werden. Wetterdaten werden über externe Textdateien in das Modell eingelesen.

Da sehr viele Parameter für die thermischen Zonen festgelegt wurden, wurde eine Excel-Anwendung entwickelt, mit deren Hilfe die Untermodelle jeweils für eine Abteilung zusammengestellt und parametrisiert werden können.

3.1.5 Modellierung des Gebäudes

Thermische Zonen

Innerhalb jeder thermischen Zone liegt eine einheitliche Temperatur T_{Zone} vor, die sich aus der folgenden thermischen Bilanz berechnet:

$$m c_p \frac{dT_{Zone}}{dt} = \dot{Q}_{IL} + \dot{Q}_{Umg} + \dot{Q}_{Inf} + \dot{Q}_{RLT} + \dot{Q}_{Heiz/Kühl} \quad (3.1)$$

Der Wärmeaustausch mit der Umgebung \dot{Q}_{Umg} geschieht über Wände, Fenster, Dächer und Böden. Weiterhin wird dem Raum über Infiltration und Lüftung Außenluft zugeführt, die als Wärmegewinn oder -verlust \dot{Q}_{Inf} in die Modellierung eingeht. Die inneren Lasten \dot{Q}_{IL} bestehen aus den Wärmegewinnen durch Personen, Geräte und Beleuchtung. Die elektrische Leistung von Geräten und Beleuchtung wird dem Raum im Modell vollständig als Wärme zugeführt. Die dem Raum über die raumlufttechnische Anlage zu- oder abgeführte Wärme \dot{Q}_{RLT} geht ebenfalls in die Bilanz der Zone ein. Der Zuluftvolumenstrom wird in der Zone spezifiziert. Die Temperatur der Zuluft hingegen wird in dem separaten Untermodell der raumlufttechnischen Anlage festgelegt. Die über das Heiz-/Kühlsystem zugeführte Wärmemenge $\dot{Q}_{Heiz/Kühl}$ wird über einen Regler so angepasst, dass die über einen Parameter festgelegte Mindest-/Maximaltemperatur der Zone nicht über- bzw. unterschritten wird.

Neben der thermischen Bilanz wird eine Strahlungsbilanz gelöst. Diese wird vereinfacht nach dem Zweisternmodell von Feist modelliert (Feist, 1994):

$$0 = \dot{Q}_{Str,IL} + \dot{Q}_{Str,Wände} + \dot{Q}_{Str,Fenster} \quad (3.2)$$

Der Strahlungswärmeaustausch zwischen den Oberflächen erfolgt bei diesem Ansatz indem ein fiktiver, den Raum ausfüllender schwarzer Körper angenommen wird, der die von allen Flächen abgegebene Wärme absorbiert, bevor er sie wieder abgibt. Ein Strahlungsknoten stellt als masseloses Element die Verknüpfung der Strahlungsschnittstellen des langwelligen Strahlungsaustausches der einzelnen Bauteile dar. Hier wird außerdem die langwellige Solarstrahlung, die durch das Fenster in den Raum tritt, eingespeist und auf die einzelnen Wände verteilt.

Wärmeübertragung über opake Flächen Im Untermodell *Außenwand* wird der Wärmedurchgang durch die Außenwand über Wärmeleitung und Konvektion, die Wärmespeicherung innerhalb der Wand, der innere Strahlungswärmeaustausch mit den übrigen Bauteilen im Raum sowie der Strahlungswärmeaustausch mit der Umgebung berechnet. Weiterhin werden Wärmegewinne durch auf die Außenwand auftreffende direkte und diffuse Solarstrahlung berechnet.

Analog zu den Außenwänden wird in den Innenwänden die Konvektion und die Wärmeleitung an der Wand berücksichtigt. In dem Modell werden alle symmetrisch belasteten

Innenwände zusammengefasst, so dass nur die halbe Wand mit den raumseitigen Wärmeströmen im Modell berücksichtigt wird.

Wärmeübertragung über transparente Flächen Die Wärmeübertragung über die Fenster wird über den U- und g-Wert modelliert. Trifft die Strahlung mit einem Winkel ungleich 90° auf die Scheiben, so wird die winkelabhängige Reduktion des g-Wertes über das Profil für klares Glas nach Karlsson et al. (2001) berechnet. Die Strahlungswärmegevinne werden anteilig auf den Strahlungsknoten, den Raumlufknoten und, für den Anteil der transmittierten direkten Strahlung, auf die Innenwände der übrigen Flächen im Raum aufgeteilt. Der Faktor kann frei gewählt werden.

Verschattung Die Verschattung durch externe Hindernisse wie Bäume oder andere Gebäude wird in einer externen Anwendung berechnet und über eine Textdatei in das Modell eingelesen.

Wärmeübertragung über das Erdreich Die Berechnung der Wärmeübertragung über das Erdreich erfolgt nach dem Verfahren in DIN 13370:2008-08. Dazu werden alle Schichten der Bodenplatte zusammen mit dem Erdreich bis 0,5 m Tiefe modelliert und um eine virtuelle Schicht ergänzt. Die virtuelle Schicht wird so gewählt, dass sich der korrekte jährlich durchschnittliche Wärmestrom ergibt. Am Boden der virtuellen Schicht liegt die virtuelle Temperatur θ_v vor, die jeweils für einen Kalendermonat einen festen Wert annimmt.

Infiltration und manuelle Lüftung Für die Infiltration wird ein konstanter Wert q_{Inf} in Abhängigkeit der Außenwandfläche A_{AW} der jeweiligen Zone eingeführt, sowie ein zusätzlicher, nutzungsabhängiger Term für die Lüftung durch Fensteröffnung.

Wärmeübertragung zwischen den Zonen

Bis zu einer Temperaturdifferenz von 4 K ist eine Vernachlässigung der Wärmeübertragung zwischen benachbarten Zonen nach DIN 18599-2:2011-12 zulässig. Bei einer höheren Temperaturdifferenz oder einem zusätzlich auftretenden Luftaustausch zwischen den Räumen wird das Modell *Zwischenwand* verwendet, über das der thermische Austausch zwischen den Räumen berechnet wird. Dieses wird auf der gleichen Ebene wie das aggregierte Raummodell eingefügt.

3.1.6 Modellierung der Anlagentechnik

Die in der Bibliothek hinterlegten Modelle sind nicht geeignet für eine detaillierte Analyse der Anlagen. Stattdessen sollen sie als robuste Modelle den Energieverbrauch der Anlagen realitätsnah wiedergeben und mithilfe von Datenblattinformationen parametrisierbar sein.

Raumluftechnische Anlagen

Das Modell zur Abbildung von raumluftechnischen Anlagen wird gemäß der Konfiguration der realen Anlage aus Untermodellen für Ventilatoren, Kühler, Erwärmer, Befeuchter und Wärmerückgewinnungsanlagen aggregiert. Der Luftvolumenstrom tritt als Außenluft in die Komponente ein und dessen Eigenschaften Temperatur, Volumenstrom, Was-

serbeladung sowie aufgewendete elektrische und thermische Energiemengen werden von Komponente zu Komponente weitergegeben und gegebenenfalls durch die Komponenten verändert. Die Volumenströme von Zu- und Abluft können sowohl im Raum definiert und über Konnektoren an die Anlage übermittelt werden, als auch im Anlagenmodell direkt, ohne Verbindung zum restlichen Modell, festgelegt werden. Durch die zweitgenannte Variante kann eine raumluftechnische Anlage einzeln simuliert werden, ohne dass ein Verbrauchermodell erstellt werden muss. Zur Regelung sind zum einen eine Zuluftregelung, bei der eine konstante oder auch zeitlich veränderliche Zulufttemperatur vorgegeben wird, zum anderen eine Abluftregelung, bei der eine bestimmte Temperatur der aus den Räumen austretenden Abluft eingehalten werden soll, implementiert.

Kälteerzeugung

Der Modellteil Kälteerzeugung besteht aus den Untermodellen Kältemaschine, Kältespeicher und Rückkühlung. Der Kältespeicher repräsentiert einen tatsächlich vorhandenen Speicher oder, falls kein Kältespeicher vorhanden ist, den Volumeninhalt der Verteilleitungen. Der Energieinhalt des Speichers bestimmt sich aus einer Bilanz des Kältebedarfes des Gebäudes, der erzeugten Kälteleistung und den Abstrahlverlusten an die Umgebung. Aus dem Energieinhalt lässt sich wiederum die aktuelle Speichertemperatur bestimmen. Die Regelung der Kältemaschine erfolgt nach der Speichertemperatur. Steigt oder sinkt diese zu stark über/unter die Soll-Kaltwassertemperatur, so werden Verdichterstufen hinzu- oder abgeschaltet, bzw. die Kältemaschine an- oder ausgeschaltet.

Im Modell sind verschiedene Rückkühlwerktypen hinterlegt, da diese jeweils unterschiedliche Eigenschaften aufweisen. In den Untermodellen wird die Soll-Rückkühltemperatur vorgegeben sowie der elektrische Energiebedarf für die Kühlung und die erzeugte Kälteleistung bestimmt.

Wärmeerzeugung

Die Modelle aus dem Bereich der Wärmeerzeugung umfassen die Wärmeerzeugertypen Gaskessel und BHKW sowie das Modell eines Pufferspeichers. Der Energieaufwand für die Wärmeerzeugung des Kessels wird nach einer vorgegebenen Wirkungsgradkennlinie in Abhängigkeit der Rücklauftemperatur und der Kesselleistung berechnet.

Im Modell des BHKWs wird eine Zweipunktregelung angenommen, bei der zwischen dem An-/Auszustand des BHKWs hin- und hergeschaltet wird. Die elektrische Leistung, Brennstoffleistung und Heizleistung für den jeweiligen Betriebszustand werden dabei als Parameter vorgegeben. Die Regelung erfolgt nach dem Füllstand des Pufferspeichers.

Wärmeverteilung

Da in den Wärmeerzeugermodellen nur Energieströme betrachtet werden, Temperaturen jedoch benötigt werden, um die Verluste in der Wärmeerzeugung zu berechnen, werden diese aus einer vorgebbaren Heizkurve in Abhängigkeit der Außentemperatur berechnet. Die Verluste der Wärmeverteilung sind von der Länge und der Wärmedurchgangszahl der Leitung abhängig. Die Länge der Leitung wird nach DIN 18599-5:2011-12 in Abhängigkeit der Verteilungsart, Raumnutzungsart und der Gebäudeflächen errechnet.

3.1.7 Modellierung der Wetterdaten

In das Modell können Wetterdaten aus verschiedenen Quellen (beispielsweise eigene Messungen oder Testreferenzjahre) eingelesen werden. Aus den eingelesenen Daten werden die Anteile der Direkt- und Diffusstrahlung auf vertikale Wände in West-, Ost-, Nord- und Südrichtung sowie die Himmels- bzw. Umgebungstemperatur bestimmt. Wurde auf eigene Messwerte zurückgegriffen, so stand nur die Globalstrahlung als Eingangswert zu Verfügung. Daraus wird über ein empirisches Modell der jeweilige Anteil der Diffus- und Direktstrahlung berechnet.

3.2 Überblick über das Krankenhaus

Die Grundsteinlegung für das erste evangelische Krankenhaus Essens, die Huyssens-Stiftung, geschah 1853 aus den Mitteln einer Schenkung des ehemaligen Essener Oberbürgermeisters Heinrich Arnold Huyssen. Nach mehreren Um- und Anbauten erwies sich der bisherige, direkt am Essener Hauptbahnhof gelegene Standort als zu klein und die Belastung der Kranken durch das zunehmende Verkehrsaufkommen als zu hoch. Somit wurde in den Jahren 1934-1936 ein kompletter Neubau am heutigen Standort des Krankenhauses unternommen. Das Gebäude wurde als dreiflügler Bau in Stahlskelettbauweise erbaut und wies eine für die damalige Zeit sehr moderne Anordnung und Ausstattung auf. Die Krankenbetten waren auf der Südseite des Gebäudes angeordnet, während die nördlichen Räume Wohn-, Wirtschafts-, Verwaltungs- und Untersuchungsräume enthielten. 1975 wurde das Krankenhaus in eine freigemeinnützige Gesellschaft mit beschränkter Haftung umgewandelt. Im Jahre 1995 erfolgte die Fusion mit dem Essener Knappschaftskrankenhaus. Beide Krankenhäuser führen seitdem den gemeinsamen Namen Kliniken Essen-Mitte führen (Hinze, 2004).

Der Grundriss des Krankenhauses in seiner heutigen Form ist in Abbildung 3.2 dargestellt.

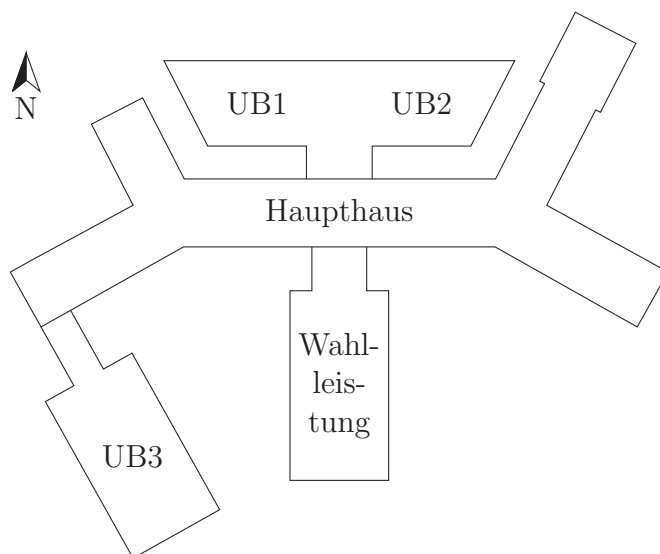


Abbildung 3.2: Grundriss des Krankenhauses

Der Bau von 1936 ist als Haupthaus des Krankenhauses bis heute erhalten. Ende der 80er Jahre wurden die zuvor vorhandenen Balkone zurückgebaut und stattdessen Bäder in die Patientenzimmer eingebaut. Zu Beginn der 90er Jahre wurden Anbauten an den Flügelspitzen des Haupthauses vorgenommen. In den Jahren 2001 bis 2006 wurde das Krankenhaus um die Untersuchungs- und Behandlungstrakte UB1 und UB2 erweitert, in denen die Intensivstation, die Operationsbereiche, die Cafeteria sowie ambulante Stationen untergebracht sind. Weitere Anbauten erfolgten in den Jahren 2010 bis 2011, mit dem Bau eines Wahlleistungsgebäudes und dem Bau des Untersuchungs- und Behandlungstraktes 3 (UB3). Heute verfügt das Krankenhaus über 500 Betten und 11 Fachabteilungen.

3.2.1 Energieversorgung und Energieverbrauch

Seit dem Neubau der Energiezentrale im Jahr 2011 wird die Grundlast der Wärmeversorgung der einzelnen Krankenhausgebäude durch ein zentrales wärmegeführtes Blockheizkraftwerk mit $357 \text{ kW}_{\text{el}}$ und $529 \text{ kW}_{\text{th}}$ bereitgestellt. Sieben Gas-Brennwertkessel mit jeweils 531 kW decken die Spitzenlast des Wärmebedarfs ab. Diese sind so dimensioniert, dass sie auch für einen geplanten Ausbau des Krankenhauses in den kommenden Jahren genügend Wärmeleistung bereitstellen können.

Der Großteil der Flächen des Haupthauses ist manuell belüftet, während die neueren Gebäude über eine mechanische Belüftung verfügen. Insgesamt versorgen über 20 Lüftungsanlagen die einzelnen Bereiche des Krankenhauses. Bei den meisten Anlagen handelt es sich um Teil-Klimaanlagen, bei denen eine Erwärmung und Kühlung der Luft, jedoch keine Be- oder Entfeuchtung durchgeführt wird. Eine volle Klimatisierung findet lediglich in den OP-Bereichen und teilweise in der Radiologie statt. Bei den Lüftungsanlagen handelt es sich entweder um Anlagen mit konstantem Volumenstrom oder zweistufig geführte Anlagen. Für die Kühlung der Zuluft in den RLT-Anlagen wird Kälte benötigt. Zudem werden in dem Wahlleistungsgebäude und dem Behandlungstrakt 3 einige Räume direkt über Kühldecken bzw. Umluftkühlgeräte gekühlt. Auch das MRT benötigt eine direkte Kühlung. Diese Kälte wird über vier Kompressionskältemaschinen erzeugt. Weitere, dezentral im Krankenhaus verteilte Splitgeräte erzeugen lokal Kälte, um eine Überhitzung einzelner Räume zu vermeiden.

Im Jahr 2014 wurden witterungsbereinigt 300 kWh/m^2 Wärme und 120 kWh/m^2 elektrischer Energie verbraucht. Damit hat das Krankenhaus einen durchschnittlichen Stromverbrauch, jedoch einen überdurchschnittlichen Wärmeverbrauch im Vergleich mit den Kennwerten nach infas Enermetrics (vgl. Tabelle 2.2).

3.2.2 Beschreibung einzelner Stationen

Im Folgenden werden einige relevante Bereiche des Krankenhauses, die in den nachfolgenden Kapiteln modelliert und simuliert werden, im Detail beschrieben. Tabelle 3.1 gibt eine Übersicht, welche Bereiche des Krankenhauses in welchem Kapitel untersucht werden und über die daran durchgeführten Untersuchungen.

Tabelle 3.1: Übersicht der simulativen Untersuchungen der Gebäudeteile in den Kapiteln

	Kapitel	Untersuchung
einzelne Stationen des Haupthauses	4	Detaillierung der Zonierung
	6	Sensitivitätsanalyse
Wahlleistungs- gebäude	4	Detaillierung der Zonierung
	6	Sensitivitätsanalyse
	7	Kalibrierung mit Messdaten
	8	Berechnung vordefinierter Einsparmaßnahmen
Untersuchungs- und Behandlungstrakt 3	7	Kalibrierung mit Messdaten
	8	Bestimmung von Betriebsparametern
OP-Station	4	Detaillierung der Zonierung
	6	Sensitivitätsanalyse

Haupthaus

Das Haupthaus, welches das älteste Gebäude des Krankenhauses ist, beherbergt neben der Küche, der Zentralsterilisation sowie einigen ambulanten Stationen hauptsächlich Bürotrakte und vor allem Pflegestationen. Die Pflegestationen nehmen etwa die Hälfte der Fläche des Gebäudes ein. Abgesehen von wenigen einzelnen Funktionsbereichen ist das Gebäude mechanisch belüftet. Als typischer Blockbau besteht das Haupthaus aus einem Mittelbau in Ost-West-Richtung mit Flügeln in Nord-Ost, Nord-West, Süd-West und Süd-Ost-Richtung. Eine Nord- und Südfassade des Gebäudes sind in Abbildung 3.3 dargestellt.



Abbildung 3.3: links: sanierte Südfassade, rechts: unsanierte Nordfassade des Haupthauses

Die zumeist außenliegenden Räume sind entlang eines innenliegenden Flures angeordnet. Abbildung 3.4 zeigt exemplarisch den Grundriss des Süd-Ost-Flügels im ersten Obergeschoss, in dem eine chirurgische Pflegestation untergebracht ist. Eine ähnliche Anordnung

der Räume ist in allen Bereichen des Haupthauses zu finden. Die Patientenzimmer sind auch heute noch zum großen Teil an der Südfassade der Gebäude angeordnet.

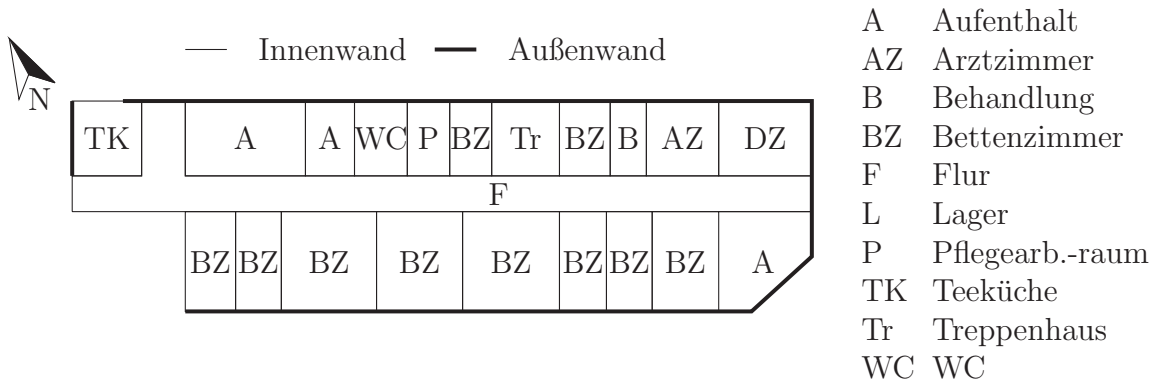


Abbildung 3.4: Grundriss der ersten Etage des Süd-Ost-Flügels des Haupthauses

Wahlleistungsgebäude

Das Wahlleistungsgebäude ist ein in den Jahren 2010 bis 2011 errichtetes Gebäude, das auf drei Etagen Pflegestationen enthält (Abbildung 3.5).



Abbildung 3.5: Westansicht des Wahlleistungsgebäudes

Im Kellergeschoss sind Technik- und Lüftungszentrale sowie Lagerräume untergebracht. Die oberste Etage grenzt an ein Flachdach. Während die Räume im Haupthaus manuell belüftet sind, wird dieses Gebäude zudem mechanisch belüftet. Die drei Etagen sind vom Grundriss identisch aufgebaut und werden auch gleich genutzt. Das Gebäude enthält vor allem Bettzimmer, die den Großteil der außenliegenden Räume ausmachen. Weitere Räume sind Flure, Behandlungsräume, Teeküchen, Dienstzimmer, Funktionsräume und Aufenthaltsbereiche. Im Vergleich zu den Bettzimmern im Altbau weisen die Wahlleistungszimmer und Aufenthaltsräume eine höhere gerätetechnische Ausstattung auf. Im Gegensatz zum Haupthaus, bei dem außenliegende Räume entlang eines Korridors angeordnet sind, enthält das Gebäude eine größere Anzahl innenliegender Räume und weist somit eine andere Laststruktur auf. Der Grundriss einer Etage ist in Abbildung 3.6 dargestellt.

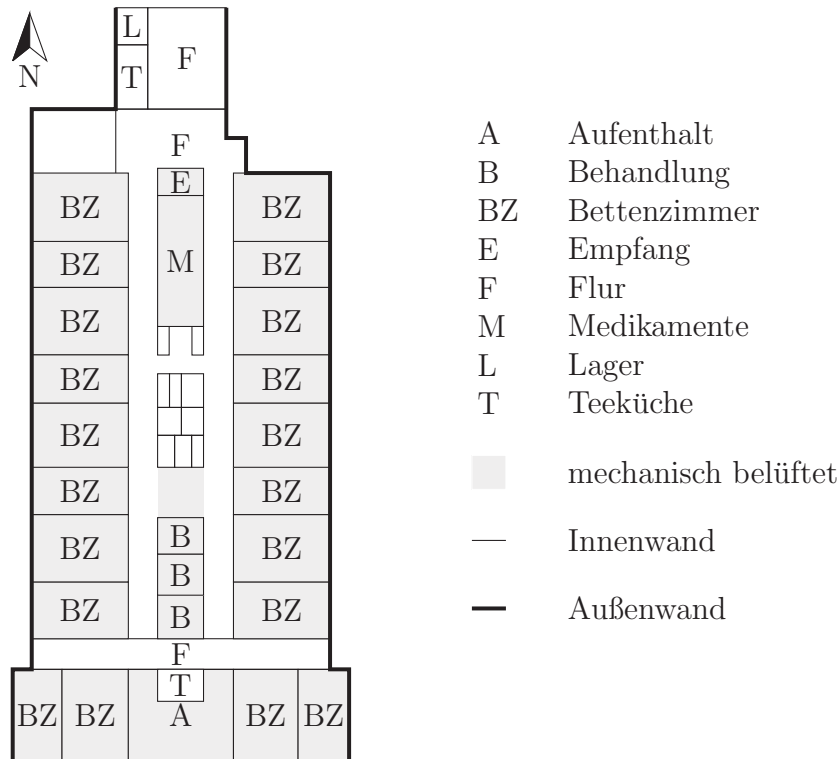


Abbildung 3.6: Grundriss einer Pflegestation des Wahlleistungsgebäudes

Das Gebäude wird über eine Lüftungsanlage mit Frischluft mit einer konstanten Temperatur von $16\text{ }^{\circ}\text{C}$ versorgt. Die Bettzimmer und die Aufenthaltsbereiche werden zusätzlich über Kühldecken gekühlt. Ab einer Außentemperatur von $16\text{ }^{\circ}\text{C}$ stellt die Kältemaschine Kälte für die Lüftungsanlage und die Kühldecken bereit. Alle Räume verfügen über eine statische Heizung. Die Fenster sind mit Kontakten ausgestattet, die einen Betrieb der Heizkörper und Kühldecken bei geöffnetem Fenster verhindern.

Gebäude UB3

Im Untersuchungs- und Behandlungstrakt 3 ist ein ambulantes Brustkrebszentrum untergebracht. Auf den drei Etagen befinden sich hauptsächlich Behandlungs-, Büro- und Warteräume. Viele der Behandlungsräume enthalten energieintensive Behandlungsgeräte, wie Ultraschall- oder Röntengeräte. Im Kellergeschoss befinden sich zudem ein MRT und ein PET/CT als medizinische Großgeräte. Das Gebäude wird über mehrere raumluftechnische Anlagen mit Frischluft versorgt. Eine abluftgeregelter Anlage (Anlage Innenliegende Räume) versorgt die innenliegenden Räume im Erdgeschoss und ersten Obergeschoss. Eine weitere zentrale Anlage stellt Zuluft mit einer konstanten Temperatur bereit, die dann in drei nachgeschalteten Anlagen bei Bedarf nacherhitzt und auf den Raum mit dem MRT (Anlage MRT), dem PET/CT (Anlage CT) und die übrigen innenliegenden Räume (Anlage Radiologie) im Kellergeschoss verteilt wird. Einzelne Räume werden zudem über Umluftkühlgeräte (ULK) gekühlt.

OP-Stationen

Das Krankenhaus verfügt über 11 Operationssäle. Drei davon sind als urologische OPs im Haupthaus untergebracht, während sich die anderen neun in den neueren Untersuchungs- und Behandlungstrakten befinden. Die OP-Säle 1, 2, 3 und 4 sowie die OP-Säle 6, 7, 8, 9 mit den zugehörigen Nebenräumen bilden jeweils eine Station, eine weitere Station enthält OP-Saal 5. Die Nebenräume der OP-Säle 1-4 sowie des Saals 5 werden von einer gemeinsa-

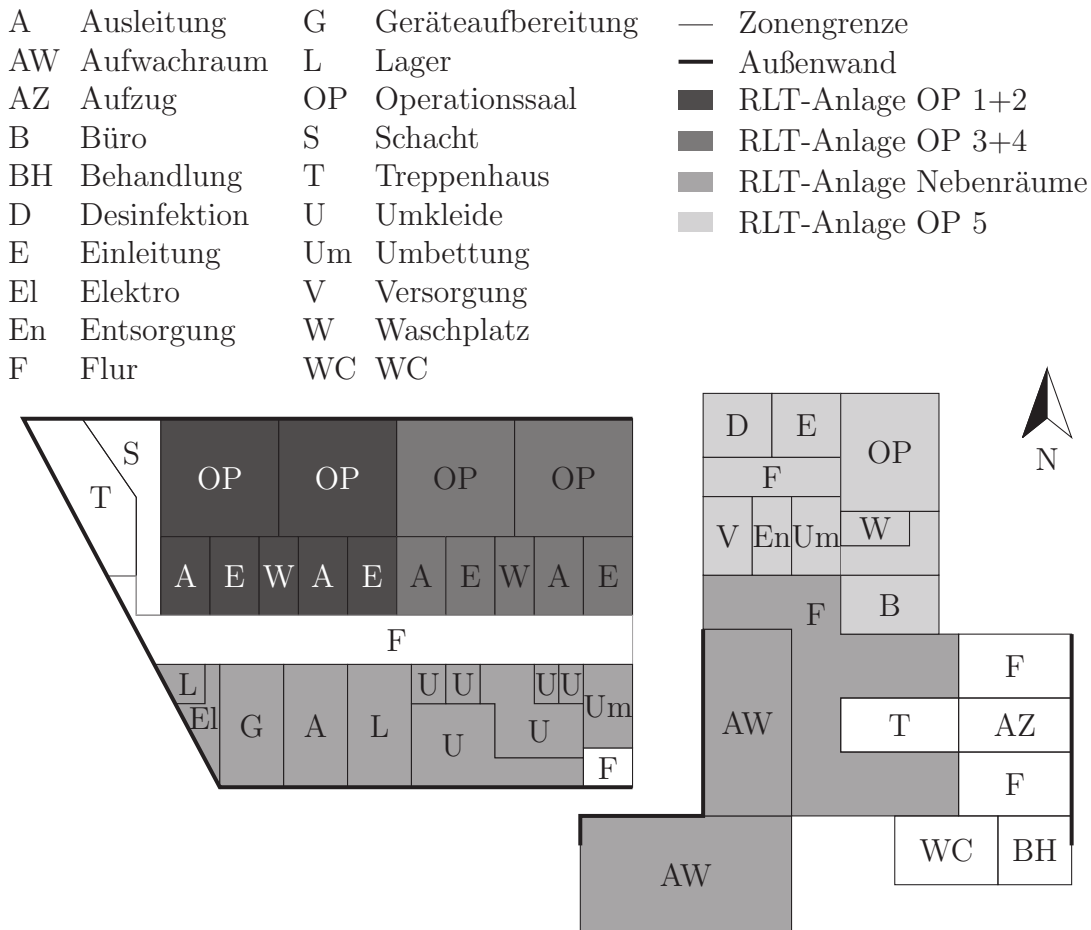


Abbildung 3.7: Grundriss der beiden OP-Stationen

men raumlufttechnischen Anlage versorgt, sodass diese fünf OP-Säle in den nachfolgenden Kapiteln gemeinsam betrachtet und als Beispiel für eine OP-Station verwendet werden. Abbildung 3.7 zeigt den Grundriss der Station um die OP-Säle 1-4 und die Station des OP-Saals 5. Über eine Farbcodierung ist gekennzeichnet, von welcher raumlufttechnischen Anlage der jeweilige Raum konditioniert wird.

Kapitel 4

Zonierung

Die Zonierung des Modells ist eine der ersten Entscheidungen, die bezüglich der Modellierung eines Gebäudes getroffen wird. Sie hat eine hohe Relevanz für die Genauigkeit der Ergebnisse und ist eine wichtige Abwägung zwischen der Detaillierung des Modells und dem Arbeitsaufwand. Da Krankenhäuser Bereiche mit stark variierenden Lasten aufweisen, erscheint eine detaillierte Zonierungsstrategie als notwendig. Dies führt jedoch zu einer hohen Zonenzahl und einem dementsprechend hohen Rechenaufwand. Somit wird in diesem Kapitel die Frage beantwortet, unter welchen Randbedingungen welche Zonenzahl für das Ziel der Bestimmung von jährlichen Energieverbräuchen in Krankenhäusern notwendig ist. Dazu werden überprüft, wie vollständig der aktuelle Wissensstand zu diesem Thema ist und ob sich dieser auf Krankenhäuser übertragen lässt. Anschließend werden eigene Untersuchungen zum Einfluss der Zonierung in verschiedenen Krankenhausbereichen durchgeführt.

4.1 Hintergrund zur Zonierung

Bei der Zonierung wird ein Gebäude in thermische Zonen unterteilt. Eine Zone beschreibt ein Luftvolumen einheitlicher Temperatur, welches durch Wärmeübertragungsflächen begrenzt wird (DOE, 2013). Die korrekte Definition der thermischen Zonen ist eine Herausforderung, da diese die Simulationsergebnisse in hohem Maße beeinflusst. Die Verwendung einer höheren Anzahl von Zonen ist die konservativere Herangehensweise, die zu genaueren Ergebnissen führt (O'Brien et al., 2011). Eine hohe Auflösung erhöht jedoch die nötige Rechenleistung und den Arbeitsaufwand und damit auch die Fehleranfälligkeit (Zhu, 2006).

Die Übertragung von thermischer Energie über die Zonengrenzen hebt die scharfe Trennung der einzelnen Zonen durch die Zonierung teilweise wieder auf. Die Wärmeübertragung erfolgt aufgrund der Temperaturunterschiede benachbarter Zonen durch Wärmeleitung über die physikalischen Zonengrenzen und durch Luftaustausch zwischen den Zonen. Dieser Luftaustausch entsteht durch Turbulenzen, Temperaturunterschiede zwischen den Zonen, Luftbewegungen durch die Bewegung von Personen und Druckunterschiede durch mechanische Belüftung. (Foord und Lidwell, 1975).

Wohngebäude werden häufig als Ein-Zonen-Modell abgebildet (O'Brien et al., 2011). Diese Vereinfachung ist bei komplexeren Gebäuden nicht gerechtfertigt. Ein Grund dafür ist, dass in komplexen Gebäuden häufig gegenläufige Heiz- und Kühllasten auftreten. Wird das Gebäude als eine Zone modelliert, heben sich diese auf und führen somit zu feh-

lerhaften Ergebnissen. Weiterhin wirken sich solare Gewinne in einem Ein-Zonen-Modell fälschlicherweise auf die gesamte Gebäudeluft aus, anstatt nur auf die außenliegenden Zonen (O'Brien et al., 2011). Zudem ist eine genaue Repräsentation der inneren Lasten nur in einer detaillierteren Zonierung möglich. Auch für die Simulation von Energieeinsparmaßnahmen ist ein ausreichend genauer Grundriss erforderlich (Raftery et al., 2011b).

4.1.1 Vorgehen bei der Zonierung

Thermische Zonen müssen nicht mit geometrischen Zonen übereinstimmen. Häufig können mehrere architektonische Zonen zu einer thermischen Zone zusammengefasst oder, bei sehr großen Räumen, eine architektonische in mehrere thermische Zonen aufgeteilt werden (Maile et al., 2007). Auch müssen Zonen nicht aus physikalisch zusammenhängenden Flächen bestehen, sondern die Flächen können an verschiedenen Stellen im Gebäude platziert sein (Raftery, 2011).

Klassischerweise wird ein Stockwerk in fünf Zonen unterteilt: eine Außenzone für jede Himmelsrichtung und eine Zone für die innenliegenden Räume. Verschiedene Autoren (Wilde und Tian, 2010; Raftery, 2011) argumentieren jedoch, dass aus den oben genannten Gründen eine genauere Zonierung nach weiteren Kriterien nötig ist. Nach Raftery (2011) und der DIN 18599-1:2011-12 sind dabei die folgenden Kriterien relevant für die Auswahl der Zonentypen:

- Nur Flächen mit gleichartigen Lasten durch Beleuchtung, Geräte und Personen sollten zu einer Zone zusammengefasst werden.
- Die Flächen einer Zone sollten die gleiche Anzahl und Orientierung der Außenwände aufweisen.
- Eine Zone sollte von einer Anlage versorgt und überall nach den gleichen Sollwerten geregelt werden.
- Liegen detaillierte Messungen zum Energieverbrauch einer Fläche vor, ist es vorteilhaft, diese als getrennte Zone zu modellieren, um die Messwerte im Rahmen einer Kalibrierung mit den simulierten Werten vergleichen zu können.
- die Außenflächen einer Zone sollten einen vergleichbaren Verglasungsanteil aufweisen

Treffen diese Kriterien auf eine Fläche zu, so kann diese als einzelne Zone definiert werden. Andernfalls sollte eine weitere Untergliederung in einzelne Zonen erfolgen.

De Souza und Alsaadani (2012) schlagen abweichende Kriterien für die Zuordnung von Gebäudeflächen zu thermischen Zonen vor. Sie modellierten eine Etage eines Bürogebäudes in verschiedenen Zonierungsvarianten. Die Simulation der gröber zonierten Modelle führte zu einer geringeren Heizlast und einer erhöhten Kühllast im Vergleich zu dem detailliertesten Modell. Eine Analyse der Temperaturen in den einzelnen Räumen zeigte, dass das thermische Verhalten der Räume vor allem durch eine Kombination der Grundfläche, der Fensterfläche und der inneren Lasten bestimmt wird. Somit schlussfolgern die Autoren, dass eine relevantere Zonierungsmethode nicht die Zuordnung der Flächen zu den Zonen allein nach Himmelsrichtungen, sondern nach dem Verhältnis der Fensterflächen zur

Grundfläche in Kombination mit den inneren Lasten ist.

Entstehen nach den genannten Kriterien sehr kleine Zonen, können diese nach DIN 18599-1:2011-12 aufgrund von Geringfügigkeit anderen Zonen mit gleicher Art der Konditionierung und ähnlichen Lasten zugeschlagen werden, wenn die kleine Zone weniger als 5 % der Gebäudefläche einnimmt. Zonen mit abweichender Art der technischen Konditionierung dürfen nur zu einem Anteil von bis zu 1 % der Fläche anderen Zonen zugeschlagen werden.

4.1.2 Anzahl der Zonen

Je nach gewählter Zonierungsstrategie entstehen Modelle mit unterschiedlichen Anzahlen an thermischen Zonen. Häufig wird in Veröffentlichungen zur Gebäudesimulation keine Angabe zur verwendeten Zonenzahl gemacht. Einige ausgewählte Gebäudesimulationsmodelle aus der Literatur, für die die Zonenzahl genannt wurde, sind in Tabelle 4.1 aufgelistet. Es treten große Unterschiede bei der Anzahl der verwendeten Zonen auf. Pro 1000 m² Gebäudefläche wurden 0,3 bis 30 Zonen gebildet. Diese Ergebnisse zeigen, dass je nach Zielsetzung und Gebäude eine unterschiedliche Zonierung gewählt werden kann und eine genaue Abwägung der nötigen Detaillierung für den jeweiligen Fall notwendig ist.

Tabelle 4.1: Gewählte Zonenzahlen bei der Simulation bestehender Gebäude

Gebäudetyp	Fläche in m ²	Stock- werke	Zonen- zahl	Quelle
Bürogebäude	19500		5	Burhenne et al., 2010a
Bürogebäude	10087	3	10	Reddy et al., 2007b
Bürogebäude	1000	2	22	Maile, 2010
Bürogebäude	6430	2	30	Eisenhower et al., 2012a
Krankenhaus	10000	7	38	Ascione et al., 2013
Bürogebäude	30000	4	106	Raftery et al., 2011a
Schulgebäude	11000		339	Knight et al., 2007
Forschung	15000	3	513	Maile, 2010
Gefängnis	350000	10	1007	Maile, 2010

Eine Reihe von Veröffentlichungen beschäftigt sich mit der gezielten Analyse der nötigen Zonenzahlen für eine Gebäudemodellierung. In der Regel wurde dabei dasselbe Gebäude mit einer variierenden Detaillierung der Zonierung simuliert und der Einfluss der Zonierung auf die Ergebnisse betrachtet. Auch hier zeigen sich sehr unterschiedliche Ergebnisse.

Wilde und Tian (2010) konnten zeigen, dass eine detaillierte Zonierung nur für die Bestimmung der Überhitzungsstunden nötig war. Der Energieverbrauch zeigte nur eine geringe Abweichung, wenn das Modell mit einer wenig detaillierten statt einer detaillierten Zonierung berechnet wurde. In einer Untersuchung durch Rivalin et al. (2014) wies die Modellierung mit einem Ein-Zonen-Modell im Vergleich zum detailliertesten 49-Zonen-Modell eine Abweichung der Heiz- und Kühlenergie von 6 % und 11 % auf. Das nächstdetaillierteste Modell hatte 11 Zonen und nur noch eine Abweichung von 1 %. Eine weitere Erhöhung der Zonenzahl zeigte nur noch eine geringfügige Veränderung der Ergebnisse. Ein ähnliches

Ergebnis konnten Georgescu et al. (2012) zeigen: Wurde die Zonenanzahl von der detailliertesten Variante auf 30 % der maximalen Zonenanzahl reduziert, so lag die Abweichung der Heiz- und Kühlenergie unterhalb eines Prozents. Erst bei einer Modellierung mit 5 % der ursprünglichen Zonenanzahl wurde eine Abweichung der Energiemenge von über 10 % beobachtet.

Die Untersuchungen durch Raftery et al. (2011a) und O'Brien et al. (2011) hingegen lassen darauf schließen, dass eine hohe Detaillierung der Zonierung nötig ist, da in diesen Fällen hohe Unterschiede der berechneten Energiemengen auftraten, die zudem die Kalibrierung des Modells, bzw. Entscheidungen, die auf Basis der Modelle getroffen wurden, beeinflussten.

4.1.3 Fazit

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass keine eindeutige Zonierungsstrategie aus den bisherigen Untersuchungen ableitbar ist. Die Ergebnisse stimmen lediglich insofern überein, dass eine Modellierung als Ein-Zonen-Modell zu ungenauen Ergebnissen führt. Einige Studien kommen zu dem Ergebnis, dass eine klassische Zonierung nach Himmelsrichtungen ausreichend ist und die berechneten Energiemengen keinen großen Unterschied aufweisen, unabhängig ob diese mit einem Modell mit einer hohen oder geringen Zonenanzahl berechnet wurden. In anderen Studien hingegen zeigte sich ein signifikanter Einfluss der Detaillierung auf die Energiemengen, sodass in diesen Fällen eine Trennung der Zonen streng nach Nutzung, Konditionierung und solaren Lasten unerlässlich ist.

In den einzelnen Untersuchungen wurden jeweils andere Gebäudetypen mit unterschiedlichen Konfigurationen untersucht, was die sehr verschiedenen Schlussfolgerungen erklärt. Eine vergleichende Analyse des Einflusses verschiedener Gebäudekonfigurationen auf das Ergebnis existiert jedoch nicht.

Krankenhäuser weisen stark unterschiedliche Gebäudebereiche mit sehr unterschiedlichen Laststrukturen auf. Zudem sind in einem Krankenhaus häufig verschiedene Gebäudeteile mit unterschiedlichen Baualtern vereint. Durch diese unterschiedlichen Gebäudekonfigurationen ist es besonders wichtig, zu wissen, welche Bereiche mit welcher Zonierung modelliert werden sollten. Eine sichere Annahme wäre es, eine hohe Detaillierung zu wählen, da somit eine genaue Berechnung der Energiemengen möglich ist. Da Krankenhäuser in der Regel große Gebäude sind, würde dies insgesamt zu einer sehr hohen Zonenanzahl führen und als Folge die Rechenzeit stark erhöhen. Somit ist es von besonderem Interesse, zu ermitteln, welcher Mindest-Detaillierungsgrad nötig ist, um ein Krankenhaus zu modellieren. Aus den bisherigen Untersuchungen zu diesem Thema lässt sich diese Fragestellung jedoch nicht beantworten. Daher werden im folgenden Abschnitt eigene Untersuchungen zur Zonierung von Krankenhäusern durchgeführt, um die nötige Zonenanzahl zu bestimmen.

4.2 Eigene Untersuchungen zur Zonierung

Im Rahmen der Fallstudie wird untersucht, welche Detaillierung der Zonierung nötig ist, um die Energieverbräuche eines Krankenhauses zu berechnen. Weiterhin soll bestimmt

werden, ob unterschiedliche Baualtersklassen oder Laststrukturen andere Anforderungen an die nötige Detaillierung der Zonierung stellen. Dazu wurden verschiedene Bereiche des Krankenhauses mit unterschiedlichen Zonierungsstrategien modelliert und der Einfluss auf die Simulationsergebnisse betrachtet. Das Vorgehen und die Ergebnisse werden im Folgenden vorgestellt.

4.2.1 Erstellte Zonierungen

Für die Zonierungsuntersuchungen wurden eine Etage des Haupthauses, das Wahlleistungsgebäude sowie ein OP-Bereich ausgewählt, um eine Kombination unterschiedlicher Gebäudelayouts, Baustandards, Konditionierungsarten und innerer Lasten zu erhalten (siehe Tabelle 4.2).

Tabelle 4.2: Eigenschaften der für die Zonierungsuntersuchungen ausgewählten Gebäude

Bereich	Nutzung	Anordnung	Baualter	Belüftung
1. Etage Haupt- haus	Bürotrakt, Bet- tenstationen	hauptsächlich außenliegende Räume	1936	natürlich belüftet
Wahlleistungs- gebäude	Bettenstationen	innen- und außenliegende Räume	2011	mechanisch belüftet
OP-Säle	OP-Stationen	hauptsächlich innenliegende Räume	2001	mechanisch belüftet

Um den Einfluss verschiedener Zonierungsstrategien auf den Energiebedarf zu untersuchen, wurden von jedem Bereich vier unterschiedlich detaillierte Zonierungen erstellt:

- **Zonierung d1:** In der detaillierten Zonierung wurde jedem Raum eine eigene Zone zugewiesen.
- **Zonierung d2:** In der Zonierung mittlerer Detailtiefe wurden die Räume gemäß ihrer Lage, Orientierung, Konditionierung und Nutzung gruppiert.
- **Zonierung d3:** Bei dieser klassischen Zonierung wurden alle innenliegenden Räume zu einer Zone aggregiert und außenliegende Räume gemäß ihrer Himmelsrichtung zusammengefasst. Im Regelfall resultierten somit fünf Zonen. Wird ein Bereich von mehreren RLT-Anlagen versorgt, wurden die Zonen sowohl nach der RLT-Anlage als auch der Lage im Gebäude getrennt, so dass eine größere Zonenanzahl resultiert.
- **Zonierung d4:** Hierbei wurden alle Flächen eines Bereiches zu einer einzelnen Zone zusammengefasst.

Aggregierte Zonen verfügen über die gleiche Fläche wie die Summe der entsprechenden einzelnen Zonen in der detaillierten Variante. Die Profile für Beleuchtung, Geräte und Personen wurden so angepasst, dass die inneren Lasten der aggregierten Flächen der Summe der Lasten der Einzelprofile entsprechen. Im Folgenden werden die resultierenden Zonierungsvarianten für die untersuchten Gebäudebereiche vorgestellt.

Haupthaus

An den Mittelbau des Haupthauses grenzen vier Flügel an (vgl. Abschnitt 3.2.2). Die erste Etage der Flügel und des Mittelbaus wurden jeweils in unterschiedlichen Zonierungen modelliert. In diesen Bereichen befinden sich hauptsächlich Pflegestationen, mit Ausnahme des Nord-West-Flügels, in dem sich ein Bürotrakt befindet. Die Station im ersten Obergeschoss des Anbaus des Nord-Ost-Flügels weist Wärmeverluste über das Dach auf.

Die vier Zonierungsvarianten werden am Beispiel des Süd-Ost-Flügels gezeigt (Abbildung 4.1). Das Layout und die Zonierungsvarianten sind in den übrigen Bereichen des Haupthauses sehr ähnlich. In der detailliertesten Zonierung werden 21 Zonen modelliert, die in Zonierung *d2* durch das Zusammenfassen der Bettenzimmer auf der Südseite auf 14 Zonen reduziert werden. In Zonierung *d3* werden 5 Zonen modelliert und in Zonierung *d4* wird die gesamte Station als Ein-Zonen-Modell abgebildet.

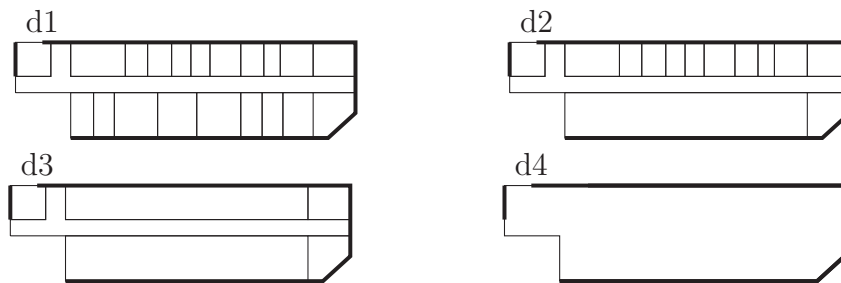


Abbildung 4.1: Schema der Zonierungsvarianten des Süd-Ost-Flügels des Haupthauses

Wahlleistungsgebäude

Das Wahlleistungsgebäude beherbergt drei identisch aufgebaute, mechanisch belüftete Pflegestationen (vgl. Abschnitt 3.2.2). Die vier Zonierungsvarianten sind in Abbildung 4.2 dargestellt. In der detailliertesten Variante resultieren 42 Zonen. In der mittleren De-

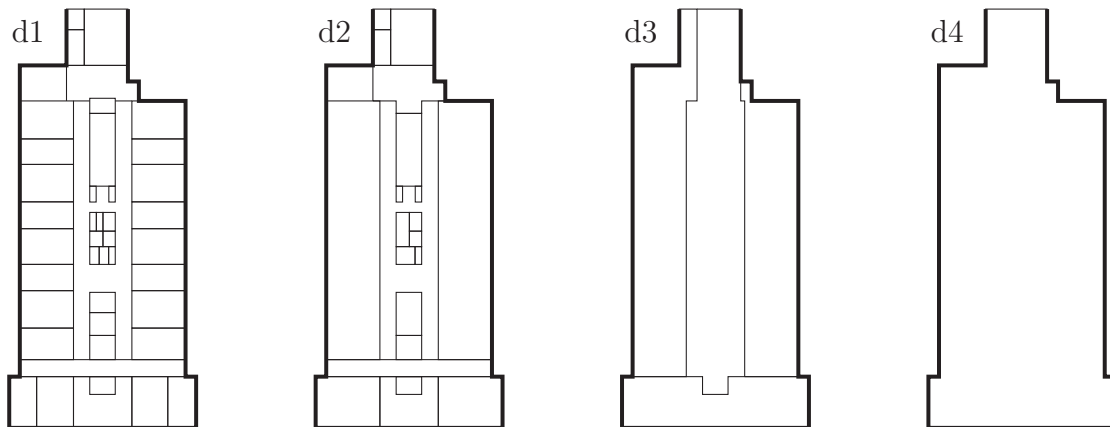


Abbildung 4.2: Schema der Zonierungsvarianten einer Etage des Wahlleistungsgebäudes

taillierungsvariante wurden einige innenliegende Räume aggregiert und die außenliegenden Bettenzimmer mit der jeweils gleichen Orientierung zu einer Zone zusammengefasst. So

ergeben sich 17 Zonen, von denen 8 außenliegend sind. Da das Gebäude im Norden an das Haupthaus angrenzt, gibt es keine nach Norden orientierten außenliegenden Räume, sodass in der Variante *d3* vier Zonen (Süd, West, Ost und Innen) resultieren.

OP-Station

Abschließend wurden die beiden in Kapitel 3.2.2 beschriebenen OP-Stationen mit den Sälen 1-4 bzw. Saal 5 simuliert. Um den Einfluss unterschiedlicher Regelungen der raumlufttechnischen Anlage zu untersuchen, wurden die Zonierungsvarianten sowohl für eine Abluft- als auch eine Zuluftregelung der Lüftungsanlage berechnet. Bei der Abluftregelung haben die Lasten der einzelnen Zonen einen hohen Einfluss auf die sich einstellende Zulufttemperatur. Bei der Zuluftregelung ist dieser Einfluss geringer, da die Lasten in den Zonen lediglich über die die Wärmerückgewinnung aus der Abluft mit der Lüftungsanlage gekoppelt sind.

Die verschiedenen Zonierungsvarianten sind in Abbildung 4.3 dargestellt. Für die detaillierteste Zonierung ergeben sich 30 Zonen für OP1-4 und 18 Zonen für OP5. Indem die Räume mit ähnlicher Funktion, die von derselben RLT-Anlage versorgt werden, zusammengefasst wurden, verbleiben in Zonierung *d2* 17 bzw. 14 Zonen.

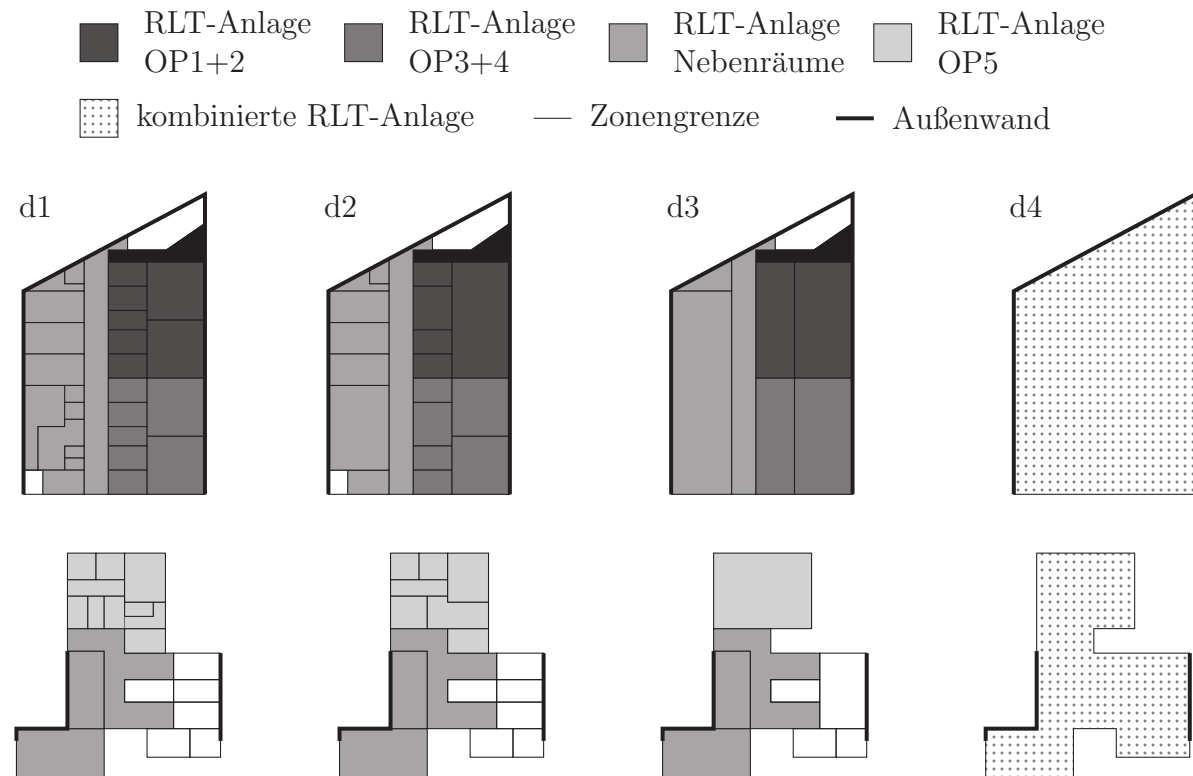


Abbildung 4.3: Zonierungsvarianten der OP-Stationen, oben: OP1-4, unten: OP5

In Zonierung *d3* erfolgt eine Trennung sowohl nach der Lage im Gebäude, als auch nach den raumlufttechnischen Anlagen, durch die die Räume versorgt werden. Es resultieren 8 Zonen in OP1-4, die von insgesamt drei raumlufttechnischen Anlagen versorgt werden. In OP5 wurden der Operationssaal und die Nebenräume als eine gemeinsame Zone mo-

delliert, da diese alle innenliegend sind und von derselben Anlage versorgt werden. So ergeben sich 7 Zonen.

4.2.2 Ergebnisse

Zur Auswertung der Zonierungsvarianten werden Heiz- und Kühlenergiebedarfe der simulierten Gebäude betrachtet. Der elektrische Energiebedarf wird durch die Zonierung nicht beeinflusst. Es wird angenommen, dass die detaillierte Zonierung den Referenzzustand mit dem besten Ergebnis darstellt und daher die Abweichungen der anderen Varianten zu diesem Ergebnis bestimmt. Von den einzelnen Gebäuden wurden jeweils unterschiedliche Varianten gerechnet, die in Tabelle 4.3 aufgeführt sind.

Tabelle 4.3: Berechnete Varianten für die drei Krankenhausbereiche

Bereich	Varianten
Haupthaus	Ist-Zustand / Neubaustandard der Außenbauteile
Wahlleistungsgebäude	Ist-Zustand / Altbaustandard der Außenbauteile
OP-Stationen	Zuluftregelung/ Abluftregelung

Haupthaus

Zunächst werden die Ergebnisse für das Haupthaus vorgestellt. Dazu wird sowohl der Jahresheizwärmebedarf als auch die Heizleistung für die Zonierungsvarianten verglichen.

Jahresheizwärmebedarf der Zonierungsvarianten Abbildung 4.4 führt den Jahresheizenergiebedarf für die vier Zonierungsvarianten für alle vier betrachteten Bereiche auf. Da das Gebäude nicht gekühlt wird, liegt kein Kühlenergieverbrauch vor.

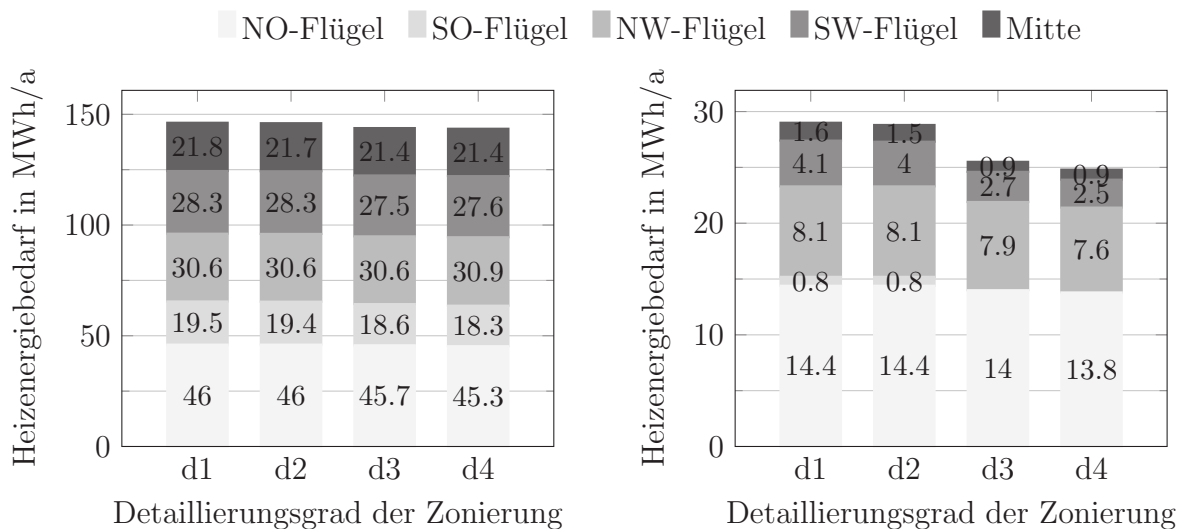


Abbildung 4.4: Heizenergiebedarfe der Zonierungsvarianten für die einzelnen Bereiche des Haupthauses, links: Ist-Zustand, rechts: Neubaustandard

In der linken Abbildung sind die Simulationsergebnisse für den Ist-Zustand des Gebäudes dargestellt. Rechts wurden die U-Werte von Außenwänden, Fenstern und Dächern so verringert, sodass die Daten denen eines nach EnEV 2013 erbauten Gebäudes entsprechen. Für die Etage im Altbaustandard (linke Abbildung) sind nur geringe Abweichungen von dem Heizwärmebedarf der detailliertesten Zonierung $d1$ zu erkennen ($-0,1\%$ für Zonierung $d2$, $-1,6\%$ für Zonierung $d3$, $-1,8\%$ für Zonierung $d4$). Für die einzelnen Stationen ergeben sich jedoch größere Abweichungen (maximal $-6,3\%$ für Zonierung $d4$ des SO-Flügels). Bei den meisten Stationen nimmt mit abnehmendem Detaillierungsgrad der Heizwärmebedarf ab. Die Abweichungen fallen umso höher aus, je geringer der Heizenergiebedarf einer Station ist. Die höchsten Heizwärmebedarfe treten im Nord-Ost-Flügel auf, da sich dort ein Bürotrakt befindet, der geringe Lasten und zusätzliche Wärmeverluste über das Dach aufweist.

Bei der Simulation mit Neubaustandard (rechte Abbildung) sind die Heizenergiemengen durch die bessere Dämmung der Wände deutlich geringer. Da das Gebäude in diesem Fall weniger von der Hüllfläche, sondern stärker durch die inneren Lasten dominiert wird, machen sich die unterschiedlichen inneren Lasten der Bereiche stärker bemerkbar als zuvor. Somit variieren die Heizenergiebedarfe der verschiedenen Abteilungen stärker als bei der Simulation mit einer geringeren Dämmung der Außenwände. Die Differenzen zwischen den Zonierungsvarianten betragen zum Teil bis zu -100% und sind damit deutlich höher als in der Altbauvariante. Dabei sind die Bereiche mit den höchsten Abweichungen in beiden Modellvarianten dieselben.

Auftretende Effekte Beim Zusammenfassen der Räume treten unterschiedliche Effekte auf, die die Abweichungen der unterschiedlichen Zonierungsvarianten erklären. Effekt 1 beruht darauf, dass die zusammengefassten Räume unterschiedliche innere Wärmequellen aufweisen. So wird in einer Zone A, in der nur geringe Lasten vorliegen, die nicht ausreichen, um den Wärmeverlust nach außen auszugleichen, Wärme über das Heizungssystem zugeführt. Somit liegt die Temperatur konstant bei der Soll-Heiztemperatur. Übersteigen in einer Zone B die inneren Lasten die Wärmeverluste, steigt die Raumtemperatur über die Soll-Heiztemperatur an. Durch die erhöhte Raumtemperatur ist die treibende Temperaturdifferenz zwischen innen und außen größer und ein erhöhter Wärmeverlust resultiert. Beim Zusammenfassen der beiden Zonen zu einer Zone AB werden die Lasten beider Einzelzonen auf die gemeinsame Fläche verteilt und die Temperatur in der zusammengefassten Zone ist nun geringer als die in Zone B. Somit resultieren geringere Wärmeverluste als in den einzelnen Zonen und der Heizenergiebedarf ist geringer als für die Summe der einzelnen Zonen.

Effekt 2 beruht auf der Strahlungstemperatur der Räume. Diese hat einen hohen Einfluss auf den Wärmeverlust des Raumes, da sie die Temperatur der außenliegenden Raumumschließungsflächen beeinflusst. Räume mit hohen Lasten, geringen Außenwandflächen und hohen Solarstrahlungsgewinnen weisen eine höhere Strahlungstemperatur auf. Ist beim Zusammenfassen der Zonen die Strahlungstemperatur in der aggregierten Zone höher als der Mittelwert der Strahlungstemperaturen in den einzelnen Zonen, so führt dies zu vermehrten Wärmeverlusten über die außenliegenden Raumumschließungsflächen und somit zu einem erhöhten Wärmebedarf der aggregierten Zone.

Effekt 1 und Effekt 2 sind gegenläufig. Da in der Regel Effekt 1 überwiegt, ist der Heizenergiebedarf in den meisten Fällen umso geringer, je geringer die Detaillierung der Zonierung gewählt wurde. Je nach Konfiguration der Räume kann jedoch auch Effekt 2 überwiegen, so dass der Heizenergiebedarf mit der Zonierungsdetaillierung zunimmt. Dies tritt vor allem auf, wenn innenliegende Zonen mit außenliegenden Zonen zusammengefasst werden und macht sich somit hauptsächlich in der Zonierung $d4$ bemerkbar. Je nach Layout der Bereiche und der Lasten der zusammengefassten Räume kann der Effekt jedoch auch in den anderen Zonierungen auftreten.

Einfluss der Zonierung auf die Heizleistung Neben der Betrachtung des jährlichen Energieverbrauches ist der Vergleich der auftretenden Wärmeströme in den Zonierungen ein interessanter Aspekt. Abbildung 4.5 zeigt die Heizleistung für die vier Zonierungsvarianten des Süd-Ost-Flügels in der Heizperiode und der Übergangszeit über einen Zeitraum von jeweils fünf Tagen. Während der Heizperiode sind keine großen Unterschiede zwi-

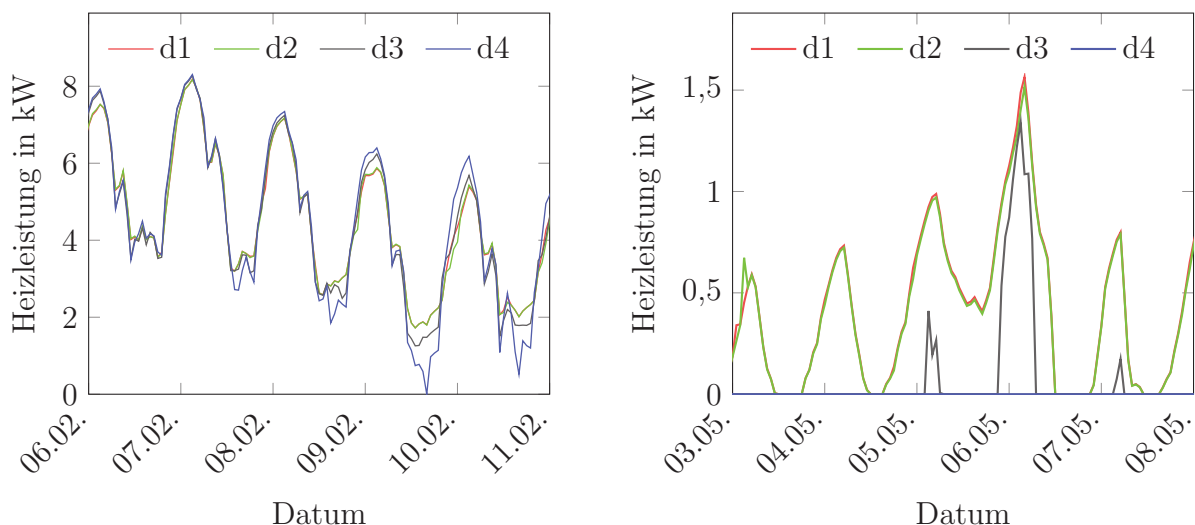


Abbildung 4.5: Wärmeströme der einzelnen Zonierungsvarianten für den Süd-Ost-Flügel, links: in der Heizperiode, rechts: in der Übergangszeit

schen den Zonierungsvarianten zu erkennen. Die Schwankungen im Lastverlauf sind etwas geringer, je detaillierter die Zonierung ist. In der Zonierung $d4$ tritt also tagsüber die höchste und nachts die geringste Heizleistung der vier betrachteten Varianten auf. In der Übergangszeit sind die relativen Unterschiede zwischen den Zonierungen hingegen deutlicher ausgeprägt. Es lässt sich ein verminderter Heizbedarf für die weniger detaillierten Zonierungen erkennen. An wärmeren Tagen wird für die Zonierungen $d4$ und $d3$ keine Heizenergie benötigt; in den Zonierungen $d1$ und $d2$ liegt jedoch zu dieser Zeit noch ein Heizwärmebedarf vor. Über das gesamte Jahr gesehen liegt die Abweichung der Heizleistung in Zonierung $d2$ 99 % der Zeit unterhalb von 10 %. Bei Zonierung $d3$ und $d4$ ist die Abweichung während 70 % bzw. 63 % der Zeit geringer als 10 %.

Wahlleistungsgebäude

Die Ergebnisse der Heiz- und Kühlenergien des Wahlleistungsgebäudes sind in Abbildung 4.6 dargestellt. Für sowohl Heizenergie als auch Kühlenergie sind die gleichen Tendenzen zu erkennen wie für das Haupthaus: bei Zusammenfassen der Räume sinkt der Energiebedarf.

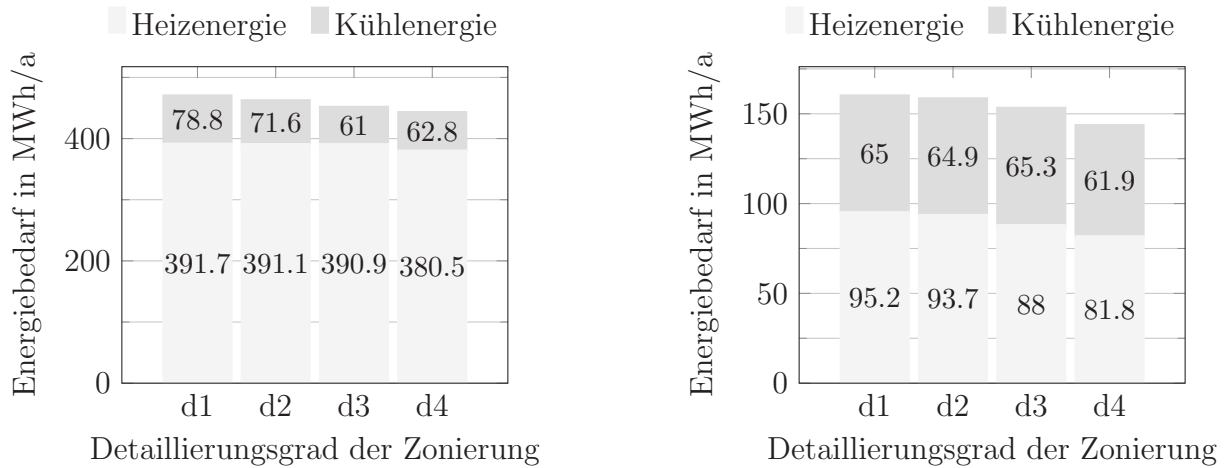


Abbildung 4.6: Heizenergiebedarfe der Zonierungsvarianten für die einzelnen Bereiche des Wahlleistungsgebäudes, links: Altbaustandard der Außenwände, rechts: Ist-Zustand

Die relativen Abweichungen der Heizenergie zwischen den Zonierungen sind zudem, wie zuvor beim Haupthaus, für den Neubaustandard (rechte Abbildung), bei dem weniger Energieverluste auftreten, deutlich höher als im Altbaustandard (linke Abbildung). Für die Kühlenergie tritt hingegen der gegenteilige Fall auf. Die relativen Abweichungen sind für den Ist-Zustand geringer als für den Altbaustand, da im Neubau größere Mengen an Kühlenergie notwendig sind.

Da nicht alle Räume gekühlt werden, tritt bei den Zusammenfassungen der Fall auf, dass nicht-gekühlte und gekühlte Räume zusammengefasst werden. Somit werden in den zusammengefassten Räumen zum Teil mehr Flächen gekühlt als in der detaillierten Zonierung, sodass dies einen Anstieg der Kühlenergie hervorruft. In Zonierung d_4 , in der die gesamte Fläche gekühlt wird, ist dennoch eine geringere Kühlenergie nötig, als in der detaillierteren Zonierung. Hier überwiegt also der Effekt, dass sich durch Zusammenfassen der Räume die Lasten gleichmäßiger verteilen und somit weniger Temperaturspitzen in einzelnen Räumen auftreten, was zu einem geringeren Kältebedarf führt.

In den oben genannten Ergebnissen wurden die Heiz- und Kühlwärmebedarfe für die Summe aller Etagen des Gebäudes betrachtet. Wird der Energiebedarf nicht für das gesamte Gebäude, sondern für die einzelnen Etagen getrennt bestimmt, so fällt auf, dass die Unterschiede zwischen den Zonierungen für den Keller und das Dachgeschoss aufgrund der dort vorliegenden höheren Wärmeverluste deutlich geringer sind als in den übrigen Etagen.

OP-Stationen

Der thermische Energiebedarf der OP-Stationen setzt sich zusammen aus dem Wärmebedarf der statischen Heizung und dem Wärme- und Kältebedarf der RLT-Anlage (vgl. Abschnitt 3.2.2). Abbildung 4.7 gibt den jährlichen Wärme- und Kältebedarf für die verschiedenen Zonierungen wieder. Der Großteil der Wärmeenergie wird in beiden Stationen über die RLT-Anlage bereitgestellt und nur zu einem geringen Anteil über die statische Heizung. Der Heizenergiebedarf ist bei der Abluftregelung etwas geringer als bei der Zuluftregelung.

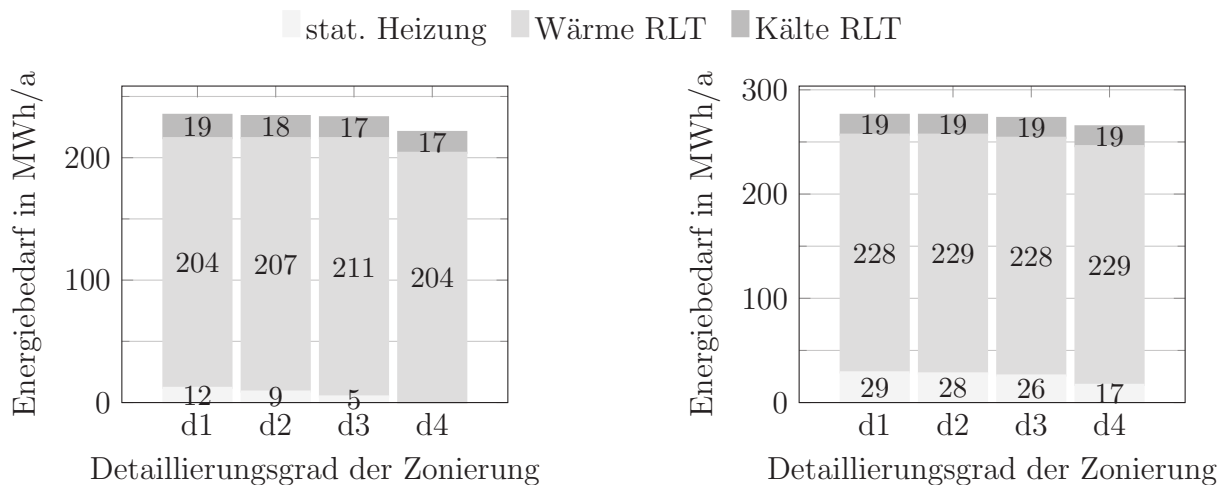


Abbildung 4.7: Thermische Energiebedarfe der Zonierungsvarianten für die OP-Stationen, links: Abluftregelung, rechts: Zuluftregelung

Nur bei der Zonierung *d4* ist eine deutliche Abweichung des thermischen Energiebedarfes von dem der detailliertesten Zonierung zu bemerken (-6% für die Abluftregelung bzw. -4% für die Zuluftregelung). In allen Detaillierungsstufen ändert sich jedoch die Zusammensetzung des Wärmebedarfes aus dem Anteil der raumlufttechnischen Anlage und der statischen Heizung, indem ein größerer Anteil des Heizwärmebedarfes über die raumlufttechnische Anlage und ein kleinerer Teil über die statische Heizung gedeckt wird. Auch die nötige Kühlenergie sinkt mit abnehmender Detaillierung der Zonierung.

In der Abluftregelung wird die Zulufttemperatur in Abhängigkeit der sich einstellenden Ablufttemperatur gewählt. Die Unterschiede zwischen den Zonierungen sind darüber begründet, dass in einer groben Zonierung die Lasten gleichmäßiger auf die Flächen verteilt werden. Als Folge treten weniger hohe Temperaturspitzen in den Zonen mit hohen Lasten auf. Somit sinkt die Ablufttemperatur und damit steigt die Zulufttemperatur und es ist weniger Kühlenergie zur Abkühlung der Außenluft nötig. Zudem wird weniger Heizenergie der statischen Heizung benötigt, um Zonen mit geringen Lasten zu heizen.

In der Zuluftregelung sind die Wärmeströme der raumlufttechnischen Anlagen nur insofern betroffen, als dass durch die veränderte Ablufttemperatur die Wärmerückgewinnung leicht beeinflusst wird. Da Zulufttemperatur und -volumenströme gleich bleiben, zeigt sich ein

geringerer Effekt der Zonierung auf die Wärmeströme der raumlufttechnischen Anlage.

Ein gewisser Anteil des unterschiedlichen Wärmebedarfs der Zonierungsvarianten wird über die Wärmerückgewinnung ausgeglichen. Zwar wird in der groben Zonierung mehr Wärme benötigt, die mögliche Wärmerückgewinnung aus der Abluft wird jedoch in der detaillierten Zonierung nicht vollständig ausgeschöpft. Somit wird in der groben Zonierung ein höherer Anteil der maximal übertragbaren Wärme zurückgewonnen. Da die Außenlufttemperatur während der meisten Zeit unterhalb der Ablufttemperatur liegt, besteht ein geringes Potenzial zur Kälterückgewinnung aus der Abluft, sodass der Mehrbedarf an Kälte nicht hierüber gemindert werden kann. Somit fällt die Abweichung des Kältebedarfs mit knapp 10 % deutlich höher aus.

Weitere untersuchte Aspekte

Weitere Änderungen der Konfiguration der Bereiche, die untersucht wurden, sind die folgenden:

- Werden die inneren Lasten der Station gleichmäßig auf die gesamte Station verteilt, sodass in jedem Raum derselbe Wärmegewinn pro Fläche vorliegt, resultiert ein etwas geringerer Heizwärme- und ein etwas höherer Kältebedarf und die Abweichungen zwischen den Zonierungen sind deutlich geringer als zuvor. Dies spricht dafür, dass ein großer Teil der ansonsten aufgetretenen Abweichungen auf die unterschiedliche Verteilung der inneren Lasten durch Geräte, Personen und Beleuchtung zurückzuführen ist.
- Wird der Luftaustausch über die Zonengrenzen erhöht, so sinkt der Wärmebedarf der Abteilung, da die Trennung der Flächen durch die Zonierung zum Teil aufgehoben wird. Dementsprechend sind die Unterschiede zwischen den Zonierungsvarianten weniger stark ausgeprägt.
- Bei einem hohen Fensteranteil, der den üblichen Fensteranteil von 30 % der Außenwandfläche weit übersteigt, erhöht sich die Abweichung in Zonierung d_4 , bei der innenliegende mit außenliegenden Räumen zusammengefasst werden.

4.2.3 Fazit

Die relativen Abweichungen zwischen den Zonierungsvarianten in den verschiedenen Bereichen sind in Tabelle 4.4 zusammengefasst. In den Zonierungen d_2 liegen die Abweichungen der Heizenergie von der detailliertesten Zonierung für jeden der simulierten Bereiche unter 2 %. Auch in Zonierung d_3 und d_4 sind für die Gebäude mit Altbaustandard nur geringe Abweichungen von der detailliertesten Zonierung zu erkennen. Für die Neubausimulationen hingegen treten in Zonierung d_3 und d_4 deutlich höhere Unterschiede von über 10 % auf. Für die Kühlenergie sind die Abweichungen im Neubau geringer als im Altbau. Das Layout der Räume innerhalb eines Bereiches scheint einen untergeordneten Einfluss zu haben, da sowohl für das Haupthaus, als auch das Wahlleistungsgebäude vergleichbare Effekte auftreten. Die Ergebnisse in der Tabelle sind mittlere Ergebnisse für das gesamte Wahlleistungsgebäude bzw. die gesamte erste Etage des Haupthauses. In einzelnen Bereichen bzw. Etagen treten höhere Abweichungen auf.

Tabelle 4.4: Relative Abweichungen der Simulationen der Gebäude von der jeweils detailliertesten Simulation

Gebäude		d2	d3	d4
Heiz- energie	Haupthaus Altbau	-0,1 %	-1,6 %	-1,8 %
	Wahlleistung Altbau	-0,3 %	-0,3 %	-2,9 %
	Haupthaus Neubau	-0,7 %	-12,1 %	-14,6 %
	Wahlleistung Neubau	-1,6 %	-7,6 %	-14,1 %
	OPs Abluftregelung	-0,1 %	0,0 %	-5,4 %
	OPs Zuluftregelung	0,1 %	-0,6 %	-4,0 %
Kühl- energie	Wahlleistung Altbau	-9,1 %	-22,1 %	-15,0 %
	Wahlleistung Neubau	-0,2 %	-0,5 %	-4,8 %
	OPs Abluftregelung	-4,0 %	-7,8 %	-12,7 %
	OPs Zuluftregelung	-0,6 %	-1,0 %	-5,7 %

Für die OP-Stationen sind die Abweichungen der Kälteenergie größer als die der Heizenergie, was auf den Effekt der Wärmerückgewinnung zurückzuführen ist. Zudem sind die Differenzen für die Zuluftregelung stärker ausgeprägt.

Aus den Ergebnissen kann geschlossen werden, dass vor allem für Bereiche mit hohen Heizwärmebedarfen eine grobe Zonierung nach den $d3$ -Prinzipien ausreichend ist, um den jährlichen Heiz- und Kühlbedarf eines Gebäudes zu berechnen. Für Bereiche mit geringerem Heizwärmebedarf sollte die höher aufgelöste Zonierung $d2$ gewählt werden.

Für die Simulation von auch anderen Krankenhäusern, werden für den Fall, dass, wie in der vorliegenden Arbeit, vor allem der jährliche Heizenergiebedarf des Bereiches relevant ist, folgende Empfehlungen gegeben:

- In natürlich belüfteten, nicht-klimatisierten Pflegestationen, Bürotrakten oder gemischten Stationen mit gemäßigten inneren Lasten reicht eine Zonierung nach der Himmelsrichtung ($d3$) aus, vor allem, wenn es sich hierbei um unsanierte Gebäude eines älteren Baujahres handelt.
- In Gebäuden neueren Baujahres sollte grundsätzlich eine höhere Detaillierung der Zoneneinteilung gewählt werden, da der relative Fehler einer weniger detaillierten Zonierung mit abnehmendem Energiebedarf zunimmt.
- Räume, die sich über die inneren und solaren Lasten stark aufheizen, sollten nicht mit Räumen zusammengefasst werden, bei denen dies nicht der Fall ist. Ebenso sollten zwei Flächen eine ähnliche Anzahl der Heiztage aufweisen, um zu einer Zone zusammengefasst werden zu können.
- Bereiche, die einen Wärmeverlust über das Dach oder das Erdreich haben, benötigen eine weniger detaillierte Zonierung als Bereiche, die an weitere Etagen angrenzen.
- Bei einer mechanischen Belüftung mit Regelung der Zulufttemperatur ist der Fehler des Heizwärmebedarfs geringer, sodass eine weniger detaillierte Zonierung ausrei-

chend ist. Eine mechanische Belüftung mit Abluftregelung hingegen führt zu einem größeren Fehler durch die weniger detaillierte Zonierung, sodass eine detailliertere Zonierungsvariante gewählt werden sollte. Dies gilt vor allem für den Fall, dass keine Wärmerückgewinnung vorliegt.

Grundsätzlich muss nach Ziel der Auswertung entschieden werden, welche Zonierung notwendig ist und welche Abweichung toleriert wird.

In den Simulationen wurden in jeder Zone dieselben Annahmen zu Raumtemperaturen und Lüftungsverhalten getroffen. Werden unterschiedliche Annahmen getroffen und diese Flächen dann zusammengefasst, können weitaus größere Unterschiede zwischen den Zonierungsvarianten auftreten.

Soll eine große Anzahl von Simulationsrechnungen durchgeführt werden, beispielsweise für eine Kalibrierung, Sensitivitätsanalyse oder Optimierung, ist die Rechenzeit besonders entscheidend. Besteht in diesem Fall Unklarheit, ob eine geringe Detaillierung der Zonierung ausreichend ist, so sollte der notwendige Detaillierungsgrad in einer Voruntersuchung ermittelt werden. Dies kann zu einer erheblichen Reduktion der Rechenzeit führen, wenn somit eine geringer detaillierte Zonierungsvariante gewählt werden kann.

Kapitel 5

Bestimmung der Eingangsdaten

Die Qualität der Eingangsdaten bestimmt die Qualität der Modellergebnisse und ist somit von hoher Bedeutung für die Simulation. Zudem führt die Erhebung von detaillierten Gebäudedaten oftmals direkt zu Erkenntnissen über die Effizienz und mögliche Einsparmaßnahmen. In diesem Kapitel soll geklärt werden, welche Eingangsdaten für Krankenhäuser zur Verfügung stehen. Fehlende Eingangsdaten, die auch nicht von anderen Gebäudetypen abgeleitet werden können, werden erhoben und aufbereitet.

5.1 Überblick über vorhandene Daten

Die Bestimmung der nutzungsunabhängigen Daten (Anlagen-, Gebäude- und Wetterdaten) erfolgt für Krankenhäuser und andere Gebäudetypen auf dieselbe Weise. Datenquellen für diese Datentypen sind in Tabelle 5.1 aufgeführt. Es sollten, sofern möglich, stets aktuelle Daten des tatsächlichen Gebäudes verwendet werden, anstatt auf Standardwerte zurückzugreifen. Neben der Sammlung aller vorhandenen Datenquellen ist ein Vor-Ort-Besuch und die Überprüfung des tatsächlichen Anlagenbetriebs unerlässlich.

Tabelle 5.1: Quellen für nutzerunabhängige Eingangsdaten einer Gebäudesimulation

Datentyp	Datenart	Datenquellen
Anlagen- daten	Anlagenart, Anlagen- größe, Verhalten der Anlage bei verschiede- nen Betriebspunkten (Voll- und Teillast)	Ausführungszeichnungen, Revisionspläne, Her- stellerdatenblätter, Prüfberichte, Betriebsproto- kolle, Verbrauchsübersichten des Energieversor- gers, Unterzähler, Gebäudeautomatisierungssys- teme, technisches Personal, Messungen
Gebäude- daten	U-Werte bzw. Kon- struktionsdaten Luftdichtheit	Entnahme aus Bauplänen, Abschätzung über das Baualter Standardwerte (evtl. Umrechnung von Wohnge- bäuden auf Nichtwohngebäude nötig)
Klima- daten	Lufttemperatur, Luft- feuchte, Global- und Diffusstrahlung	Für die Kalibrierung: reale Messdaten, möglichst vor Ort aufgenommen. Für die Bestimmung des Energieverbrauchs: Testreferenzjahre

Zu den nutzungsabhängigen Daten gehören der Energieverbrauch durch Beleuchtung und Gerätenutzung, die Wahl der Raumtemperatur sowie der Luftaustausch durch Fensterlüftung. Im Gegensatz zu den Gebäude-, Anlagen- und Klimadaten unterscheiden sich diese für Krankenhäuser von denen anderer Gebäudetypen. Daher wird im Folgenden ein Überblick über vorhandene, nutzungsabhängige Daten für Krankenhäuser gegeben. Weiterhin werden Abhängigkeiten des Nutzerverhaltens von Umweltvariablen und Methoden zur Erhebung und Modellierung des Nutzerverhaltens vorgestellt, um diese auf den Fall des Krankenhauses übertragen zu können.

5.1.1 Krankenhausspezifische Daten

In diesem Abschnitt wird zusammengestellt, welche krankenhausspezifischen Daten zum Energieverbrauch verschiedener Endverbraucher in der Literatur zu finden sind.

Trinkwarmwasser

Der Wasserverbrauch in Krankenhäusern lag nach Tippkötter et al. (2009) in den Jahren 2000 bis 2008 bei durchschnittlich 307 L/d Bett und zeigt eine leicht sinkende Tendenz. Relevant für den Energieverbrauch ist jedoch lediglich der erwärmte Anteil des Trinkwarmwassers. Daher wird nur dieser im Folgenden betrachtet. Der Energiebedarf zur Erwärmung des Trinkwarmwassers wird in der Regel über die zentrale Wärmeerzeugung bereitgestellt. Die Erwärmung erfolgt über Speicher- oder Speicherladesysteme (Beier, 2009).

Tabelle 5.2 listet Literaturwerte für Wassermengen und Energiebedarfe für die Trinkwassererwärmung auf. Die ersten drei Messungen aus deutschen Krankenhäusern weisen einen Warmwasserbedarf pro Tag und Bett im mittleren zweistelligen Bereich auf. Die Verbrauchswerte nach Bujak (2010) aus einem polnischen Krankenhaus sind deutlich höher.

Tabelle 5.2: Warmwassermengen und Energieverbrauch für die Trinkwassererwärmung

Wassermenge L/Bett d	Energienmenge		Quelle
	kWh/Bett d	$\text{kWh/m}^2 \text{ a}$	
13-59			Beier, 2009
70*			Orth und Martenka, 2005
35**			Kah et al., 2013
118	7	61	Bujak, 2010

* bezogen auf Bettenbelegung statt Bestandsbetten

** ohne Verbrauch der Großküche

Die Temperaturen für die Warmwasserbereitung müssen nach DIN 1988-200 am Austritt des Trinkwassererwärmers bei 55°C liegen und die Auskühlung zwischen Warmwasservorlauf und Zirkulationswasser sollte 5°C nicht überschreiten. Nach Messungen von Beier (2009) lag die mittlere Temperatur in der Praxis bei 61°C und die Temperaturdifferenz zwischen Warmwasser und Zirkulation schwankte zwischen $1,6^\circ\text{C}$ und 14°C .

Auch der Tagesverlauf des Wärmebedarfes für die Trinkwarmwassererwärmung ist von Interesse. Abbildung 5.1 gibt die relativen Verläufe bezogen auf die maximale Wärmeleistung des Tages nach verschiedenen Quellen wieder. In allen Messergebnissen tritt der maximale Verbrauch am Vormittag zwischen 7:00 und 9:00 Uhr auf und fällt zum Nachmittag und Abend hin ab. Während nach Beier (2009) auch nachts noch 40 bis 50 % der Wärmeleistung abgenommen werden, fällt der Verbrauch nach Orth und Martenka (2005) nachts bis auf annähernd 0 % ab.

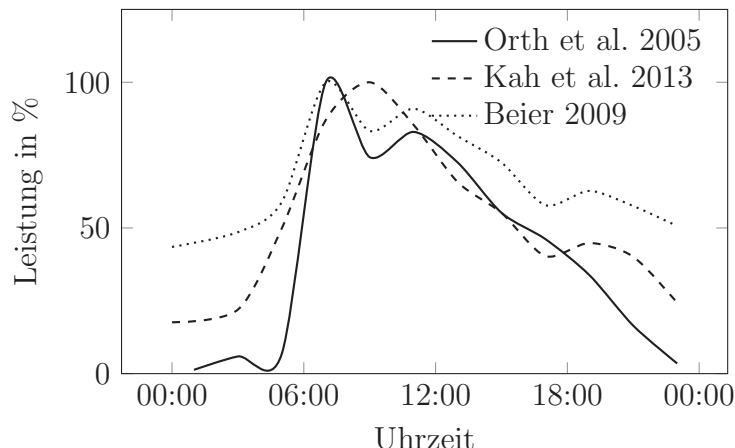


Abbildung 5.1: Tagesgänge des Energiebedarfes für die Trinkwarmwasserbereitung nach verschiedenen Quellen, normiert auf die maximale Tagesleistung

Bujak (2010) führte Messungen in zwei polnischen Krankenhäusern über einen Zeitraum von jeweils vier Jahren durch. Der tägliche Energieverbrauch für die Warmwasserbereitung schwankte im ersten Krankenhaus zwischen -45 und $+60$ % und im zweiten Krankenhaus zwischen -45 und $+65$ % um den Mittelwert. Ein saisonaler Einfluss mit einem leicht erhöhten Wärmeverbrauch im Winter war zu erkennen.

Elektrische Verbraucher

Stromverbraucher im Krankenhaus sind zum einen Großgeräte, wie beispielsweise Magnetresonanztomographen oder die Drucklifterzeugung. Zum anderen ist dies eine Vielzahl von Kleingeräten, die durch ihre große Anzahl einen hohen Verbrauch hervorrufen. Einige dieser Geräte kommen allein in Krankenhäusern vor, andere sind in ihrer Art nicht krankenhausspezifisch, weichen jedoch in ihrer Nutzung von denen anderer Gebäude ab. Um den Verbrauch der Geräte abschätzen zu können, existieren nur wenige Daten. Jensen und Petersen (2011) führten Messungen an verschiedenen elektrischen Verbrauchern durch und kritisieren, dass nur wenige Projekte die Energieeffizienz von medizinischen Geräten adressieren, obwohl deren Verbrauch einen hohen Anteil der elektrischen Leistung im Krankenhaus ausmacht und zu 70 bis 90 % durch den Standby-Betrieb bestimmt wird.

Die Tabellen 5.3 und 5.4 fassen einige der verfügbaren Daten zu elektrischen Verbrauchern in Krankenhäusern zusammen. Diese umfassen sowohl Einzelgeräte, als auch gesamte Abteilungen. Die Verbräuche der Abteilungen in Tabelle 5.4 beziehen sich auf die elektrischen Verbraucher auf Raumbene. Der Energiebedarf der Raumkonditionierung ist nicht darin

enthalten. Gemessene Verbrauchsdaten weiterer einzelner Laborgeräte, die in der Tabelle nicht gesondert aufgeführt wurden, sind bei Christiansen et al. (2015) zu finden. In Tabelle 5.4 ist lediglich der gesamte Verbrauch des vermessenen Laborgebäudes aufgeführt.

Tabelle 5.3: Elektrische Energieverbräuche von Krankenhausgeräten

Gerät	E_{el} in MWh/a	P_{el} in kW		Datenherkunft	Quelle
		Betrieb	Standby		
MRT	150	20-80	15	Messung	Jensen und Petersen, 2011
MRT	93	14-30	7	Herstellerangaben	McKenney et al., 2010
MRT	-	40-45	9-17	Messung	Harsem, 2011
MRT	113	52	5	Messung	Harsem, 2011
CT	73	21	2	Herstellerangaben	McKenney et al., 2010
CT	28	-	-	Abschätzung	Esmacili et al., 2011
CT	29	≤ 70	3	Messung	Toshiba, 2014
CT	59	-	-	Abschätzung	Toshiba, 2014
CT	-	40-60	8	Messung	Harsem, 2011
CT	38	6,2	5,5	Messung	Harsem, 2011
CT	78	8,8	8	Messung	Harsem, 2011
CT	24	16,7	0	Messung	Harsem, 2011
PET/CT	-	20-25	6	Messung	Harsem, 2011
Angiografie	-	10-20	3	Messung	Harsem, 2011
Angiografie	31	9	3,8	Messung	Harsem, 2011
Angiografie	13	9	3,8	Messung	Harsem, 2011
Zyklotron	-	70	6-7	Messung	Jensen und Petersen, 2011
Röntgengerät	-	0,9-1,4	0,7	Messung	Jensen und Petersen, 2011
Röntgengerät	0,36	1,4	0	Messung	Harsem, 2011
Röntgengerät	16	7,5	6	Messung	Harsem, 2011
Röntgengerät	69	7,5	6	Messung	Harsem, 2011
Röntgengerät	0,6	1,5	-	Messung	Harsem, 2011
Mammografie	0,3	1	0	Messung	Harsem, 2011
Gammakamera	4	2	0	Messung	Harsem, 2011
Gammakamera	4	2	0	Messung	Harsem, 2011
Dialyse	-	0,8-1,8	0	Messung	Jensen und Petersen, 2011
Ultraschall	1,6			Messung	Harsem, 2011
Druckluft- erzeugung	152			unklar	van Heur, 2008

Tabelle 5.4: Elektrische Energieverbräuche von Krankenhausbereichen

Abteilung	E_{el} in kWh/m ² /a	P_{el} in W/m ²		Datenherkunft	Quelle
		Grund- last	Spitzen- last		
Pflegestation	56	-	-	Abschätzung	Holeck, 2007
Pflegestation	77	-	-	Abschätzung	Holeck, 2007
Pflegestation	136	29	9	Messung	Morgenstern et al., 2016
Pflegestation	143	29	10	Messung	Morgenstern et al., 2016
Pflegestation	76	14	6	Messung	Morgenstern et al., 2016
Pflegestation	98	15	9	Messung	Morgenstern et al., 2016
Pflegestation	116	24	10	Messung	Morgenstern et al., 2016
Pflegestation	99	14	9	Messung	Morgenstern et al., 2016
Pflegestation	112	17	10	Messung	Morgenstern et al., 2016
Pflegestation	68	15	4	Messung	Morgenstern et al., 2016
Pflegestation	169	30	12	Messung	Morgenstern et al., 2016
Pflegestation	91	13	8	Messung	Morgenstern et al., 2016
Pflegestation	111	20	9	Messung	Morgenstern et al., 2016
Intensivstation	480	-	-	Messungen	Rohde et al., 2014
Radiologie	163	24	11	Abschätzung	Holeck, 2007
Radiologie	389	67	30	Messung	Morgenstern et al., 2016
Radiologie	181	16	8	Messung	Morgenstern et al., 2016
Radiologie	211	44	15	Messung	Morgenstern et al., 2016
Radiologie	232	89	5	Messung	Morgenstern et al., 2016
OP-Saal	183			Abschätzung	Holeck, 2007
OP-	40			Abschätzung	Holeck, 2007
Nebenträume					
OP-Station	379	69	28	Messung	Morgenstern et al., 2016
OP-Station	419	77	22	Messung	Morgenstern et al., 2016
OP-Station	382	48	38	Messung	Morgenstern et al., 2016
OP-Station	397	69	32	Messung	Morgenstern et al., 2016
Labor	-	11-15	7-9	Messung	Jensen und Petersen, 2011
Labor	3560	-	-	Messung	Rohde und Martinez, 2015
Labor	420	56	42	Messung	Morgenstern et al., 2016
Labor	373	30	30	Messung	Morgenstern et al., 2016
Laborgebäude	-	72	46	Messung	Christiansen et al., 2015
ZSVA	8-10 ¹				Kah et al., 2013

¹ bezogen auf die Gesamtfläche des Krankenhauses

Für einige, vor allem größere, medizinische Geräte liegen mehrere Vergleichsmessungen vor. Für andere Geräte, beispielsweise Ultraschallgeräte, Dialyse oder die Druckluf-

zeugung sind hingegen nur wenige Vergleichswerte vorhanden. Ähnlich sieht es bei den Verbräuchen von Abteilungen aus. Zu Pflegestationen sind einige Vergleichswerte vorhanden, zu anderen, beispielsweise Intensivstationen, hingegen nur sehr wenige. Überall gilt, dass zum Teil große Unterschiede zwischen den einzelnen Werten auftreten. Hier sollten in weiteren Arbeiten die Einflussfaktoren auf den Energieverbrauch bestimmt werden.

5.1.2 Nutzungsabhängige Daten anderer Gebäudetypen

Das Nutzerverhalten stellt eine hohe Unsicherheit im Bereich der Gebäudesimulation dar, da dieses nicht vorhersehbar ist und stochastisch auftritt. Durch ihr Verhalten können die Nutzer den Energieverbrauch des Gebäudes um 20 bis 40 % verändern (Clevenger und Haymaker, 2006; Hong und Lin, 2013; Leittretter, 2005). Im Folgenden werden verschiedene Modellierungsansätze für das Nutzerverhalten vorgestellt und die jeweiligen Einflussfaktoren für die Fensteröffnung, Beleuchtung und Gerätenutzung erläutert.

Modellierung des Nutzerverhaltens

Das Nutzerverhalten wird sowohl durch externe Faktoren (z. B. Außentemperatur, Solarstrahlung), interne Faktoren (z. B. Verhaltensmuster, Vorlieben des Nutzers) als auch durch das Gebäude (z. B. zur Verfügung stehende Regelemente) beeinflusst (Fabi et al., 2012). Das Verhalten von Einzelpersonen ist schwer vorherzusagen. Das Regelverhalten von Gruppen von Menschen hingegen kann auf Basis von Langzeitmessdaten prognostiziert werden. Die mit messbaren Innen- und Außenumweltparametern korrelierenden Verhaltensmuster können somit für die Abbildung des Nutzerverhaltens in Simulationsanwendungen genutzt werden (Mahdavi und Pröglhöf, 2009).

Zur Abbildung des Nutzerverhaltens in Modellen können verschiedene Strategien angewandt werden (Abbildung 5.2). Eine stochastische Modellierung, die die Komplexität

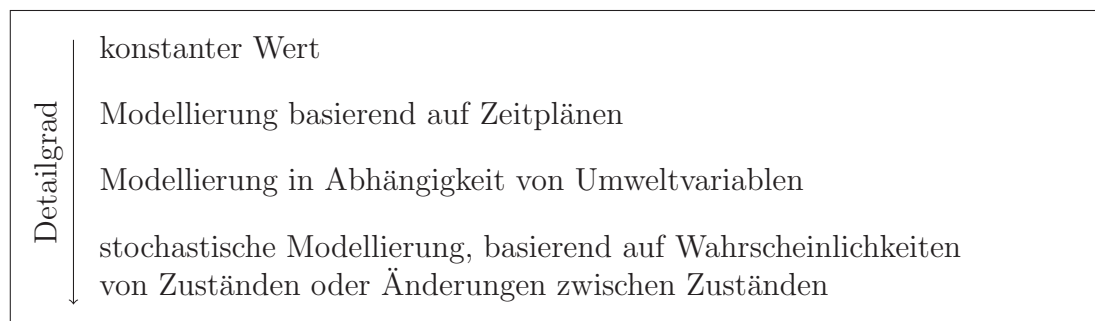


Abbildung 5.2: Möglichkeiten zur Abbildung des Nutzerverhaltens im Modell

des menschlichen Verhaltens realistischer wiedergibt, ist vor allem dann sinnvoll, wenn das Nutzerverhalten detailliert untersucht und Steuerungsalgorithmen daraus abgeleitet werden sollen (Peng et al., 2012). Wird statt einer deterministischen Simulation ein stochastischer Ansatz gewählt, so hat dies vor allem einen Einfluss auf die Lastspitzen des Gebäudes. Die Energiemengen der deterministischen Simulation sind mit dem Mittelwert der stochastischen Simulationen vergleichbar (Robinson, 2006; Maderspacher et al., 2012). Laut Borgeson und Brager (2008) sollte das Modell, das letztendlich gewählt wird, kom-

patibel mit den vorhandenen Daten sein und nicht komplizierter als nötig.

Die Einflussparameter auf das Nutzerverhalten werden durch Beobachtungen, Messungen oder Nutzerbefragungen bestimmt. Untersucht wurden bisher fast ausschließlich Wohn- und Bürogebäude. Dabei wurden sowohl der direkte Gegenstand der Nutzerinteraktion (z. B. Öffnungszustand des Fensters) als auch zusätzliche Variablen (z. B. Raumtemperatur, Arbeitsplatzbeleuchtung) erfasst (Gunay et al., 2013). Teilweise wurden statt der Zustände der Nutzerinteraktion (z. B. Fenster ist geöffnet) die Übergänge zwischen den Zuständen (z. B. Fenster wird geöffnet) erfasst. In einigen Modellen wird zunächst die Anwesenheit modelliert, bevor darauf aufbauend das Nutzerverhalten abgebildet wird (Borgeson und Brager, 2008). Über die Korrelation der Messgrößen mit der Nutzerinteraktion werden diejenigen Einflussparameter bestimmt, die eine hohe Relevanz für das Nutzerverhalten aufweisen. Diese können genutzt werden, um ein Modell des Verhaltens zu bilden, mit dessen Hilfe die Wahrscheinlichkeit für einen Zustand oder den Übergang aus einem Zustand in einen anderen in Abhängigkeit anderer Parameter angegeben werden kann.

Die Wahrscheinlichkeit eines Zustandes p (z. B. die Wahrscheinlichkeit für ein geöffnetes Fenster) in Abhängigkeit einer Variable x (z. B. die Außentemperatur) lässt sich mit Hilfe der Logit-Funktion ausdrücken (Nicol, 2001):

$$p = \frac{\exp(a + bx)}{1 + \exp(a + bx)} \quad (5.1)$$

a und b stellen Regressionskonstanten dar. Durch die Einbeziehung zusätzlicher abhängiger Variablen x_i kann die Beziehung erweitert werden.

Nach der Festlegung der Abhängigkeiten des Nutzerverhaltens von einem oder mehreren Parametern kann die Simulation des entsprechenden Indikators des Nutzerverhaltens entsprechend deterministisch oder stochastisch erfolgen.

Fensteröffnung

Der Nutzer hat einen hohen Einfluss auf die Luftwechselrate eines Raumes. Durch Fensteröffnung kann sich die Luftwechselrate von wenigen Zehnteln auf zwei Luftwechsel pro Stunde ändern (Wallace et al., 2002). Somit konnten Iwashita und Akasaka (1997) 87% des gesamten Luftwechsels in Wohngebäuden dem Nutzerverhalten zuschreiben. Obwohl im Winter höhere Windgeschwindigkeiten auftreten und die Temperaturdifferenzen zwischen innen und außen höher sind, ist die Luftwechselrate in natürlich belüfteten Gebäuden im Sommer höher, da das Nutzerverhalten mit mehr Fensteröffnungen im Sommer einen stärkeren Einfluss hat, als die Wetterbedingungen (Hyun et al., 2007). Somit ist ein verlässliches Modell des Lüftungsverhaltens notwendig.

Die Methoden zur Erhebung des Fensteröffnungsverhaltens reichen von Befragungen der Nutzer über fotografische Analysen der Fassaden bis hin zu sensorgestützten Erfassungen der Fensterkontakte. Zusätzlich wurden weitere Daten aufgenommen, beispielsweise Außen- und Innentemperatur, Solarstrahlung, Windgeschwindigkeit, Raumbelüftung oder Tageszeit (vgl. Haldi und Robinson, 2009; Herkel et al., 2008; Nicol, 2001; Rijal et al., 2007; Warren und Parkins, 1984). Untersucht wurden hauptsächlich natürlich belüftete Gebäude. In mechanisch belüfteten Gebäuden sind die Zusammenhänge komplizierter oder die

Fenster lassen sich nicht öffnen (Rijal et al., 2007).

Motivation für das Öffnen von Fenstern ist vornehmlich eine Regulation der Raumtemperatur und der Luftqualität (Warren und Parkins, 1984). Weitere Gründe liegen in dem akustischen und visuellen Umfeld, der Persönlichkeit des Nutzers, dem sozialen Einfluss und einer möglichen Vorliebe für geöffnete Fenster (Borgeson und Brager, 2008).

Zur Modellierung des Fensteröffnungsverhaltens ist die Außentemperatur der stärkste Einflussfaktor. Es zeigte sich übereinstimmend in den verschiedenen Studien, dass bei Temperaturen unterhalb von 5 °C weniger als 20 %, bei Temperaturen oberhalb 20 °C mehr als 60 % der Fenster geöffnet sind (Herkel et al., 2008; Rijal et al., 2007; Warren und Parkins, 1984). Die Außentemperatur wird in einigen Modellen somit als alleiniger Einflussfaktor verwendet. Anwesenheitsmuster spielen ebenfalls eine wichtige Rolle, da die Fenster häufig bei der Ankunft im Raum geöffnet und beim Verlassen wieder geschlossen werden. Auch der Zustand des Fensters ist wichtig. Ein bereits geöffnetes Fenster hat eine hohe Wahrscheinlichkeit geöffnet zu bleiben, während ein geschlossenes oftmals geschlossen bleibt. Weitere Einflussfaktoren sind Windgeschwindigkeit und -richtung, Solarstrahlung, Jahreszeit, Fassadenorientierung und Größe der betrachteten Fenster. Auch die Luftqualität, das Geräuschlevel und soziale Faktoren spielen eine Rolle, sind jedoch sehr gebäudespezifisch, bzw. schwer zu bestimmen. (Borgeson und Brager, 2008; Herkel et al., 2008).

Beleuchtung

Auch das Nutzerverhalten in Bezug auf die Beleuchtung hat einen hohen Einfluss auf den Energiebedarf eines Gebäudes. Im Vergleich zu Nutzern, die die Beleuchtung während der gesamten Anwesenheitszeit eingeschaltet lassen, können sparsame Nutzer mehr als 40 % Primärenergie einsparen (Bourgeois et al., 2006). Die Beleuchtung im Krankenhaus ist insbesondere durch die langen Nutzungszeiten relevant, die vor allem in Pflegebereichen länger sind als die Tageslichtverfügbarkeit. Während Bettenzimmer, Aufenthaltsräume, Untersuchungsräume und Dienstzimmer in der Regel außenliegend sind und Raumtiefen aufweisen, die durch die Befensterung ausreichend mit Tageslicht versorgt werden können, sind Flure, Nasszellen, Lagerräume, etc. häufig innenliegend und damit auch tagsüber von künstlicher Beleuchtung abhängig (Kah et al., 2013).

Wie auch bei dem Fensteröffnungsverhalten wurde das Nutzerverhalten in Bezug auf das Ein- und Ausschalten der Beleuchtung bisher vor allem in Büroräumen untersucht. Der Beleuchtungszustand wird am häufigsten beim Betreten oder Verlassen des Raumes verändert. Die Häufigkeit des Einschaltens beim Betreten zeigt eine starke Korrelation mit den Beleuchtungsverhältnissen am Arbeitsplatz. Der beim Betreten gewählte Beleuchtungszustand wird dann häufig den gesamten Tag beibehalten. Dieses Nutzerverhalten führt dazu, dass während der Nutzungszeit, unabhängig der Tageslichtverfügbarkeit, ein hoher Anteil der Beleuchtung eingeschaltet ist. Nach einer Auswertung verschiedener Datenbanken durch Nicol (2001) war 70 bis 90 % der Beleuchtung während der Arbeitszeit eingeschaltet. Correia da Silva et al. (2013) konnten in von ihnen untersuchten acht Büroräumen zu 83 % der Nutzungszeit eingeschaltete Beleuchtung feststellen. Somit sollte das Beleuchtungsverhalten abhängig von den Anwesenheitsmustern der Nutzer modelliert werden (Correia da Silva et al., 2013; Reinhart und Voss, 2002).

Geräte

Ein Großteil des Energieverbrauchs, der sich nicht den Endnutzungen Beleuchtung, Heizen, Kühlen und Trinkwarmwasser zuordnen lässt, wird durch Kleingeräte verursacht (Dawson-Haggerty et al., 2012). Da diese in der Regel Leistungen unterhalb von 300 W aufweisen und über Steckdosen betrieben werden, wird in der englischsprachigen Literatur häufig der Begriff der *plug loads* verwendet. Diese sind typischerweise für mehr als 20 % des Primärenergieverbrauchs in kommerziellen Gebäuden verantwortlich, mit steigender Tendenz (DOE, 2012). In Bürogebäuden sind über 75 % des Kleingeräte-Verbrauchs der Informationstechnologie zuzuordnen. Computer sind für etwa die Hälfte dieses Verbrauchs verantwortlich (Dawson-Haggerty et al., 2012).

Durch die hohe Anzahl, Vielfalt und Mobilität von Kleingeräten stellt die Bestimmung deren Verbrauchs eine besondere Herausforderung dar (Lanzisera et al., 2013). Die Verwendung von Herstellerangaben führt zu einer Überschätzung der Geräteleistung, da in der Regel die maximale Leistungsaufnahme angegeben wird. Die durchschnittliche Leistungsaufnahme im Betrieb beträgt jedoch lediglich 20 bis 30% der maximalen Leistungsaufnahme (Fuertes und Schiavon, 2014). Da selten alle Geräte gleichzeitig eingeschaltet sind, ist die Verwendung von Gleichzeitigkeitsfaktoren wichtig (Tabelle 5.5).

Tabelle 5.5: Empfohlene Gleichzeitigkeitsfaktoren nach Wilkins und Hosni (2011)

	Computer	Monitor
Tag	75 %	60 %
Nacht	20 %	20 %

Für Simulationen werden selten Detailanalysen zu den vorhandenen Geräten und deren Nutzung durchgeführt. Stattdessen wird auf Standardwerte zurückgegriffen (Menezes et al., 2014). Typischerweise werden Leistungsangaben pro Quadratmeter für Nutzungs- und Nicht-Nutzungszeit verwendet (Lanzisera et al., 2013). Fuertes und Schiavon (2014) verglichen verschiedene gemessene, abgeschätzte und empfohlene Werte für Bürogebäude in der Literatur und ermittelten eine Spanne zwischen 2 und 30 W/m², wobei der Großteil der Werte unterhalb von 21,5 W/m² lag. Diese Leistungen wurden über unterschiedliche Vorgehensweisen ermittelt, z. B. wurden teilweise gemittelte Werte für gesamte Bürogebäude oder unterschiedliche Werte für Büroräume, Flure, Kopierräume, etc. verwendet. Zudem sind die verwendeten Werte häufig nicht aktuell oder nicht repräsentativ. Eine regelmäßige Aktualisierung der Standardwerte ist nötig, da sich durch den technischen Fortschritt und effizientere Geräte die Leistungsaufnahmen im Betriebszustand tendenziell erhöhen, während im Ruhezustand eine deutliche geringere Leistung benötigt wird (Wilkins und Hosni, 2011). Erhebungen von Leistungen pro Fläche liegen hauptsächlich für Bürogebäude vor. Für Krankenhäuser sind nur wenige und stark variierende Daten vorhanden (vgl. Tabelle 5.4).

Eine Alternative zu der Verwendung von flächengemittelten Leistungen ist die Kombination von Verbrauchsdaten einzelner Geräte mit Nutzungsprofilen und Gerätezahlen. Die Messung von Einzelgeräten ist laut Lanzisera die beste Methode zur Abschätzung der

Gerätelasten eines Gebäudes. Nachteile sind jedoch der Aufwand und die Kosten für die Messungen, die die Anzahl der Geräte, die in einem Gebäude vermessen werden können, begrenzt. Für eine messtechnische Erfassung der Einzelgeräte eines Gebäudes sollten, je nach Diversität der im Gebäude verwendeten Geräte, etwa 40 % des Gebäudes begangen und die verwendeten Geräte erfasst werden. Die Anzahl der zu vermessenden Geräte hängt vom Gerätetyp ab. Lanzisera et al. (2013) empfehlen mindestens 11 % der Computer, 2 % der Monitore, aber 18 % der Geräte wie Kopierer, Scanner etc. zu vermessen, um den Energiebedarf des Gebäudes realistisch einschätzen zu können.

Gerade für Krankenhäuser ist die messtechnische Erfassung der Einzelgeräte wichtig, da keine Daten zu Geräteverbräuchen vorliegen. Lastprofile für medizinische Geräte sind nahezu unbekannt, da es keine Klassifizierungssysteme gibt, wie diese beispielsweise für Büro- oder Haushaltsgeräte existieren. Dies ist unter anderem durch die hohe Spezialisierung der medizinischen Geräte schwierig (Singer und Tschudi, 2009).

5.1.3 Fazit

Für die Simulation eines Krankenhauses ist eine Vielzahl von Eingangsdaten nötig. Die nutzungsunabhängigen Daten wie Gebäude-, Anlagen- und Klimadaten können – analog zu anderen Gebäudetypen – aus Dokumentationsunterlagen, Datenblättern und Plänen herausgelesen werden. Eine größere Schwierigkeit stellen nutzungsabhängige Eingangsdaten dar. Es sind einige wenige Messdaten zu Verbräuchen medizinischer Geräte vorhanden und auch vereinzelte Messungen flächenspezifischer Verbräuche für einige Stationstypen. Diese zeigen jedoch eine hohe Variation. Zudem ist weder die Ausstattung der vermessenen Stationen, noch der jeweilige Anteil des Stromverbrauchs durch Geräte und Beleuchtung oder der Tagesverlauf der Leistung bekannt. Die in anderen Gebäudetypen erhobenen Werte für die Nutzung von Geräten und Beleuchtung sowie der Fensteröffnung können aufgrund der abweichenden Nutzung des Gebäudes ebenfalls nicht verwendet werden. Die für andere Gebäudetypen angewandten Methoden zur Datenerhebung und zur Modellierung des Nutzerverhaltens können hingegen übernommen werden. Um das Krankenhaus modellieren zu können, ist es daher nötig, die nutzungsabhängigen Daten zu erheben. Dazu werden im Beispielkrankenhaus Messungen durchgeführt und die Messdaten so aufbereitet, dass sie allgemeingültig auch für andere Krankenhäuser verwendet werden können.

5.2 Eigene Bestimmung von Eingangsdaten

Um nutzungsabhängige Eingangsdaten für die Modellierung zu gewinnen, wurden Messungen und Datenerhebungen im Krankenhaus durchgeführt und aus den Messergebnissen Profile für Beleuchtung, Gerätenutzung und Lüftung erstellt. Die Erhebung und Aufbereitung dieser Daten wird in diesem Kapitel beschrieben.

5.2.1 Vorgehen zur Erhebung der nutzungsabhängigen Daten

Für die Modellierung der nutzungsabhängigen Daten wurde eine deterministische Modellierung gewählt. Für eine stochastische Modellierung wären weitergehende Untersuchungen nötig, um das Verhalten von Krankenhauspersonal und Patienten für die verschie-

denen Raumtypen detaillierter zu bestimmen. Zudem wurde der erzielte Nutzen einer stochastischen Modellierung als gering eingeschätzt, da diese vor allem für die realitätsnahe Berechnung der Lastspitzen relevant ist. Für das Ziel der vorliegenden Arbeit, die Berechnung der Energiemengen, ist der Unterschied zwischen stochastischer und deterministischer Modellierung weniger ausgeprägt.

Um die Nutzung von Geräten und Beleuchtung modellieren zu können, werden Raumtypen definiert und für jeden Raumtyp Profile für Geräte- und Beleuchtungsnutzung erstellt. Das Vorgehen ist in Abbildung 5.3 skizziert.

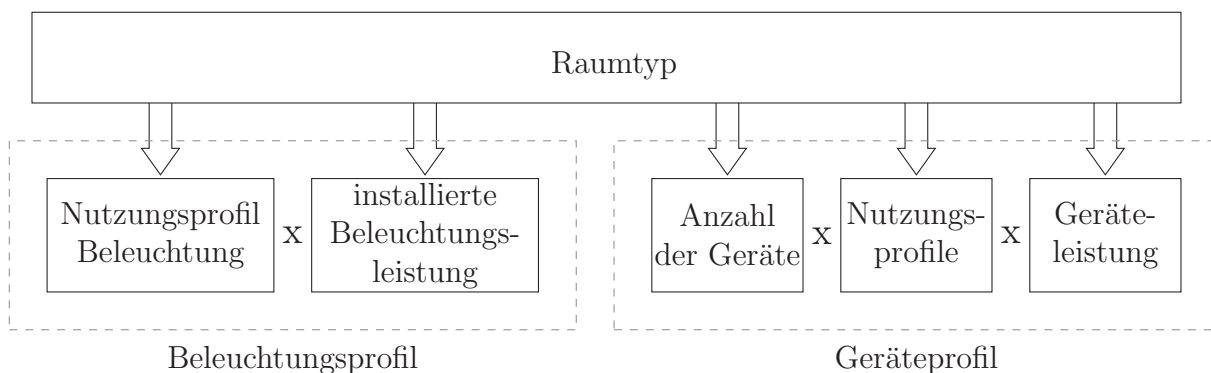


Abbildung 5.3: Schema der Erstellung der Raumprofile

Für jeden Raumtyp werden die installierte Beleuchtungsleistung und die Nutzungszeit erhoben. Die Multiplikation dieser beiden Faktoren führt zu dem raumtypenspezifischen Nutzungsprofil. Für die Geräte wird die Anzahl pro Raumtyp erhoben. Über Messungen von Einzelgeräten werden Betriebsleistung und Nutzungszeiten bestimmt. Daraus wird für jedes Gerät ein über die Betriebs- und Standbyleistung normiertes Profil erstellt, welches das Nutzerverhalten abbildet. Die Multiplikation von Nutzungsprofil, Geräteleistung und der Anzahl des jeweiligen Gerätes in diesem Raumtyp ergibt das Geräteprofil für den jeweiligen Raumtyp.

Die erhobenen Daten und das Vorgehen zur Auswertung und Generierung der Raumprofile werden in den Kapiteln 5.2.2 bis 5.2.6 vorgestellt. Die Generierung der nutzungsabhängigen Geräteprofile und die Erstellung der Geräte- und Beleuchtungsprofile für die Raumtypen werden jeweils anhand eines Beispiels erläutert. Die vollständige Darstellung der Profile findet sich in Anhang A.

5.2.2 Einteilung der Raumtypen

Eine Einteilung der Räume im Krankenhaus nach Funktionsbereichen findet sich in DIN 13080:2003-07. Es werden insgesamt neun Bereiche unterschieden. Diese Einteilung ist jedoch nicht für eine energetische Gruppierung der Krankenhausräume geeignet, da sie ausschließlich auf Basis der Funktion der Räume geschieht und zudem nur eine sehr grobe Einteilung vornimmt. In DIN 18599-10:2011-12 wird eine Einteilung von Nutzungszonen für allgemeine Gebäude, nicht nur Krankenhäuser, unternommen. Insgesamt werden

41 Nutzungszonen nach energetischen Gesichtspunkten unterschieden. Einige dieser Nutzungszonen betreffen Bereiche, die speziell in Krankenhäusern zu finden sind, beispielsweise Bettenzimmer sowie Untersuchungs- und Behandlungsräume. Andere Nutzungen sind zwar nicht krankenhausspezifisch, sind jedoch auch dort zu finden, wie beispielsweise Verkehrsflächen, Büroräume und Labore. Die Liste ist jedoch nicht ausreichend für die Beschreibung der Vielfalt der Räume im Krankenhaus, wie sie im Rahmen dieser Arbeit nötig ist. Daher wird im Rahmen der Fallstudie eine eigene Einteilung vorgenommen.

Um die Raumtypen des Krankenhauses einzuteilen, wurden die Ausstattungen und Nutzungen der einzelnen Räume über Begehungen erfasst und unter Zuhilfenahme der Raumlisten Räume mit vergleichbarer Ausstattung und Nutzung gruppiert. Einige Raumtypen, die in dem betrachteten Krankenhaus nicht vorhanden sind, können in anderen Krankenhäusern einen relevanten Anteil der Gesamtfläche und auch des Energieverbrauchs ausmachen. Dazu gehören beispielsweise Laborflächen oder Schwimmbäder. Diese werden im Rahmen dieser Arbeit jedoch nicht betrachtet.

Die in den Patientenzimmern enthaltenen Bäder wurden den Zimmern zugeordnet, da die Bäder in der Regel mit den Zimmern im Luftverbund stehen. Somit enthält der Raumtyp Bad nur diejenigen Badflächen, welche als separate Räume vom Flur aus zugänglich sind. Für einige Räume werden bei der späteren Generierung der Raumprofile weitere Unterkategorien unterschieden, beispielsweise für Räume in ambulanten Stationen und in Bürotrakten, die nachts und am Wochenende ungenutzt sind, im Gegensatz zu Räumen in Pflegestationen, die rund um die Uhr in Benutzung sind. Auch Behandlungsräume zeigen eine unterschiedliche Ausstattung, sodass für die spätere Generierung der Raumprofile eine weitergehende Unterscheidung in die zwei Raumtypen Behandlungsraum I mit geringen Lasten und Behandlungsraum II mit hohen Lasten unternommen wird. Die resultierenden Raumtypen sind in Tabelle 5.6 aufgeführt.

Tabelle 5.6: Einteilung der Raumtypen

Raumtyp	Flächenanteil	Raumtyp	Flächenanteil
Flur	22 %	OP	1,3 %
Bettenzimmer	14 %	Aufzug	1,2 %
Lager	10 %	Intensivzimmer	0,9 %
Büro	9 %	Cafeteria	0,8 %
Technikraum	8 %	Medizin. Großgeräte	0,8 %
Treppenhaus	5 %	Pflegearbeitsraum	0,8 %
Behandlung	4,8 %	Großküche	0,7 %
Aufenthalt	4,5 %	Zentralsterilisation	0,5 %
Bad	2,3 %	Werkstatt	0,4 %
OP-Nebenraum	2,0 %	Kapelle	0,4 %
Arztzimmer	1,6 %	Serverraum	0,2 %
Teeküche	1,6 %	Kopiererraum	0,2 %
Dienstzimmer	1,3 %		

Werden nicht einzelne Räume, sondern ganze Abteilungen betrachtet, so machen Pflege-

stationen mit knapp 40 % der gesamten Raumfläche im betrachteten Krankenhaus den größten Anteil aus. Behandlungs- und Untersuchungsbereiche belegen 14 % der Fläche, OP-Abteilungen 5,6 % und Bürotrakte 5,4 %.

5.2.3 Erfassung der Beleuchtung

Der elektrische Energiebedarf für die Beleuchtung wird sowohl durch die installierte Beleuchtungsleistung, als auch die Nutzungszeiten bestimmt. Für die Erfassung der Nutzungszeiten wurde der Anteil der eingeschalteten Beleuchtung während des Tages und der Nacht getrennt erhoben.

Installierte Beleuchtungsleistung

Die installierte Beleuchtungsleistung wurde über Begehungen der Räume erfasst (Tabelle 5.7). In einer studentischen Arbeit wurde stichprobenhaft die installierte Beleuchtungsleistung in einigen Räumen in einem zweiten Krankenhaus untersucht. Diese sind als Vergleichswerte angegeben. Die Zahl der untersuchten Räume ist mit 1 bis 6 pro Raumtyp jedoch geringer als in der Untersuchung im ersten Krankenhaus.

Tabelle 5.7: Installierte Beleuchtungsleistungen in verschiedenen Raumtypen

Raumtyp	Anzahl	installierte Leistung in W/m ²				
		Mittelwert	Min	Max	Standardabweichung	Mittelwert KH2
Bettzimmer	10	4,7	2,6	7,7	1,5	5,8
Flur	36	7,8	2,8	22,6	4,4	7,3
Lager	26	10,2	0,4	29,4	6,3	6,3
Dienstzimmer	6	11,9	7,8	18,0	3,6	16,4
Teeküche	10	11,9	3,3	29,4	7,7	13,5
Behandlung	19	15,0	2,6	31,1	8,6	9,9
Büro	29	15,1	5,1	32,1	6,4	13,0

Der Durchschnittswert der Beleuchtungsleistung über alle betrachteten Räume liegt bei 12,2 W/m². Es treten jedoch deutliche Unterschiede zwischen den einzelnen Raumtypen auf. Flure und Bettzimmer weisen die geringsten installierten Beleuchtungsleistungen auf, während diese in Behandlungsräumen und Büroräumen überdurchschnittlich hoch sind. Die Bettzimmer haben häufig keine zentrale Deckenbeleuchtung, sondern lediglich ein Leselicht am jeweiligen Bett, was zu der geringen installierten Beleuchtungsleistung führt. Auch innerhalb der Raumtypen treten hohe Unterschiede in der Beleuchtungsleistung auf. Die Differenzen sind am größten für die Lagerräume, da bei diesen hohe Unterschiede in der Raumgröße auftreten.

In Krankenhaus 2 weisen Flure und Bettzimmer ebenfalls die geringste installierte Beleuchtungsleistung auf. In den Dienstzimmern ist hingegen im Schnitt eine höhere Leistung installiert, in den Behandlungsräumen eine geringere. Insgesamt ist die installierte Beleuchtungsleistung geringer als in Krankenhaus 1. Das Ergebnis von Krankenhaus 2

kann jedoch auch durch die geringere Stichprobengröße verfälscht sein. Da die Ergebnisse vor allem für die Raumtypen mit dem höchsten Flächenanteil – Flure und Bettenzimmer – übereinstimmen und auch die übrigen Werte in einer ähnlichen Größenordnung liegen, lässt sich schließen, dass eine Übertragbarkeit der Werte auf andere Krankenhäuser grundsätzlich gegeben ist. In beiden Krankenhäusern erfolgt die Beleuchtung hauptsächlich über Leuchtstofflampen. Bei einer anderen Wahl der Leuchtmittel (z. B. LED) müsste die Leistung entsprechend der Lichtausbeute angepasst werden.

Eingeschaltete Beleuchtung während des Tages

Die Nutzungszeiten der Beleuchtung wurden durch Begehungen des Krankenhauses erhoben. Dabei wurde jeweils die Anzahl der Räume mit eingeschalteter und ausgeschalteter Beleuchtung zu verschiedenen Tageszeiten für die einzelnen Raumtypen notiert (Tabelle 5.8).

Tabelle 5.8: Anteile der Räume mit eingeschalteter Beleuchtung für die einzelnen Raumtypen während der Zeit von 8 bis 16 Uhr

Raumtyp	Anzahl der Räume			Anteil eingeschalteter Beleuchtung
	eingeschaltet	1/2 eingeschaltet	ausgeschaltet	
Bettzimmer	16	2	52	24 %
Teeküche	5	2	10	38 %
Behandlung	16	3	25	41 %
Büro	25	7	30	49 %
Lager	13	3	9	62 %
Dienstzimmer	17	17	14	65 %
Aufenthalt	10	1	5	66 %
Flur	56	6	9	87 %
Treppenhaus	9	12	2	88 %

Zwischen 8 und 16 Uhr ließ sich keine Abhängigkeit des Anteils der eingeschalteten Beleuchtung von der Tageszeit oder der Beleuchtungsstärke erkennen. Auch zwischen bewölkten und sonnigen Tagen war kein deutlicher Unterschied feststellbar. Diese Ergebnisse decken sich mit den Ergebnissen für die eingeschaltete Beleuchtung in Büroräumen. Auch in Büroräumen ist während der Anwesenheit von Personen häufig ein konstanter Anteil der eingeschalteten Beleuchtung feststellbar. Die Anteile eingeschalteter Beleuchtung in Büroräumen sind jedoch höher als die hier ermittelten Anteile im Krankenhaus. Bettzimmer, Teeküchen und Behandlungsräume weisen die geringsten Anteile eingeschalteter Beleuchtung auf. In den Verkehrsflächen hingegen ist in der Zeit zwischen 8 und 16 Uhr fast 90 % der Beleuchtung eingeschaltet.

Eingeschaltete Beleuchtung während der Nacht

Während der Abend- und Nachtstunden zeigt sich eine deutliche Abhängigkeit des Beleuchtungszustandes von der Uhrzeit. Da während der Nachtstunden der Beleuchtungszustand von außen gut sichtbar ist, wurde hierbei die Beleuchtung über fotografische Aufnahmen der Fassade bestimmt (Abbildung 5.4). So konnte eine größere Anzahl der Räume gleichzeitig erfasst werden. Indem den Fenstern jeder Fassade die zugehörigen Raumtypen zugeordnet wurden, konnte die Erhebung der beleuchteten Räume raumtypenspezifisch erfolgen.

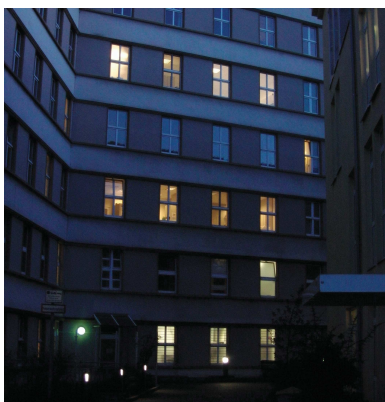


Abbildung 5.4: Aufnahme einer Krankenhausfassade zur Bestimmung des Anteils eingeschalteter Beleuchtung

Die Ergebnisse für die Erhebung während der Nachtstunden sind in Abbildung 5.5 exemplarisch für die Raumtypen Bettzimmer, Dienstzimmer, Büro und Flur dargestellt. Die Zahlenwerte für alle Raumtypen sind in Tabelle A.1 im Anhang zu finden.

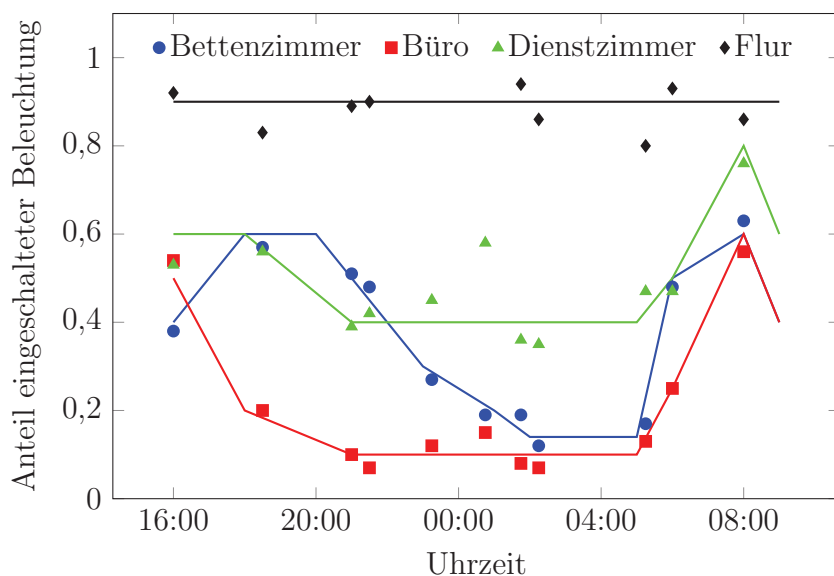


Abbildung 5.5: Anteile eingeschalteter Beleuchtung in vier beispielhaften Raumtypen

Der Anteil der eingeschalteten Beleuchtung sinkt in Büroräumen nach 16 Uhr deutlich

ab. Nach 21 Uhr ist noch in knapp 10% der Räume das Licht eingeschaltet und dieser Wert bleibt während der Nacht konstant. In Betenzimmern sinkt der Anteil der Räume mit eingeschalteter Beleuchtung erst später ab und fällt nur auf etwa 15%. In 40% der Dienstzimmer ist die Beleuchtung auch während der Nacht eingeschaltet. Flure in Pflegebereichen zeigen keine Verringerung der eingeschalteten Beleuchtung während der Nachtstunden.

Kombination der Beleuchtungsprofile Nach der Datenerhebung liegt ein konstanter Wert für den Anteil der eingeschalteten Beleuchtung während des Tages und ein Profil für den Anteil der eingeschalteten Beleuchtung während der Nacht vor. Der Wechsel zwischen dem konstanten Tageswert und dem Nachtprofil erfolgt im Modell in Abhängigkeit der Tageslichtverfügbarkeit. Bei einer Globalstrahlung unterhalb von 50 Wm^2 wird statt des Tageswertes das Nachtprofil gewählt. Dieser Wert entspricht der Dämmerung oder der Bestrahlungsstärke an einem stark bewölkten Wintertag. Ist der eingeschaltete Anteil des Tagesprofils zu einem Zeitpunkt größer als der des Nachtprofils, wird das Nachtprofil gewählt. Das Vorgehen ist in Abbildung 5.6 anhand des Beispiels eines Bettenzimmers für jeweils einen exemplarischen Sommer- und Wintertag dargestellt.

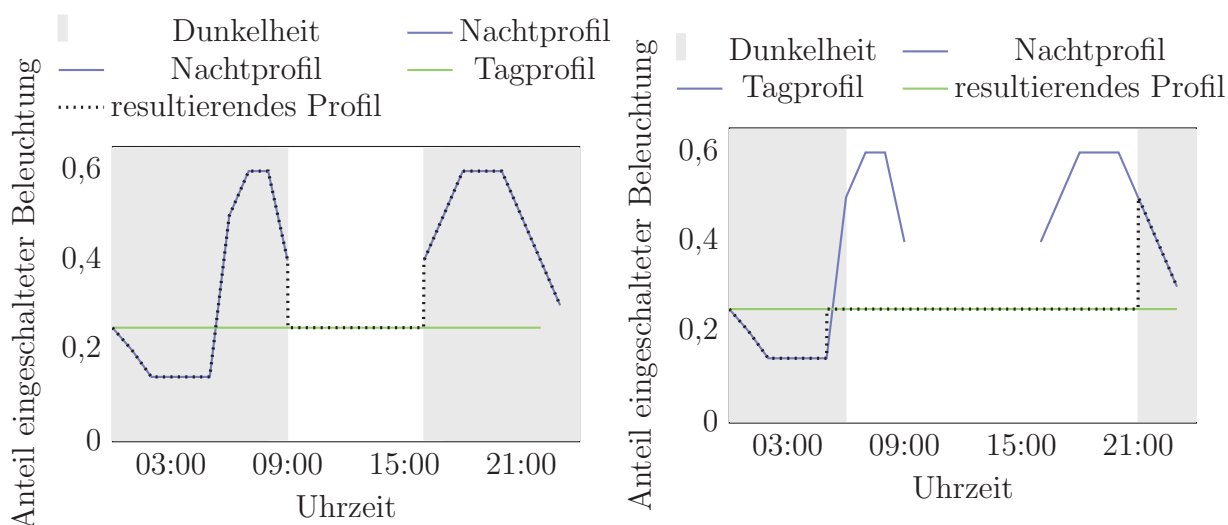


Abbildung 5.6: Schema der Erstellung des Beleuchtungsprofils für ein Bettzimmer an jeweils einem beispielhaften Winter (links)- und Sommertag (rechts)

5.2.4 Messung von Kleingeräten

Da nur wenige Daten zu den spezifischen Nutzungen von Geräten im Krankenhaus vorliegen und auch die Leistungsdaten einiger medizinischer Spezialgeräte unbekannt sind, wurden Messungen der elektrischen Leistung verschiedener Geräte durchgeführt.

Im Folgenden werden zunächst die Messungen von über Steckdosen betriebenen Kleingeräten beschrieben. Über eine Begehung der Räume wurde zunächst die Ausstattung an Kleingeräten einzelner Räume in den Pflegestationen bestimmt (Tabelle 5.9). Diese Geräte wurden anschließend über Voltcraft Energieloggler EL4000, die zwischen das Gerät und die Steckdose geschaltet werden, vermessen (Abbildung 5.7). Der Messzeitraum betrug je-

weils mindestens eine Woche, um sowohl das Nutzerverhalten an Wochentagen als auch an Wochenendtagen zu erfassen. Zu einigen Geräten stehen außerdem Vergleichsmessungen aus einem anderen Krankenhaus zu Verfügung. Zur Auswertung wurde aus den Messdaten jeweils ein auf die Betriebsleistung normiertes Profil erstellt, welches die Nutzung unabhängig von der Geräteleistung abbildet und als Grundlage für die Bildung von Raumprofilen verwendet wird. Im folgenden Abschnitt wird die Auswertung der Messdaten der Kleingeräte am Beispiel der Fernseher in den Bettzimmern beschrieben.

Tabelle 5.9: Durchschnittliche Ausstattungen der Raumtypen in den Pflegestationen

Raumtyp	Ausstattung		Anzahl untersuchter Räume
Bettzimmer	1 Fernseher		10
Büro	1,6 Computer 1,7 Monitore	0,6 Drucker 0,2 Kaffeemaschinen	35
Arztzimmer	2,5 Computer 2,5 Monitore	1 Drucker 0,3 Kaffeemaschinen	6
Dienstzimmer	1,8 Computer 1,8 Monitore	1 Drucker 0,5 Kühlschränke	7
Teeküche	0,8 Wasserkocher 1 Spülmaschine 1 Kühlschrank	1,5 Kaffeemaschinen 0,8 Mikrowellen	17
Behandlungsraum	0,5 Computer 0,5 Monitore 0,4 Drucker	0,3 Ultraschallgeräte 0,1 Röntengeräte	21
unreiner Arbeitsraum	1 Steckbeckenspüle		5



Abbildung 5.7: Kleingerätmessung

Messergebnisse der Fernseher Insgesamt wurden Messungen an Fernsehern in fünf Bettzimmern durchgeführt. Diese machen 1,6 % aller Fernseher in Bettzimmern im

untersuchten Krankenhaus aus. Die Fernseher sind baugleich, sodass die Verbrauchsleistungen nicht variieren. Die Nutzungszeiten hingegen sind vom Nutzer abhängig. Zum Vergleich wurden zwei weitere Fernseher in einem anderen Krankenhaus vermessen. Insgesamt stehen 48 Tagesmessungen aus dem untersuchten Krankenhaus und 17 Tagesmessungen aus dem Vergleichskrankenhaus zur Verfügung. An diesen 65 Tagen war keiner der Fernseher vollständig ausgeschaltet, sondern entweder eingeschaltet oder im Standby-Betrieb. An 21 Tagen verblieb der Fernseher vollständig im Standby-Betrieb, sei es, weil die Patienten nicht ferngesehen haben oder weil das Zimmer unbelegt war.

Die Messung der elektrischen Leistung eines einzelnen Fernsehers im Verlaufe eines Tages ist in Abbildung 5.8 dargestellt. Während des Betriebs steigt die Leistung auf etwa 50 W an. Doch auch während des Standby-Zustands verbleibt eine Leistung von knapp 18 W. Bei den eingesetzten Fernsehern handelt es sich um Röhrenfernseher älterer Bauart. Moderne LCD-Fernseher mit Bildschirmdiagonalen zwischen 22 und 32 Zoll haben je nach Modell eine Betriebsleistung zwischen 20 und 80 W, jedoch eine deutlich verringerte Standby-Leistung von 0,1 bis 0,3 W (vgl. Zygmund, 2015). Die hohe Standby-Leistung der verwendeten Fernseher bietet demnach ein Einsparpotenzial.

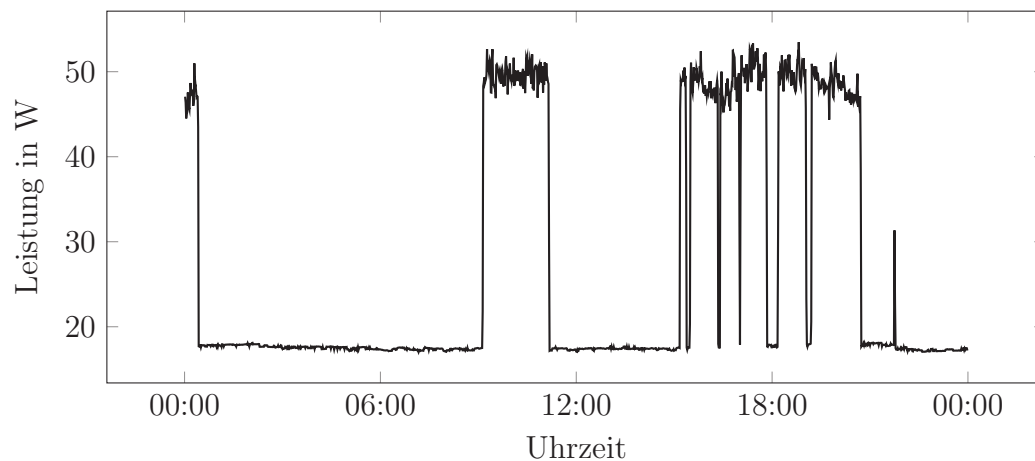


Abbildung 5.8: Tagesmessung eines Fernsehers

Der mittlere Energieverbrauch pro Tag und Fernseher liegt bei 500 Wh, mit einer Spannweite von 230 bis 920 Wh pro Tag. Da die Fernseher nie ausgeschaltet wurden und die Standby-Leistung vergleichsweise hoch ist, werden 61 % des Energieverbrauchs im Standby-Modus verursacht. Die maximal auftretende Leistung lag 5 bis 10 W über der durchschnittlichen Betriebsleistung. Tabelle 5.10 fasst die Ergebnisse zusammen. Die Mittelwerte beziehen sich auf alle Fernseher aus beiden Krankenhäusern.

Die Profile werden nach den Leistungswerten der Fernseher normiert, sodass ein nutzungsabhängiges Profil entsteht, welches unabhängig von dem jeweiligen Gerätetyp ist. Somit wird eine Übertragbarkeit des Profils auf andere Krankenhäuser ermöglicht. Die Verbrauchswerte des Fernsehers im Betrieb und Standby-Betrieb sind von der Ausstattung des jeweiligen Krankenhauses abhängig. Die Nutzung ist hingegen abhängig vom Patienten, der die Einschaltzeiten bestimmt. Da sich die Patienten in den Bettzimmern aus unterschiedlichsten Personengruppen zusammensetzen und in verschiedenen Kran-

Tabelle 5.10: Ergebnisse der Fernsehmessungen

Anzahl vermessener Fernseher KH1/KH2	5 / 2
Gesamtzahl Fernseher im Krankenhaus	ca. 300
Anzahl der Tagesmessungen	65
Mittlere Standby-Leistung	$15,0 \pm 1,5$ W
Mittlere Betriebs-Leistung	$50,0 \pm 5,3$ W
Mittlere maximale Leistung	58 W
Mittlerer Verbrauch am Tag	500 ± 160 Wh
Anteil Standby-Verbrauch am Gesamtverbrauch	61 %
Durchschnittliche Nutzungszeit pro Tag	$3,7 \pm 4,3$ h
Haupt-Nutzungszeit	18:00-22:00 Uhr

kenhäusern eine ähnliche Durchmischung der Personengruppen anzunehmen ist, kann ein vergleichbares Verhalten in verschiedenen Krankenhäusern erwartet werden.

Normierung der Geräteprofile Um die nutzungsabhängigen Profile zu generieren, wird die Leistung jedes einzelnen vermessenen Fernsehers aufgeteilt in eine konstante Standby-Leistung und die tageszeitabhängige Differenz der gemessenen Leistung zur Standbyleistung. Die Differenz der gemessenen Leistung zur Standbyleistung wird durch die Differenz der mittleren Betriebsleistung zur Standbyleistung dividiert. So wird eine normierte Leistung $P_{norm}(t)$ erzeugt, welche den nutzungsabhängigen Betrieb unabhängig von der Geräteleistung abbildet.

$$P_{norm}(t) = \frac{P(t) - P_{Standby}}{P_{Betrieb} - P_{Standby}} \quad (5.2)$$

P_{norm} wird für alle gemessenen Geräte bestimmt und daraus ein mittleres Verbrauchprofil \bar{P}_{norm} generiert. Das normierte Betriebsprofil der Fernseher ist in Abbildung 5.9 dargestellt.

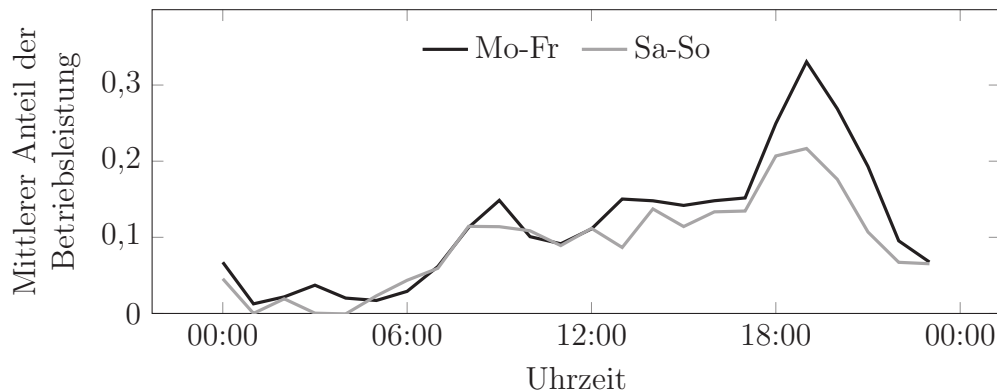


Abbildung 5.9: Mittleres Profil der normierten Betriebsleistung der Fernseher

Hieraus kann über die Multiplikation mit den Verbrauchsdaten $P_{Standby}$ und $P_{Betrieb}$ eines

Gerätes ein gerätespezifisches, nutzungsabhängiges Profil erzeugt werden.

$$P(t) = P_{Standby} + (P_{Betrieb} - P_{Standby})\bar{P}_{norm}(t) \quad (5.3)$$

Im letzten Schritt wird das entstandene Profil vereinfacht, indem kleine Leistungsänderungen geglättet und somit Abschnitte mit konstanter Leistung definiert werden. Das vereinfachte Profil weist dieselbe Gesamtenergiemenge auf, wie das ursprüngliche Profil (Abbildung 5.10). So wird die Anwendung der Profile erleichtert.

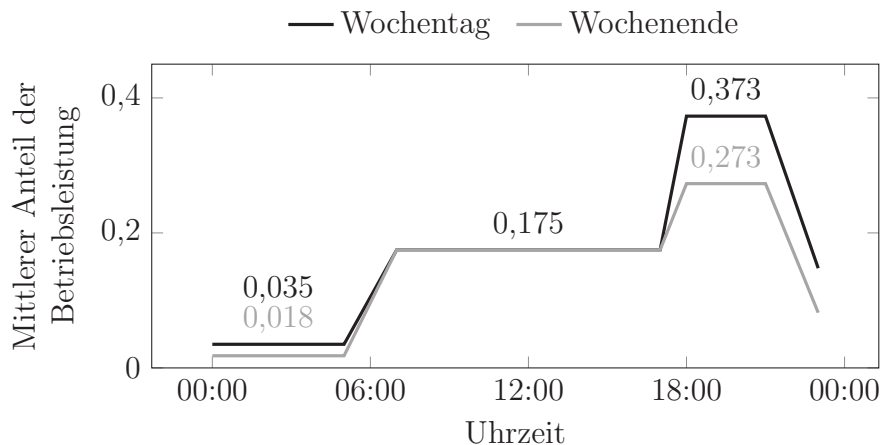


Abbildung 5.10: Vereinfachtes, normiertes Profil des Fernsehers

Analog zum genannten Vorgehen für die Fernseher wurden die mittleren Betriebs- und Standbyleistungen der weiteren vermessenen Geräte bestimmt und die nach diesen Leistungen normierten Profile erstellt. Diese sind in Anhang A.2 aufgeführt und werden als Grundlage für die im weiteren Verlauf des Kapitels vorgestellte Berechnung der Raumprofile verwendet. Die vermessenen Kleingeräte sind zum Teil krankenhausspezifisch (beispielsweise medizinische Geräte), zum Teil sind es Standard-Haushalts- und Bürogeräte. Im letzteren Fall kann jedoch die Nutzung im Krankenhaus von der in anderen Gebäuden abweichen. Auch innerhalb des Krankenhauses zeigte sich ein abweichendes Nutzerverhalten für gleiche Geräte je nach Nutzung, beispielsweise für Computermonitore in Büroräumen im Vergleich zu Dienstzimmern.

5.2.5 Messung von Abteilungen

Messungen von Kleingeräten wurden vor allem in den Pflegestationen durchgeführt, da es diese mehrfach im Krankenhaus gibt. So konnte mit wenigen Messungen eine hohe Anzahl von Räumen im Krankenhaus erfasst werden. Andere Stationen weisen spezifischere Einzelräume auf, die nicht mehrmals im Krankenhaus auftreten, sodass der Aufwand für eine Messung der Einzelgeräte hierbei nicht sinnvoll erschien. Weiterhin war es aus hygienischen oder organisatorischen Gründen nicht überall möglich, Messgeräte zu installieren. So wurden in einigen Bereichen keine einzelnen Räume, sondern der Stromverbrauch ganzer Abteilungen oder Bereiche gemessen. Ebenso wurden zwei Pflegestationen vermessen, die zur Validierung der Methode der Einzelgeräteaggregation dienen sollten.

Die Messungen wurden mit Hilfe der Leistungs- und Energierecorder PEL103 von Chauvin Arnoux durchgeführt. Diese zeichnen über Stromwandler und Spannungsabgreifer nach der Drei-Wattmeter-Methode unter anderem Frequenz, Spannung, Strom, Wirkleistung, Leistungsfaktor und Wirkfaktor auf. Die Messungen wurden jeweils an den elektrischen Unterverteilungen durchgeführt (siehe Abbildung 5.11).



Abbildung 5.11: Messung an einer el. Unterverteilung

Falls dies möglich war, wurden für einige Abteilungen die gemessenen Gesamtverbräuche auf einzelne Räume disaggregiert, um die Übertragbarkeit auf andere Krankenhäuser zu erhöhen und raumscharfe Eingangsdaten für die Simulation zu generieren.

5.2.6 Erstellung von Raumprofilen für Beleuchtung und Geräte

Aus der Kombination der erstellten Profile für Gerätenutzung und Beleuchtung ergeben sich die Raumprofile. Diese wurden für alle in Abschnitt 5.2.2 genannten Raumtypen erstellt. Je nach Raumtyp wurden teilweise unterschiedliche Profile für Montag bis Freitag und Wochenenden/Feiertage generiert.

Lagen Messungen der Einzelgeräte vor, so wurden die Profile für die Gerätenutzung basierend auf dem in Abbildung 5.3 dargestellten Schema erstellt. Die Anzahl eines Gerätes pro Raum wurde mit der mittleren Leistung und dem Nutzungsprofil dieses Gerätes multipliziert. Die so entstandenen einzelnen Geräteprofile ergeben in der Summe das Geräteprofil des Raumtyps. Die Profile für die Beleuchtungsleistung eines Raumtyps basieren auf den erhobenen Beleuchtungsleistungen in Tabelle 5.7 sowie den Anteilen der eingeschalteten Beleuchtung in den jeweiligen Raumtypen aus Tabelle 5.8 und Abbildung 5.5.

Die sich so ergebenden Profile für Geräte und Beleuchtung sind für die einzelnen Raumtypen in Anhang A.5 dargestellt. Zum Teil, wenn eine Datenaufnahme einzelner Geräte nicht möglich oder zu aufwändig war, wurde statt der Nutzung von Einzelgeräteprofilen auf die Messung von Gesamtabteilungen zurückgegriffen und hieraus in Profile für die Einzelräume generiert (siehe Anhang A.4).

5.2.7 Validierung der Raumprofile

Zur Überprüfung der Raumprofil-Methode wurde der Verbrauch einer Abteilung aus den oben beschriebenen Raumprofilen aggregiert und mit dem gemessenen Gesamtverbrauch

dieser Abteilung verglichen. Dazu wurde eine Etage des Wahlleistungsgebäudes ausgewählt, in der keine Gerätemessung durchgeführt wurde. Die Raumprofile wurden demnach auf Basis der Geräte der anderen Stationen erstellt. Somit lässt sich überprüfen, inwieweit das Nutzerverhalten auf andere Bereiche desselben Krankenhauses übertragbar ist.

Tabelle 5.11 listet die in der Etage vorhandenen Raumtypen auf. Der gemessene elektrische Energieverbrauch eines durchschnittlichen Werktages der Station beträgt 214 kWh/d . Am Wochenende ist der Verbrauch mit 208 kWh/d leicht geringer. Über die aggregierten Raumprofile ergibt sich ein Verbrauch unter der Woche von 203 kWh/d und ein Verbrauch am Wochenende von 195 kWh/d . Somit wird der tatsächliche Verbrauch durch die Aggregation der Raumprofile um 5% an Werktagen und 6% an Wochenendtagen unterschätzt. Dies resultiert daraus, dass einige Verbraucher nicht erfasst wurden oder die Nutzung von der erwarteten Nutzung abweicht.

Tabelle 5.11: Raumtypen in der Wahlleistungsstation

Raumtyp	Anzahl	Fläche in m^2	Raumtyp	Anzahl	Fläche in m^2
Bettzimmer	20	687	Teeküche	3	28
Flur	3	449	Bad/Lager	3	13
Aufenthalt	1	58	Arbeitsraum	1	4
Dienstzimmer	1	52	Speisewagen	1	11
Behandlung	41	41			

In Abbildung 5.12 sind die gemessenen und die durch Addition der Raumprofile entstandenen Tagesgänge der elektrischen Leistung für die Abteilung dargestellt. Die Leistung wird durch die Raumtypen während der Nachtstunden leicht unterschätzt und während des Tages etwas überschätzt. Die maximale relative Abweichung tritt an Wochentagen um 03:00 Uhr nachts auf und beträgt 30%. Tagsüber liegt der Fehler unterhalb 20%.

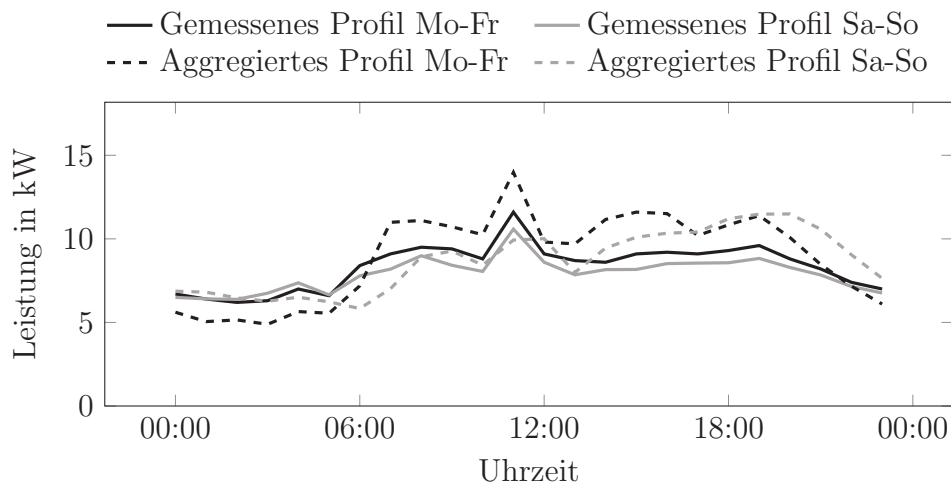


Abbildung 5.12: Vergleich von gemessenen und durch Aggregation der Raumprofile gebildete Lastgänge der Abteilung

5.2.8 Weitere elektrische Verbraucher

Während die Kleingeräte durch ihre hohe Anzahl im Krankenhaus signifikant zum Energieverbrauch des Krankenhauses beitragen, haben die Großverbraucher auch als einzelnes Gerät einen nicht zu vernachlässigenden Einfluss auf den Verbrauch. Um diesen abschätzen zu können, wurden Messungen der elektrischen Leistung durchgeführt.

Die vermessenen Großverbraucher umfassen medizinische Geräte wie MRT, CT sowie weitere Großverbraucher wie Aufzüge oder die Druckluftversorgung. Eine Übersicht über die vermessenen Großgeräte und ihren Energieverbrauch ist in Tabelle 5.12 zu finden.

Tabelle 5.12: Vermessene Großgeräte

Gerät	Energieverbrauch in MWh/a
MRT	103,2
CT	23,5
PET/CT	18,0
Röntgengerät	3,7
Aufzüge	12,4
Druckluftherzeugung	73,9

Analog zum Vorgehen bei der Erfassung der Kleingeräte wurde zunächst der arithmetische Mittelwert der gemessenen Leistung aller Geräte über die jeweilige Tageszeit jeden Tages gleichen Typs (Wochentag oder Wochenendtag/Feiertag) gebildet und anschließend über alle Minutenwerte einer Stunde eines Tages. Auf diese Weise wurden Stundenwerte für die mittleren täglichen Profile generiert. Die Profile wurden wiederum vereinfacht, um die Anwendung zu erleichtern. Dies ist in Abbildung 5.13 am Beispiel des MRTs dargestellt. Die übrigen Profile sind im Anhang A.3 zu finden.

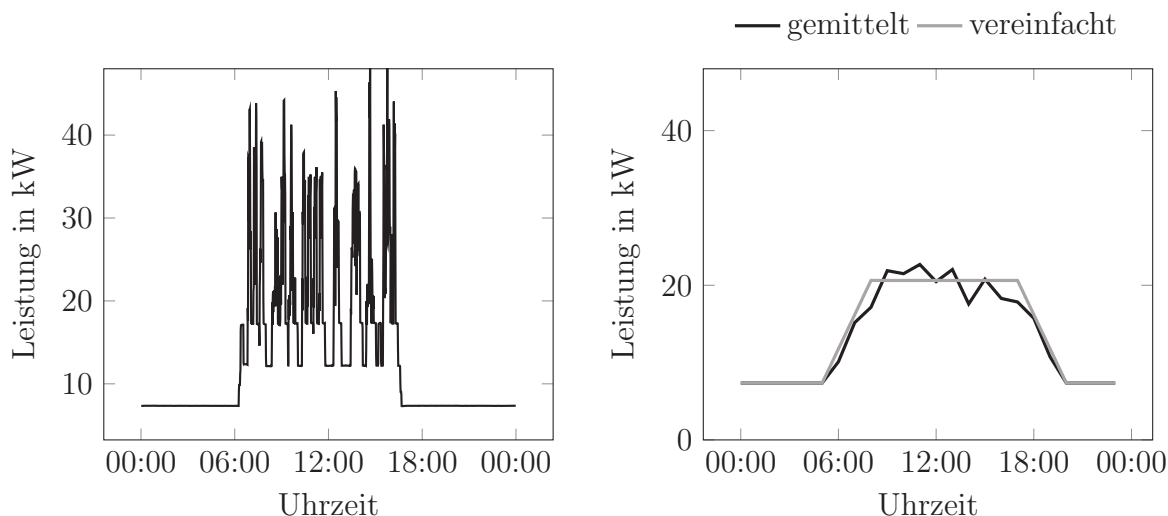


Abbildung 5.13: links: gemessener Lastgang des MRTs, rechts: gemittelter und vereinfachter Lastgang des MRTs

Eine Normierung der Profile über die Betriebs- und Standby-Leistung zur expliziten Erfassung des Nutzerverhaltens wie bei den Kleingeräten wurde nicht vorgenommen. Bei den Großgeräten ist kein eindeutiger Einfluss des Nutzerverhaltens ablesbar. Vielmehr wird der Leistungsverlauf durch das Betriebsverhalten der Geräte bestimmt.

Energiebedarf für die Trinkwarmwasserbereitung

Die Trinkwarmwassererwärmung erfolgt zentral in jedem einzelnen Gebäude des Krankenhauses. Diese wurde jeweils einzeln vermessen, sodass getrennte Daten für den Energiebedarf der Trinkwarmwassererwärmung für die einzelnen Gebäude vorliegen. Somit ist es möglich, den Trinkwarmwasserbedarf abhängig von der Nutzung zu bestimmen. In Tabelle 5.13 sind die Energieverbräuche für die einzelnen Gebäude und das Gesamtkrankenhaus als absolute Werte und mittlere Werte pro Bett und pro Quadratmeter aufgeführt. Weiterhin ist die Nutzung der verschiedenen Gebäudeteile angegeben.

Tabelle 5.13: Gemessene Energieverbräuche der Trinkwarmwassererwärmung für die einzelnen Gebäude und das Gesamtkrankenhaus

Gebäude	Energieverbrauch			Nutzung
	in kWh/d	in kWh/m ² a	in kWh/Bett d	
Haupthaus	2408	39	6,2	Pflegestationen, ambulante Stationen, Küche, ZSVA
Wahlleistung	596	50	6,6	Pflegestationen
UB1	226	38	-	Ambulante Behandlungsbereiche, OP
UB2	246	48	-	Ambulante Behandlungsbereiche, OP, Intensivstation, Cafeteria
UB3	200	27	-	Ambulante Behandlungsbereiche
Gesamt	3676	41	7,7	

Das Gebäude UB3, welches rein ambulante Stationen enthält, weist den geringsten Verbrauch pro Fläche auf, gefolgt von Gebäude UB1, welches zusätzlich zu den ambulanten Bereichen eine OP-Station beherbergt. Den höchsten Verbrauch haben das Wahlleistungsgebäude, das allein aus Pflegestationen besteht und das Gebäude UB2, in welchem Intensivstation und Cafeteria gelegen sind. Im Haupthaus sind neben den medizinischen Bereichen auch viele Bürotrakte mit geringen Wasserverbräuchen enthalten, was die geringeren Energieverbräuche für die Trinkwassererwärmung im Vergleich zum Wahlleistungsgebäude erklärt. Pro Bett ergibt sich ein mittlerer Verbrauch von 7,7 kWh/d für das gesamte Krankenhaus und ein Verbrauch von 6,6 kWh/d für das Gebäude, welches reine Pflegestationen enthält.

Die Profile der thermischen Leistung der Trinkwarmwassererwärmung für einen durchschnittlichen Werktag sind in Abbildung 5.14 dargestellt. Die höchsten absoluten Verbräuche treten im Haupthaus auf. Das Haupthaus und das Wahlleistungsgebäude weisen

zudem die ausgeprägtesten Unterschiede im Tagesgang auf. Hier ist eine Spitze der Wärmeleistung zwischen 07:00 und 10:00 Uhr zu erkennen. In den übrigen Gebäuden treten keine ausgeprägten Unterschiede im Tagesgang auf, mit Ausnahme von Gebäude UB2, welches die Cafeteria enthält. Hier tritt die Spitzenleistung gegen 12:00 Uhr mittags auf. In den neueren Gebäuden ist in die Trinkwarmwassererwärmung ein separater Reaktionsbehälter integriert, in dem das Trinkwarmwasser für mindestens vier Minuten auf über 70 °C erwärmt wird, um die Legionellengefahr zu senken. In den übrigen Gebäuden wird die Temperatur des Trinkwarmwassersystems einmal täglich auf über 70 °C erwärmt, um Legionellen abzutöten. Dies lässt sich an der deutlichen Spitze der Wärmeleistung in den Nachtstunden erkennen.

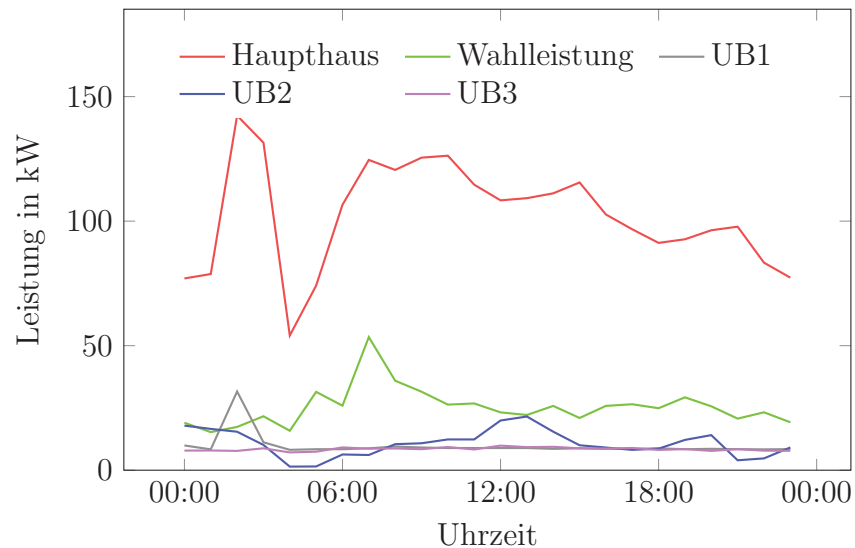


Abbildung 5.14: Mittlerer Tagesgang eines Wochentages der thermischen Energie zur Trinkwarmwassererwärmung für die einzelnen Gebäude des Krankenhauses

5.2.9 Raumtemperaturen im Krankenhaus

Die Raumtemperaturen im Krankenhaus wurden mit zwei unterschiedlichen Methoden ermittelt. Einerseits wurde bei Rundgängen durch das Krankenhaus ein Thermometer mitgeführt, mit dem die Momentanwerte der Temperatur in verschiedenen Räumen aufgezeichnet wurden. Andererseits erfasst die Gebäudeleittechnik im Wahlleistungsgebäude die Temperaturen in den Bettzimmern. Diese wurden über einen Zeitraum von einer Woche im Dezember ausgelesen.

Bei den Rundgängen wurden hauptsächlich Pflegestationen und Behandlungsbereiche erfasst. In anderen Bereichen des Krankenhauses können abweichende Temperaturen auftreten, beispielsweise wurden im Küchenbereich Temperaturen von bis zu 28 °C gemessen. Die Rundgänge fanden im Frühjahr, bei Außentemperaturen von 12 °C, 13 °C und 19 °C, statt. Mit steigender Außentemperatur stieg auch die mittlere Raumtemperatur (Abbildung 5.15). Am kältesten Tag lag diese im Mittel bei 21,1 °C und schwankte zwischen 18,1 °C und 24,4 °C. Die Außentemperatur an Tag 2 war nur ein Grad höher als an Tag 1.

Tag 2 trat jedoch später im Jahr nach einer Reihe wärmerer Tage auf. An diesem Tag herrschte eine mittlere Raumtemperatur von $22,8^{\circ}\text{C}$. Am wärmsten der drei Tage lag die Temperatur im Mittel bei $24,1^{\circ}\text{C}$.

Abbildung 5.16 gibt die aus der GLT ausgelesenen Temperaturen über einen Zeitraum von einer Woche wieder. Die Außentemperatur lag in diesem Zeitraum zwischen 0 und 15°C . Die mittleren Temperaturen in den beiden Räumen lagen bei $21,5^{\circ}\text{C}$ und $21,3^{\circ}\text{C}$ und schwankten zwischen $17,5^{\circ}\text{C}$ und $22,6^{\circ}\text{C}$.

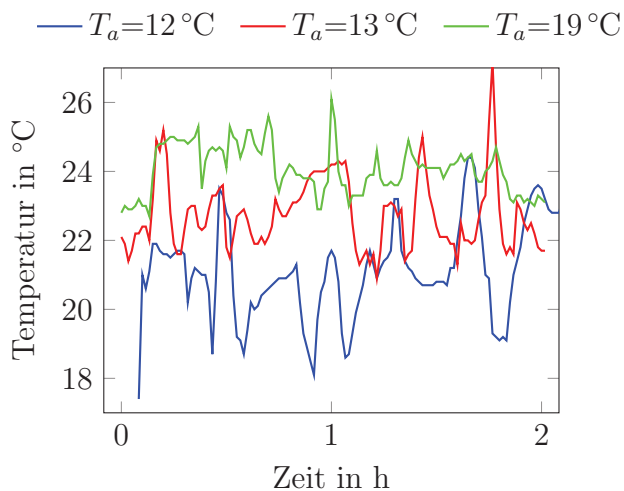


Abbildung 5.15: Raumtemperaturverlauf bei drei Krankenhausrundgängen

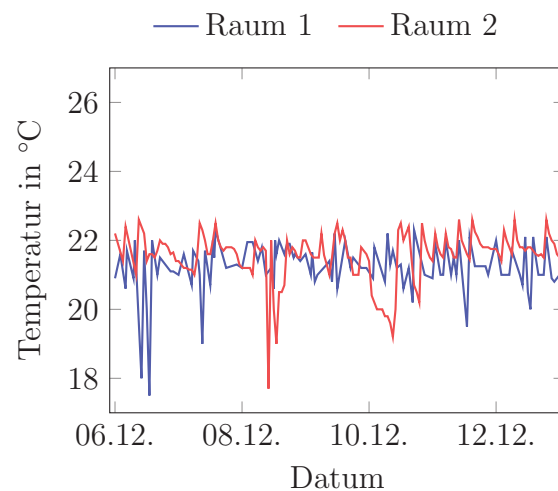


Abbildung 5.16: Raumtemperaturverlauf in zwei Bettzimmern aus der GLT

Die Schwankung der Temperatur beim Rundgang ist deutlich höher als bei den GLT-Daten. Dies ist zum einen damit zu begründen, dass die Temperatur verschiedener Räume erfasst wurde. Zum anderen wurden die Temperaturen in minütlichen Abständen aufgezeichnet, während in der GLT nur stündliche Werte ausgelesen wurden. Die aus der GLT ausgelesenen Temperaturen und die bei der Raumbegehung an Tag 1 gemessenen Temperaturen liegen in etwa in derselben Höhe. Die Tage 2 und 3 zählen nicht mehr zur Heizperiode und die Raumtemperaturen liegen höher. Für die Heizperiode, für die die Soll-Temperatur in der Modellierung festgelegt werden muss, wird für dieses Krankenhaus eine Temperatur zwischen 21°C und $21,5^{\circ}\text{C}$ gewählt. Diese Temperaturen sind deutlich geringer als der im Allgemeinen angesetzte Wert von 22 bis 24°C in Bettzimmern.

5.2.10 Lüftung

Das Eindringen von kalter Luft durch Fensteröffnung stellt einen wesentlichen Beitrag zum Energieverlust des Gebäudes dar. Um diesen zu bestimmen, wurde der Anteil der geöffneten Fenster in Abhängigkeit der Außentemperatur über fotografische Aufnahmen der Außenfassaden des Krankenhauses bestimmt. Die Dauer der Fensteröffnung wurde nicht betrachtet, lediglich die Anzahl der geschlossenen und geöffneten Fenster zu einem bestimmten Zeitpunkt wurde erfasst. Geöffnet bedeutet in diesem Zusammenhang, dass die Fenster gekippt waren. Vollständig geöffnete Fenster lagen kaum vor, sodass keine

Unterscheidung bezüglich des Öffnungsgrades der Fenster vorgenommen wurde.

Da sich in der Literaturanalyse zeigte, dass die Umweltvariable mit dem stärksten Einfluss auf das Fensteröffnungsverhalten die Außentemperatur ist, wird die Fensteröffnung in Abhängigkeit der Außentemperatur ausgewertet (Abbildung 5.17). Jeder Punkt entspricht einem Datensatz, bei dem bei einer bestimmten Außentemperatur alle Fenster dieses Raumtyps erfasst und der Anteil der geöffneten und geschlossenen Fenster bestimmt wurde.

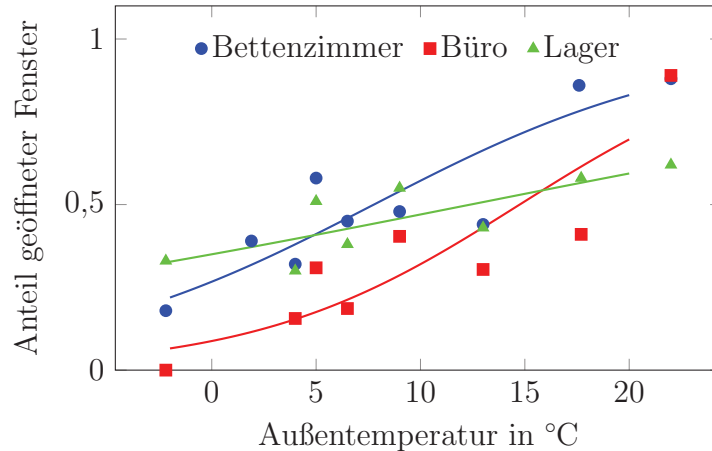


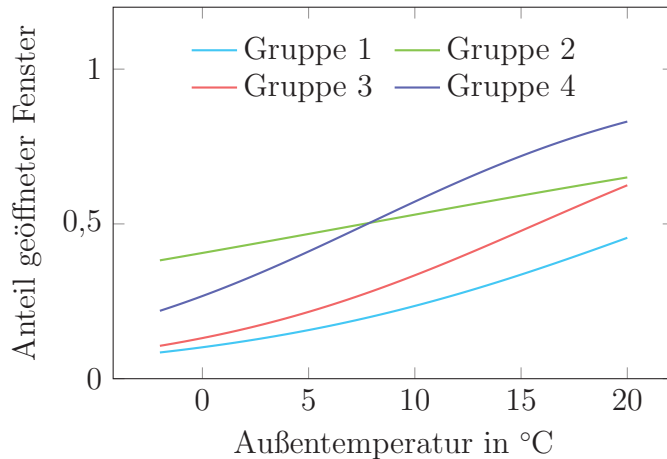
Abbildung 5.17: Anteile geöffneter Fenster in Abhängigkeit der Außentemperatur

Bei allen drei Raumtypen nimmt der Anteil der geöffneten Fenster mit steigender Außentemperatur zu. Bettenzimmer haben bei fast allen Temperaturen den höchsten Anteil geöffneter Fenster, während in Büroräumen am wenigsten Fenster geöffnet sind. Da in Lagerräumen in der Regel nicht dauerhaft Personen anwesend sind, ist zu vermuten, dass das Fensteröffnungsverhalten weniger stark aus Komfortgründen vom Nutzer gesteuert wird, sondern vielmehr einmal geöffnete Fenster vergessen und längere Zeit geöffnet gelassen werden, als in anderen Räumen. Somit zeigt sich eine geringere Abhängigkeit von der Außentemperatur.

Um das Fensteröffnungsverhalten in Abhängigkeit der Außentemperatur im Modell abzubilden, wurde die Logit-Funktion (Gleichung 5.1) gewählt. Die Koeffizienten a und b wurden mit der Methode der kleinsten Quadrate aus den erhobenen Daten bestimmt. Diese Funktion ist ebenfalls in Abbildung 5.17 dargestellt. Die Datenpunkte der übrigen Raumtypen und die Koeffizienten der Logit-Funktion aller Raumtypen sind in Tabelle B.1 und Tabelle B.2 im Anhang zu finden. Hier sind auch die mittleren Raumzahlen der betrachteten Räume aufgeführt. Die meisten außenliegenden Räume des Krankenhauses sind Bettenzimmer, sodass für diese die größte Datenmenge vorliegt und somit die statistisch sichersten Aussagen getroffen werden können.

Bei der Betrachtung der resultierenden Kurven aller Raumtypen lassen sich vier Gruppen von Räumen mit jeweils ähnlichem Verhalten erkennen. Um die Abbildung des Fensteröffnungsverhaltens im Modell zu erleichtern und nicht für jeden Raumtyp eigene Koeffizienten eingeben zu müssen, wird vorgeschlagen, nur eine Unterteilung bezüglich dieser vier

Gruppen vorzunehmen. Abbildung 5.18 gibt die gemittelten Kurven für die vier Gruppen und Tabelle 5.14 die Koeffizienten der Logit-Funktion der vier Gruppen wieder.



Gruppe	a	b
Gruppe 1	-2,18	0,10
Gruppe 2	-0,38	0,05
Gruppe 3	-1,89	0,12
Gruppe 4	-1,01	0,13

Abbildung 5.18: Anteile geöffneter Fenster für die vier Raumtypengruppen

Tabelle 5.14: Koeffizienten für das Logit-Modell

Gruppe 1 besteht aus Fluren und Treppenhäusern, die eine geringere Fensteröffnung als die übrigen Räume aufweisen. Gruppe 2 enthält Lagerräume, Dienstzimmer und Teeküchen. Diese weisen auch bei geringen Temperaturen einen vergleichsweise hohen Anteil an geöffneten Fenstern auf, der mit steigenden Außentemperaturen jedoch weniger stark zunimmt als bei anderen Raumtypen. Gruppe 3 umfasst die Raumtypen Büro, Arztzimmer, Behandlungsraum und Aufenthaltsraum. Diese zeigen einen stärkeren Anstieg des Anteils der geöffneten Fenster mit steigender Außentemperatur. Bettzimmer bilden eine eigene Kategorie (Gruppe 4), die die höchsten Fensteröffnungsanteile aufweist.

5.2.11 Fazit

Da nur wenige Daten für Beleuchtung, Gerätenutzung und Fensteröffnung in Krankenhäusern vorliegen und die Standardwerte und Korrelationen, die es für andere Gebäudetypen gibt, durch die abweichende Nutzung nicht anwendbar sind, wurden in diesem Kapitel nutzungsabhängige Daten für Krankenhäuser erhoben. Indem zuvor alle Krankenhausräume zu Raumtypen gruppiert wurden und für jeden dieser Raumtypen Profile für Beleuchtung, Gerätenutzung und Fensteröffnung erstellt wurden, konnten die inneren Lasten für alle Räume des Krankenhauses bestimmt werden. In der Simulation wird dann für jede Zone der entsprechende Raumtyp mit den hinterlegten mittleren Profilen ausgewählt, sodass die inneren Lasten der Zone definiert sind.

Zur Validierung des Verfahrens wurde zum einen der elektrische Energieverbrauch durch Beleuchtung und Geräte einer Station gemessen und zum anderen durch die Aggregation der Beleuchtungs- und Geräteprofile aller Räume der Station berechnet. Zwischen den gemessenen und berechneten Profilen trat eine Abweichung auf, da die Ausstattungen der Räume und die Nutzung der Geräte einen Mittelwert des jeweiligen Raumtyps darstellen

und Abweichungen in der tatsächlichen Ausstattung und Nutzung des jeweiligen Raums auftreten können. Da der Energieverbrauch pro Tag zwischen Messung und Berechnung nur um 5 % (Mo-Fr) bzw. 6 % (Wochenende) abweicht, wird die Verwendung der Methode als gerechtfertigt angesehen.

Ohne die Erhebung dieser Daten wäre die Modellierung nicht möglich gewesen, da nicht ausreichend Daten für Krankenhäuser vorlagen. Eine Verwendung der Daten von anderen Gebäudetypen hätte zu erheblichen Fehlern geführt. Dies zeigt sich beispielsweise beim Vergleich der erhobenen Werte für die Anteile der geöffneten Fenster mit Literaturdaten für Bürogebäude (Abbildung 5.19). Die Anteile der geöffneten Fenster für Bürogebäude und Büroräume in Krankenhäusern sind zwar vergleichbar, der Anteil der geöffneten Fenster in anderen Raumtypen des Krankenhauses (insbesondere in Bettenzimmern) ist jedoch deutlich höher. Eine Annahme desselben Lüftungsverhaltens wie für andere Gebäudetypen würde somit zu einer Unterschätzung der Lüftungswärmeverluste in Krankenhäusern führen.

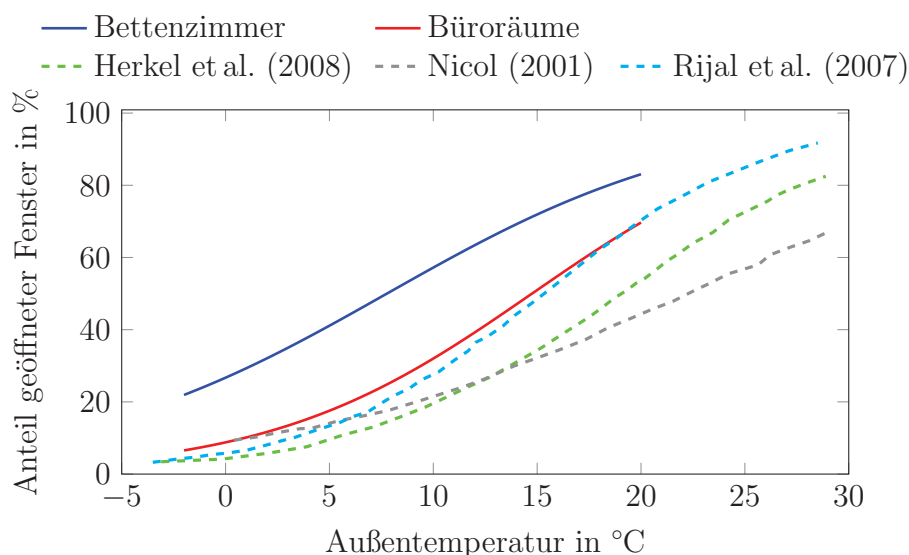


Abbildung 5.19: Vergleich des erhobenen Anteiles geöffneter Fenster für Büroräume und Bettenzimmer im Krankenhaus mit Werten aus der Literatur

Die Verwendbarkeit der Profile in weiteren Krankenhäusern muss noch überprüft werden. Durch die Normierung der Geräteprofile mit Hilfe der installierten Betriebs- und Standbyleistungen bilden die Profile das Nutzerverhaltens unabhängig von den verwendeten Geräteleistungen ab. Somit wird die Anwendung der Profile in anderen Krankenhäusern grundsätzlich erleichtert.

Kapitel 6

Sensitivität und Unsicherheit der Eingangsdaten

Da die Wahl der Eingangsdaten einen großen Einfluss auf die Simulationsergebnisse hat, ist es unabdingbar, diesen Einfluss zu kennen. Zu diesem Zweck werden Sensitivitäts- und Unsicherheitsanalysen durchgeführt. Nach einer Vorstellung des Stands der Forschung zu diesem Thema und einer vergleichenden Auswertung der Parametersensitivitäten verschiedener Literaturstudien werden im Rahmen der Fallstudie Sensitivitäts- und Unsicherheitsanalysen für verschiedene Gebäudeteile des Krankenhauses durchgeführt.

6.1 Hintergrund zur Sensitivität der Eingangsdaten

In diesem Abschnitt werden die Gründe für die Durchführung von Sensitivitäts- und Unsicherheitsanalysen genannt und die später angewandten Methoden erläutert.

6.1.1 Definition und Zielsetzung von Unsicherheits- und Sensitivitätsanalysen

Über eine Sensitivitätsanalyse wird ermittelt, welche Parameter durch eine Änderung ihrer Werte eine hohe Änderung der Simulationsergebnisse hervorrufen. Eine Unsicherheitsanalyse hingegen dient dazu, die Unsicherheit der Ergebnisgrößen zu quantifizieren, diese jedoch nicht einzelnen Parametern zuzuordnen. Die Ergebnisunsicherheit wird durch die Unsicherheiten der sensitiven Parameter und die Modellannahmen erzeugt. Nicht jeder sensitive Parameter muss jedoch in hohem Maße für die Unsicherheit des Ergebnisses verantwortlich sein. Ist der Parameterwert mit hoher Genauigkeit bekannt, weist er nur eine geringe Unsicherheit auf (Loucks und Beeck, 2005). Idealerweise sollten jeweils beide Analysen durchgeführt werden, wobei in der Regel eine Sensitivitätsanalyse auf eine Unsicherheitsanalyse folgt (Saltelli et al., 2008). Beide Analysen können häufig mit denselben Modellrechnungen durchgeführt werden (Loucks und Beeck, 2005).

Verwendung finden Sensitivitäts- und Unsicherheitsanalysen in allen Phasen und Anwendungen der Gebäudesimulation. Mit ihrer Hilfe kann laut Lomas und Eppel (1992) bestimmt werden,

- für welche Parameter die Werte besonders sorgfältig gewählt werden müssen, damit die Genauigkeit der Ergebnisse nicht kompromittiert wird.

- für welche Parameter weitere Untersuchungen nötig sind, um diese genauer zu bestimmen.
- welche maximale Genauigkeit erwartet werden kann.
- wie die Wahrscheinlichkeitsverteilung der Simulationsergebnisse aussieht und somit die Wahrscheinlichkeit, dass eine Ergebnisgröße, z. B. der Energieverbrauch, einen bestimmten Wert überschreitet.
- wie signifikant die Unsicherheiten durch numerische Parameter (beispielsweise Zeitschrittweiten), Modellannahmen und die Wahl von bestimmten Rechenalgorithmen das Ergebnis beeinflussen.

Die Durchführung einer Sensitivitätsanalyse führt somit zu einem besseren Verständnis der Zusammenhänge einer Simulation (Lam und Hui, 1996). Über eine Sensitivitätsanalyse können zudem die Gebäudeelemente, die einen hohen Einfluss auf den Energiebedarf haben und damit einen guten Ansatz für Sanierungs- und Optimierungsmaßnahmen bieten, identifiziert werden (Lam et al., 2008).

6.1.2 Methoden

Im Folgenden werden Methoden zur Durchführung von Sensitivitäts- und Unsicherheitsanalysen vorgestellt. Die Methode nach Morris und die Monte-Carlo-Analyse werden im Detail erläutert, da diese in der eigenen Untersuchung in Kapitel 6.3 angewandt werden.

Sensitivitätsanalyse

Bei der Sensitivitätsanalyse wird zwischen lokalen und globalen Methoden unterschieden. Bei lokalen Methoden werden alle Variationen der Parameter jeweils nur an einem einzelnen Punkt betrachtet, indem jeder Parameter einzeln von seinem Basiswert aus variiert wird. Somit sind lokale Methoden nur für strikt lineare Modelle geeignet (Saltelli und Annoni, 2010). Gebäudesimulationsmodelle wiederum sind in der Regel nicht linear (Eisenhower et al., 2012a). Dennoch gehören lokale Analysen aufgrund ihrer Einfachheit zu den meist angewandten Methoden, auch wenn ihre Anwendung häufig nicht gerechtfertigt ist. Kann die Linearität und Superpositionierbarkeit der einzelnen Sensitivitäten nicht garantiert werden, so ist eine globale Analyse das geeignetere Mittel zur Sensitivitätsanalyse. Dies ist beispielsweise bei hohen Unsicherheiten der Fall, bei denen die Eingangsparameter über einen breiten Wertebereich variiert werden (Saltelli und Annoni, 2010).

Bei globalen Methoden wird mit Hilfe von Monte-Carlo-Simulationen der gesamte Parameterraum abgedeckt und so werden auch Interaktionen der Parameter sowie Nichtlinearitäten berücksichtigt. Dazu wird zunächst eine Vielzahl von Modellrechnungen mit zufällig ausgewählten Werten der Eingangsparameter durchgeführt. Aus den Simulationsergebnissen aller Modellrechnungen werden anschließend in Abhängigkeit der jeweils gewählten Eingangsparameter Sensitivitäts- oder Regressionskoeffizienten berechnet, die die Sensitivität der Eingangsparameter quantifizieren. Beispiele für globale Methoden sind varianzbasierte Methoden, Regressionsmethoden oder Meta-Modelle (Tian, 2013).

Einen Mittelweg zwischen lokaler und globaler Analyse stellt das Screening dar, bei dem

mehrere Durchläufe einer lokalen Analyse durchgeführt werden (Garcia Sanchez et al., 2014). Die am häufigsten angewandte Methode ist das sogenannte Screening nach Morris. Dieses wurde für Modelle entwickelt, die eine mittlere bis hohe Parameterzahl aufweisen und die zu kompliziert sind für klassische mathematische Methoden (Morris, 1991). In verschiedenen Studien wurden die Ergebnisse eines Morris-Screenings mit den Ergebnissen globaler Sensitivitätsanalysen verglichen und es zeigte sich, dass die Methode gut geeignet ist, um die einflussreichsten Parameter zu identifizieren (Wit, 1997; Campolongo et al., 2007). Für eine Unsicherheitsanalyse sind die Simulationsrechnungen jedoch nicht geeignet, da sich keine Konvergenz zum mittleren Ergebniswert ergibt (Tian, 2013).

Bei allen Methoden ist es wichtig, die richtigen Eingangswerte für die Analyse auszuwählen und alle relevanten Ergebnisgrößen zu untersuchen (Lam und Hui, 1996; Saltelli et al., 2008). Beispielsweise haben einige Parameter einen entgegengesetzten Einfluss auf die Heiz- und Kühllasten, sodass sich ihr Einfluss bei einer Betrachtung der Gesamtenergie aufhebt (Hygh et al., 2012). Die Wahl der untersuchten Ergebnisgröße sollte sich an der Frage orientieren, die das Modell beantworten soll (Saltelli et al., 2006).

Morris-Methode

Da in der später folgenden eigenen Untersuchung das Screening nach Morris angewandt wird, wird dieses in diesem Abschnitt im Detail vorgestellt. Mit dieser Methode lässt sich für jeden Parameter ermitteln, ob dessen Einfluss auf die Ergebnisgrößen a) vernachlässigbar, b) linear und additiv oder c) nichtlinear ist und damit Interaktionen mit anderen Parametern aufweist (Morris, 1991). Für jeden Parameter x_i wird aus den Simulationsrechnungen ein Mittelwert μ_i und eine Standardabweichung σ_i der durch diesen Parameter hervorgerufenen Abweichungen gebildet. Diese geben Auskunft über das Verhalten des Modells bezogen auf den jeweiligen Parameter. Ein hoher Mittelwert bedeutet, dass der Parameter einen hohen Einfluss auf das Simulationsergebnis hat, während eine hohe Standardabweichung anzeigt, dass die Ergebnisse stark variieren und somit Interaktionen mit den anderen Parametern auftreten (Morris, 1991).

In Abbildung 6.1 ist ein Schema eines Morris-Screenings für ein Modell mit $k=3$ Parametern a, b und c dargestellt. Jede Zeile der Matrix auf der linken Seite der Abbildung entspricht den Eingangsdaten einer Simulationsrechnung. Zur Durchführung des Screenings werden die Parameter in p Level diskretisiert, sodass die Parameter Werte im Bereich $\{0, 1/(p-1), 2/(p-1), \dots, 1\}$ annehmen. In dem Beispiel in der Abbildung wurde $p = 4$ gewählt. Es werden Sequenzen aus Simulationsdurchläufen berechnet, bei denen jeweils ein einzelner Parameter um ein festgelegtes Vielfaches von $1/(p - 1)$ (im Schema wurde $2/3$ gewählt) geändert wird. Diese Sequenz wird als Simulationstrajektorie bezeichnet. Somit resultieren bei k zu betrachtenden Eingangsparametern $k + 1$ Simulationsdurchläufe. Im dargestellten Schema mit drei Parametern besteht eine Trajektorie demnach aus vier Simulationsrechnungen. Der Anfangspunkt jeder Trajektorie wird zufällig gewählt, ebenso wie die zu variierende Variable. Dies wird r -mal wiederholt und für jede Trajektorie werden k elementare Effekte EE gebildet. Dies sind Approximationen der partiellen ersten Ableitungen des Modells. Anschließend werden über die elementaren Effekte jedes Parameters i der Mittelwert μ_i und die Standardabweichung σ_i gebildet.

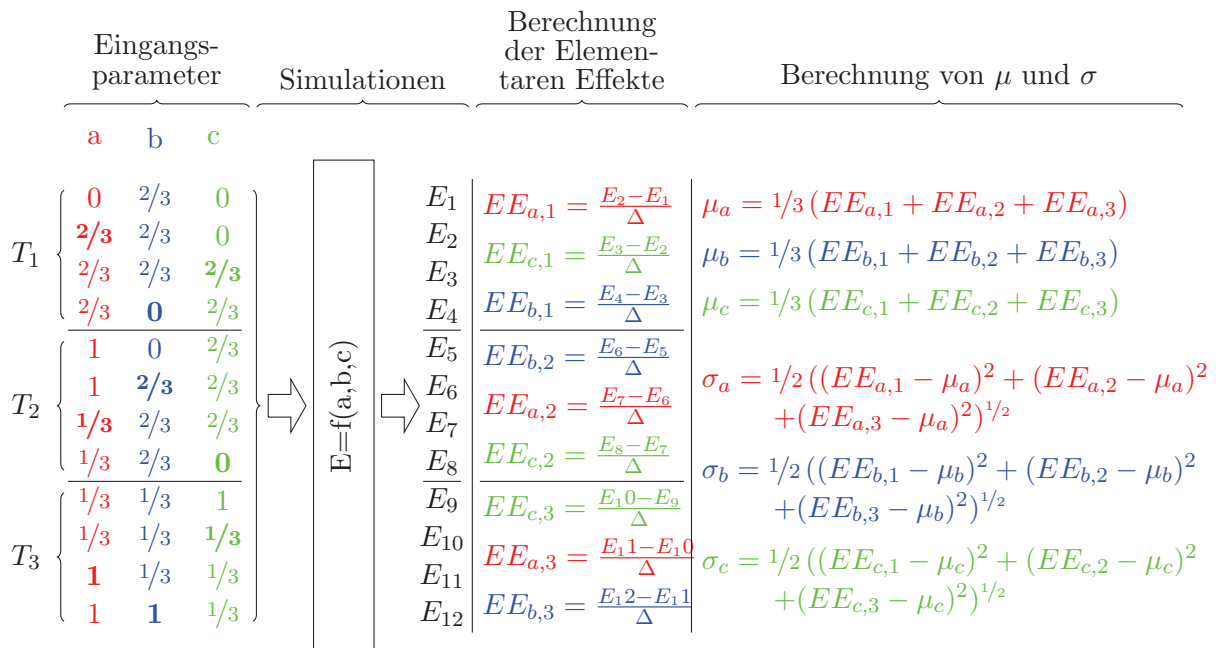


Abbildung 6.1: Schema eines Morris-Screenings mit drei Parametern a, b, c, einer Diskretisierung auf 4 Leveln und r=3 Trajektorien T_i

Campolongo et al. (2007) führten den Mittelwert des Betrages der elementaren Effekte μ_i^* als weiteres Maß ein.

$$\mu_i^* = \frac{1}{r} \sum_{j=1}^r |EE_{ij}| \quad (6.1)$$

Eine übersichtliche Darstellung der Ergebnisse ergibt sich, wenn μ^* und σ in einem zweidimensionalen Diagramm eingezeichnet werden. Parameter mit hohen Werten für die Indikatoren befinden sich somit in der rechten oberen Ecke des Diagrammes und können schnell identifiziert werden.

Die Anzahl der Trajektorien soll laut Campolongo et al. (2007) 10 bis 50 betragen. In der Praxis werden jedoch lediglich zwischen 3 und 10 Trajektorien verwendet (vgl. Bertagnolio (2012); Garcia Sanchez et al. (2014); Hyun et al. (2007); Kim et al. (2013); Wit (1997); Wit und Augenbroe (2002)). Bertagnolio (2012) konnte zeigen, dass für ein Morris-Screening für ein Gebäudemodell mit 52 Parametern mit jeweils 10 und 20 Trajektorien eine vergleichbare Parameter-Rangfolge erzielt wurde.

Monte-Carlo-Analyse

Die Monte-Carlo-Analyse wird sowohl für globale Sensitivitätsanalysen, als auch die Unsicherheitsanalyse angewandt und wird daher in diesem Abschnitt erläutert. Bei einer Monte-Carlo-Analyse werden Zufallszahlen eingesetzt, um numerische und nichtnumerische Probleme zu lösen. Im Fall der Unsicherheitsanalyse wird eine hohe Zahl an Modellrechnungen mit variierenden Kombinationen an Eingangsparametern durchgeführt. Die

Werte der Eingangsparameter werden basierend auf deren Wahrscheinlichkeitsverteilungen zufällig gewählt. Durch die hohe Zahl an Modellrechnungen ist das Verfahren jedoch sehr rechenintensiv und nicht für Modelle mit langen Rechenzeiten geeignet.

Für die Generierung der zufälligen Eingangsvariablen werden verschiedene Strategien angewandt. Bei der zufälligen Stichprobe werden diese über (Pseudo-)Zufallszahlen erzeugt, sodass sie zufällig über den gesamten Parameterraum verteilt sind. Da für kleine Stichprobengrößen Anhäufungen und Lücken im Parameterraum entstehen können, existieren verschiedene weitere Stichprobenmethoden, beispielsweise die Latin-Hypercube-Methode (LHC). Hierbei werden die Wahrscheinlichkeitsverteilungen der Eingangsparameter in Intervalle gleicher Wahrscheinlichkeit unterteilt. Aus jedem Intervall wird eine gleiche Anzahl an Stichproben gezogen. So wird sichergestellt, dass der gesamte Raum gleichmäßiger abgedeckt ist. Innerhalb eines Intervalls werden die Werte zufällig ausgewählt (SimLab; Saltelli et al., 2008).

Die Anzahl der nötigen Rechnungen variiert mit der Methode zur Stichprobennahme. Die Anzahl der Modellrechnungen ist jedoch im Allgemeinen nicht abhängig von der Anzahl der variierten Parameter (Loucks und Beeck, 2005). Zur nötigen Anzahl an Rechnungen gibt es unterschiedliche Empfehlungen (vgl. Tabelle 6.1). Ist die Rechenzeit kein begrenzender Faktor, werden in der Praxis häufig jedoch sehr viel mehr Simulationsrechnungen mit mehreren hundert bis mehreren Tausend Rechnungen durchgeführt (Spitz et al., 2012; Domínguez-Muñoz et al., 2010).

Tabelle 6.1: Empfohlene Stichprobenzahl für eine Monte-Carlo-Analyse von Gebäudemodellen

Empfohlene Anzahl	Stichproben-Methode	Quelle
50	Zufällig	Lomas und Eppel, 1992
16	LHC	Burhenne und Herkel, 2012
256	Zufällig	
100	Zufällig	Macdonald, 2009

Unsicherheitsanalyse

Auch eine Unsicherheitsanalyse kann über Monte-Carlo-Simulationen durchgeführt werden. Dazu wird die Verteilung der Simulationsergebnisse y bestimmt, die sich durch die Simulationen mit den unsicherheitsbehafteten Eingangsparametern ergibt. Diese beschreibt das gesamte Spektrum der möglichen Ergebnisse, zusammen mit den zugehörigen Wahrscheinlichkeiten des Auftretens. Bei einer hohen Anzahl von Simulationsrechnungen kann, unabhängig der einzelnen Wahrscheinlichkeitsverteilungen der Parameter, von einer Normalverteilung der Ergebnisgrößen ausgegangen werden. Somit kann die Unsicherheit über die Standardabweichung ausgedrückt werden:

$$\sigma = \frac{1}{N-1} \left(\sum_{n=1}^N (y_n^2 - \bar{y}^2) \right)^{1/2} \quad (6.2)$$

Statt der Standardabweichung bietet sich auch die Berechnung des Variationskoeffizienten (Standardabweichung dividiert durch den Mittelwert) an, um ein relatives Maß für die Abweichung zu erhalten (Wit und Augenbroe, 2002). Die Standardabweichung oder der Variationskoeffizient sind nicht in jedem Fall das Mittel der Wahl. Da beispielsweise der Heizwärmebedarf nicht negativ werden kann, ist die Verteilung bei sehr kleinen Heizwärmebedarfen nicht symmetrisch. Eine andere Möglichkeit ist die Angabe von Grenzwerten, die von einer bestimmten Anzahl von Simulationsrechnungen über- oder unterschritten wird (Lomas und Eppel, 1992). Weitere Werte, die sich aus der Verteilung berechnen lassen und eine Aussage über die Unsicherheit der Modellergebnisse liefern, sind der Mittelwert, die Quartilswerte und die Konfidenzintervalle. Auch eine grafische Abbildung der Ergebnisse, beispielsweise in Histogrammen, zeigt das Spektrum und die Verteilung der unsicheren Ergebnisse in übersichtlicher Form (Loucks und Beeck, 2005).

6.1.3 Wahrscheinlichkeitsverteilung der Eingangsdaten

Um die Unsicherheit der Simulationsergebnisse bestimmen zu können, muss zunächst die Unsicherheit jedes einzelnen Eingangsparameters eingeschätzt werden. Dies ist eine der wichtigsten Aufgaben bei der Unsicherheits- und Sensitivitätsanalyse (Maile, 2010). Jedem Eingangsparameter wird kein einzelner Wert zugeordnet, sondern ein Spektrum an Werten, das die Unsicherheit bezüglich dieses Eingangsparameters widerspiegelt. Abbildung 6.2 gibt die Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen einzelner Verteilungen wieder, die häufig verwendet werden, um die Wahrscheinlichkeiten der Werte der Eingangsparameter festzulegen.

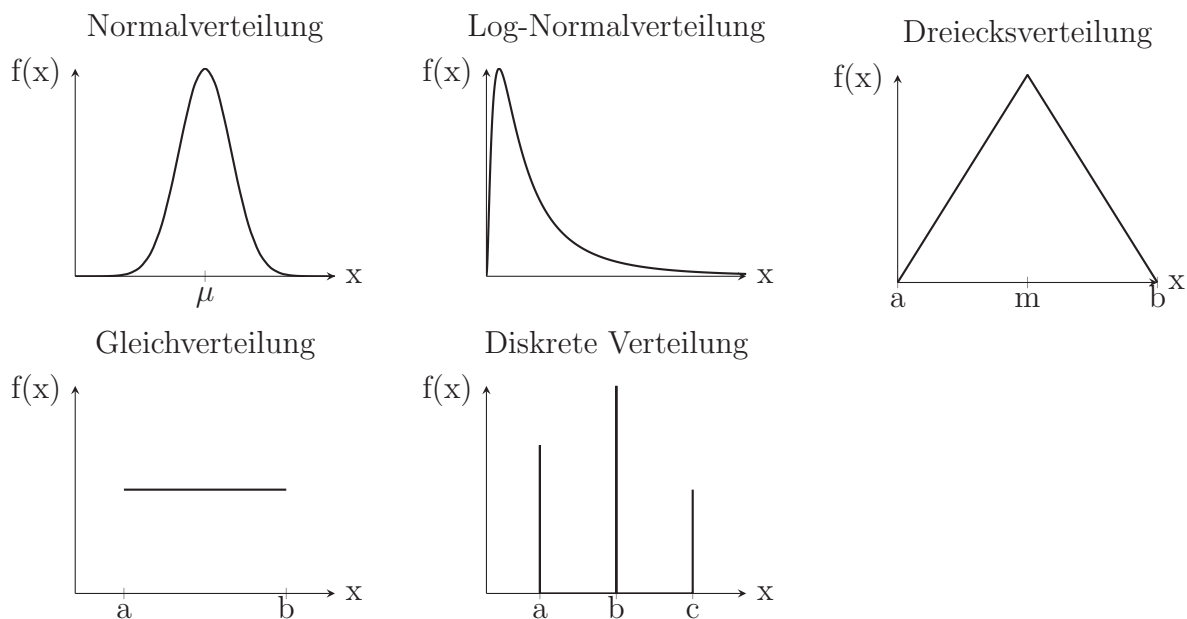


Abbildung 6.2: Dichtefunktionen der Wahrscheinlichkeitsverteilungen

Die Wahl der Verteilung ist abhängig von dem jeweiligen Parameter. Die Normalverteilung wird für Unsicherheitsangaben gewählt, wenn ein Mittelwert mit gleicher Wahrscheinlichkeit um denselben Wert über- wie unterschritten wird, beispielsweise wenn die einzelnen

Parameter aufgrund von Unkenntnis über den genauen Wert oder Materialdegradation um einen Mittelwert schwanken (Tian, 2013). Die Lognormalverteilung beschreibt die asymmetrische Verteilung einer Variablen, die durch Null begrenzt wird, aber einige wenige sehr hohe Werte annehmen kann, beispielsweise die Infiltrationsrate (Macdonald, 2002). Eine Gleichverteilung wird gewählt, wenn es keine Beschränkungen für die Wahl der Variablen gibt, sodass alle möglichen Werte die gleiche Wahrscheinlichkeit annehmen. Dies ist beispielsweise im frühen Gebäudedesign der Fall (Capozzoli et al., 2009). Kann eine Variable nur einzelne Werte und kein kontinuierliches Spektrum an Werten annehmen (beispielsweise die Wahl unterschiedlicher Materialien), so wird eine diskrete Verteilung gewählt. Dabei müssen sich die Wahrscheinlichkeiten aller Möglichkeiten zu eins aufaddieren (Macdonald, 2002). Durch die Angabe der Werte mit minimaler und maximaler Wahrscheinlichkeit ist die Dreiecksverteilung für die Praxis gut geeignet (Becker et al., 2003). Im Vergleich zur Normalverteilung werden jedoch die Wahrscheinlichkeiten der extremen Werte höher eingeschätzt.

Die Unsicherheiten in den Parametern können durch verschiedene Faktoren begründet sein (Abbildung 6.3). Zur Festlegung der jeweiligen Wertebereiche und Verteilungen der Eingangsdaten eignen sich Messungen, Befragungen von Gebäudenutzern, technischem Personal und Experten, das Zurückgreifen auf Standardwerte sowie theoretische Betrachtungen und begründete fundierte Schätzungen (Brohus et al., 2009; Lam und Hui, 1996; Macdonald, 2002).



Abbildung 6.3: Ursachen für Unsicherheiten in den Eingangsparametern nach Domínguez-Muñoz et al. (2010); Lomas und Eppel (1992); Hong und Lin (2013)

Da die Datenlage in jedem Gebäude und jeder Phase der Simulation eine andere ist,

müssen für jedes Gebäude eigene Verteilungen der Eingangsdaten gefunden werden. Dennoch gibt es einige Anhaltswerte zu typischen Unsicherheiten in Eingangswerten und den Verteilungen (siehe z. B. Corrado und Mechri (2009) oder Macdonald (2002)).

6.1.4 Fazit

Sensitivitäts- und Unsicherheitsanalysen sind ein wichtiges Werkzeug, um die Unsicherheit des Ergebnisses abschätzen zu können und den Einfluss der Unsicherheit einzelner Parameter auf das Ergebnis zu bestimmen. Ob ein Parameter in hohem Maße zur Unsicherheit des Ergebnisses beiträgt, hängt von der Sensitivität dieses Parameters und den Kenntnissen über den Parameterwert ab. Für die Durchführung der Analysen gibt es viele verschiedene Methoden. Welche Methode gewählt werden sollte, ist abhängig von der Art und Komplexität des Modells sowie der Zielstellung der Analyse.

Es existiert eine Vielzahl von Untersuchungen der Sensitivität der Eingangsparameter in Gebäudesimulationen. Diese unterscheiden sich durch die verwendeten Gebäudemodelle, die Klimadaten, die Detaillierung der Modelle, die Zielsetzung der Analysen, die betrachteten Parameter und die Unsicherheiten der Eingangsparameter. Somit ergeben sich sehr unterschiedliche Ergebnisse. Eine vergleichende Übersicht, welche Parameter in welchen Studien und welchen Umständen sensitiv sind, wurde bisher nicht erstellt. Daher soll im folgenden Abschnitt zunächst eine Analyse der Sensitivitäten in der Literatur erfolgen, bevor im anschließenden Abschnitt eine eigene Analyse durchgeführt wird.

6.2 Vergleichende Analyse der Parametersensitivitäten in Gebäudesimulationen aus der Literatur

Das Ziel der Literaturanalyse in diesem Abschnitt ist es, zu ermitteln, welche Parameter in Gebäudemodellen eine hohe Sensitivität aufweisen und welche Parameter einen geringen Einfluss zeigen. Eine solche vergleichende Untersuchung wird dadurch erschwert, dass in einzelnen Studien große Unterschiede in den untersuchten Gebäudegeometrien, den Wahrscheinlichkeitsverteilungen für die Eingangsparameter, den Randbedingungen (beispielsweise unterschiedliche Klimazonen) und den Zielsetzungen vorliegen. Somit treten auch unterschiedliche Sensitivitäten der Parameter auf. Dennoch soll an dieser Stelle ein Vergleich der Sensitivitäten der Parameter in den einzelnen Studien stattfinden. Ein Parameter, der in keiner der Untersuchungen eine Relevanz zeigt, wird mit großer Wahrscheinlichkeit unter keinen Randbedingungen und in keinem Gebäude eine hohe Wichtigkeit haben, während ein Parameter, der in mehreren Untersuchungen eine Relevanz zeigt, zumindest unter bestimmten Randbedingungen einen hohen Einfluss erwarten lässt.

6.2.1 Auswahl der Studien

Tabelle 6.2 gibt eine Übersicht über die verglichenen Untersuchungen und ihre Charakteristika. Die Anzahl der untersuchten Parameter N_P variiert stark zwischen den Studien. In einigen Studien wurden alle in dem jeweiligen Programm vorkommenden Parameter

mit einer Unsicherheit belegt, in anderen hingegen nur ausgewählte Parameter.

In allen Studien zeigte sich übereinstimmend, dass die Varianz der Ergebnisgrößen häufig nur von wenigen Parametern (1 bis 15 % der gesamten Parameter) erzeugt wird.

6.2.2 Gruppierung der Parameter

Da der Detailgrad der untersuchten Parameter in den einzelnen Studien sehr unterschiedlich ist, wurden die Parameter teilweise in Oberkategorien gruppiert. Während in einigen Untersuchungen beispielsweise der U-Wert der Außenwände als Parameter in die Sensitivitätsanalyse einging, wurden in anderen die Wärmeleitfähigkeiten und Dicken der einzelnen Wandschichten variiert. Da sich der U-Wert aus der Kombination dieser Parameter ergibt, wurden diese für alle Studien unter dem Parameter U-Wert zusammengefasst. Weiterhin wurden die untersuchten Ergebnisgrößen unterschieden. In vielen Veröffentlichungen wurde der Einfluss der Parameter auf unterschiedliche Simulationsergebnisse ermittelt, beispielsweise der Einfluss auf die Heiz- und Kühlenergie oder die entsprechenden Leistungen.

6.2.3 Klassifizierung der Parameter

Jeder der in den einzelnen Studien untersuchten Parameter wurde auf Basis der Ergebnisse der jeweiligen Studie für die jeweilige Ergebnisgröße als wichtig oder nicht wichtig eingeordnet. Aufbauend auf dieser Einteilung wurde für jede Ergebnisgröße gezählt, wie häufig die Sensitivität eines Parameters für diese untersucht wurde und wie häufig er sich als wichtiger Parameter herausstellte. Die Ergebnisse sind in Tabelle 6.3 dargestellt. Für jeden Parameter wird angegeben, ob dieser in einem Viertel oder mehr der Untersuchungen wichtig (2) oder in einem Viertel oder mehr der Untersuchungen als unwichtig (0) ermittelt wurde. Alle Parameter, die sich für mindestens ein Ergebnis in der Mehrheit der Studien als wichtig erwiesen, sind zudem über Fettdruck markiert. Alle Parameter, die sich in einigen Untersuchungen als wichtig herausstellten und in anderen nicht, sind mit (1) gekennzeichnet. Steht in einer Zelle keine Zahl, so wurde die Untersuchung der Sensitivität dieses Parameters für die entsprechende Ergebnisgröße in keiner oder lediglich einer einzigen Veröffentlichung durchgeführt. Im Falle einer Untersuchung in nur einer Analyse ist unklar, ob das Ergebnis nur unter den bestimmten Randbedingungen dieser einen Untersuchung zustande kam oder ob sich dieselbe Wichtigkeit für diesen Parameter auch in einer anderen Untersuchung ergäbe. Aus diesem Grund werden diese Ergebnisse in der Tabelle nicht angegeben.

6.2.4 Auswertung

Die Ergebnisgröße, die in den meisten Studien untersucht wurde, ist der Heizenergiebedarf, gefolgt vom Kühlenergiebedarf und dem elektrischen Bedarf. Zudem wurde in einigen Untersuchungen der Einfluss auf die Spitzenlasten und den thermischen Komfort untersucht. In vielen Studien lag der Fokus auf Parametern, die das Gebäude und das Nutzerverhalten beschreiben. Parameter der technischen Anlagen wurden hingegen nur in fünf der betrachteten Studien untersucht.

Tabelle 6.2: Übersicht über Sensitivitätsanalysen in verschiedenen Studien

Art der Analyse	N_P	Gebäude	Ziel	untersuchte Ergebnisgrößen	Quelle
Screening	75	Wohngebäude	Rangfolge der Parameter	E_{ges}	Brohus et al., 2009
Screening	129	Wohngebäude	Unsicherheit in energetischer Klassifizierung	Q_H, Q_K	Corrado und Mechri, 2009
Screening	24	komplexes Wohngebäude	Möglichkeiten des Screenings aufzeigen	$Q_H, P_H, \text{Komfort}$	Garcia Sanchez et al., 2014
Screening	18	Bürogebäude	Vergleich detailliertes und vereinfachtes Modell	Q_H, Q_K	Kim et al., 2013
Screening	21	Bürogebäude	Möglichkeiten der SA im frühen Design aufzeigen	$E_{Primär}, Q_H$	Heiselberg et al., 2007
Screening	36	Bürogebäude	Identifikation relevanter Parameter für Kalibrierung	\dot{V}_{Gas}, E_{el}	Bertagnolio, 2012
lokal	11	Schulgebäude	Identifikation einflussreicher, nutzungsabhängiger Parameter	E_{ges}, P_{ges}	Clevenger und Haymaker, 2006
lokal	45	Bürogebäude	Verstehen der Zusammenhänge	E_{el}, P_{el}	Lam und Hui, 1996
varianz-basiert	6	Bürogebäude	Möglichkeiten der SA im frühen Design aufzeigen	Q_K, Q_H	Capozzoli et al., 2009
varianz-basiert	68	Bürogebäude	Bestimmung Einflussfaktoren für den Energieverbrauch	Q_H, E_{el}	Ruiz et al., 2012
Regression	7	einfaches Einzonen-Modell	Möglichkeiten der regressionsbas. SA aufzeigen	$E_{ges}, Q_H, P_H, Q_K, P_K, \text{Komfort}$	Hopfe et al., 2007
Regression	8	Bürogebäude	Einfluss des Klimawandels	$CO_2, \text{Komfort}$	Wilde und Tian, 2010
Regression	20	Bürogebäude	Anlagendimensionierung im frühen Design	P_k	Domínguez-Muñoz et al., 2010
Regression	27	Bürogebäude	Relevanz Design-Parameter, Erstellung Meta-Modell	Q_{ges}, Q_H	Hygh et al., 2012

Tabelle 6.3: Übersicht über die in den Sensitivitätsanalysen untersuchten Parameter:
(2): wichtiger Parameter in einem Viertel oder mehr der Untersuchungen
(0): unwichtiger Parameter in einem Viertel oder mehr der Untersuchungen,
(1) in einigen Fällen wichtig, in anderen unwichtig

Kurzform	N	Erläuterung	Einfluss auf				
			Heizenergie	Heizleistung	Kühlenergie	Kühlleistung	el. Energie
A_{kond}	4	konditionierte Fläche	1	1		1	
φ	7	Orientierung	0	1	1		1
l/b	3	Längen-/Breitenverhältnis	1		0		
U_{AW}	13	U-Wert der Außenwand	2		1		1
U_D	7	U-Wert des Daches	0		0		
C_G	9	Wärmekapazität d. Gebäudes	1	2	1	2	0
f_S	4	Faktor für die Verschattung	0		0		
U_F	13	U-Wert der Fenster	2	0	0	1	0
g	9	g-Wert der Fenster	0	2	1	2	2
A_F	9	Fensterfläche/ Fensteranteil	1	2	2		2
n_{Inf}	9	Luftwechsel Infiltration	2	2		1	
n_{mech}	9	Luftwechsel mech. Belüftung	2		1	0	
T_{Heiz}	9	Mindesttemperatur Heizperiode	2		0		1
$T_{Kühl}$	6	Maximaltemperatur Kühlperiode	0		1		1
$\dot{Q}_{IL,ges}$	2	Wärmeabgabe inn. Lasten ges	2	0			
\dot{Q}_P	10	Wärmeabgabe Personen	1		1		1
\dot{Q}_G	10	Wärmeabgabe Geräte	2		2		2
\dot{Q}_B	10	Wärmeabgabe Beleuchtung	0		2	2	
t_P	4	Nutzungszeit Personen	1				1
t_G	2	Nutzungszeit Geräte					2
t_B	2	Nutzungszeit Beleuchtung					2
$a_{kon,P}$	3	konvekt. Anteil Personenwärme					0
$a_{kon,G}$	2	konvekt. Anteil Gerätewärme	0				0
$a_{kon,B}$	3	konvekt. Anteil Beleuchtungswärme	0				0
\dot{Q}_{Meta}	7	Metabolismusrate	0		1		0
η_{Kessel}	3	Kesselwirkungsgrad	1				1
$T_{V,H}$	2	Vorlauftemperatur Heizung	0				0
$T_{V,K}$	6	Vorlauftemperatur Kaltwasser	0				0
EER	5	Leistungszahl Kältemaschine	0				0
P_{Pumpe}	3	Pumpenleistung	0				0
P_V	4	Ventilatorleistung	0				0
η_V	1	Ventilatorwirkungsgrad	0				1
T_{Zu}	2	Zulufttemperatur	0				0
ϕ_{min}	2	minimale Luftfeuchte	2				0
t_{RLT}	2	Laufzeit RLT-Anlage					1

Alle Parameter, die in Tabelle 6.3 mit (0) oder (2) gekennzeichnet sind, die also in den einzelnen Studien einen übereinstimmend hohen bzw. einen übereinstimmend geringen Einfluss auf die drei Ergebnisgrößen der Heiz-, Kühl- und elektrischen Energie zeigten, sind in Tabelle 6.4 zusammengefasst.

Tabelle 6.4: Parameter mit hohem und geringem Einfluss auf Heiz-, Kühl-, und elektrische Energie

	Heizenergie	Kühlenergie	elektr. Energie
hohe Sensitivität	$U_{AW}, U_F, \dot{Q}_G,$ $\dot{Q}_{IL,ges}, n_{Inf}, n_{mech},$ T_{Heiz}, ϕ_{min}	$A_F, \dot{Q}_G, \dot{Q}_B$	$g, A_F, \dot{Q}_G, \dot{Q}_B, t_B$
geringe Sensitivität	$\varphi, U_D, g, f_S, a_{kon,G},$ $a_{kon,B}, \dot{Q}_{Meta}, T_{Kühl},$ $T_{V,H}, T_{V,K}, P_{Pumpe},$ $\varepsilon, P_V, T_{Zul}$	$l/b, U_{AW}, U_D, U_F,$ f_S, T_{Heiz}	$U_{AW}, U_F, C_G, \dot{Q}_{Meta},$ $a_{kon,G}, a_{kon,B}, a_{kon,P},$ $n_{mech}, P_{Pumpe}, \varepsilon, P_V,$ $\phi_{min}, T_{V,K}, T_{Zul}$

Die Wärmeabgabe durch Beleuchtung, Geräte und Personen wird in einigen Studien zur Gesamtlast durch innere Lasten zusammengefasst. Diese zeigt insbesondere auf die Heizenergie einen hohen Einfluss. Werden diese einzelnen Lasten differenziert betrachtet, so wird deutlich, dass vor allem die Geräte- und Beleuchtungswärme, bzw. deren elektrischer Energiebedarf einen Einfluss zeigen, während der Einfluss der Personen weniger hoch ist. Da die Kälte in den meisten Gebäuden elektrisch erzeugt wird, hat die Höhe der Kälteleistung einen Einfluss auf die elektrische Energie. Somit weisen relevante Parameter für die Kälte ebenfalls eine Relevanz für die elektrische Energie auf. Ein hoher Einfluss zeigt sich übereinstimmend für alle drei Ergebnisgrößen durch Parameter der Gebäudehülle, der inneren Lasten und der Konditionierung der Räume. Die Parameter der technischen Anlagen haben keinen oder einen von den Randbedingungen abhängigen Einfluss. Da jedoch lediglich der Einfluss auf die Energiebilanz des gesamten Gebäudes untersucht wurde, können diese Parameter eine höhere Sensitivität auf die Detailergebnisse des Energieverbrauchs einzelner Anlagen aufweisen.

6.3 Eigene Untersuchung von Parametersensitivitäten

Da das untersuchte Krankenhaus eine sehr inhomogene Gebäudestruktur aufweist, werden Sensitivitäts- und Unsicherheitsanalysen der Eingangsdaten für verschiedene Gebäude durchgeführt, um zu untersuchen, welche Eingangsparameter unter den Randbedingungen verschiedener Baustandards, Konditionierungen und Laststrukturen wichtig sind.

Zur Bestimmung der Sensitivität der Eingangsparameter wurde die oben beschriebene Methode des Screenings nach Morris gewählt, mit dem eine Rangfolge der Parameter nach ihrem Einfluss auf die Simulationsergebnisse bestimmt wird. Diese Methode bietet einen guten Kompromiss zwischen Rechenaufwand und Ergebnisgenauigkeit. Eine quantitative

Zuordnung der Ergebnisunsicherheit zu den einzelnen Eingangsparametern, wie diese mit globalen Methoden möglich ist, wurde als nicht notwendig erachtet, da auch mit Hilfe des Screenings zuverlässig bestimmt werden kann, ob ein Parameter einen hohen oder geringen Einfluss auf das Ergebnis aufweist.

Weiterhin wurde eine Unsicherheitsanalyse basierend auf den gewählten Wahrscheinlichkeitsverteilungen der Eingangsparameter durchgeführt. Dazu wurde eine Monte-Simulation durchgeführt, indem über die Latin-Hypercube-Methode Stichprobenwerte der Eingangsparameter gewählt wurden. Mit diesen wurden Simulationsrechnungen durchgeführt und die Verteilung der Ergebnisse bestimmt.

6.3.1 Unsicherheiten der Eingangsparameter

Zur Bestimmung der Sensitivitäten wurden den Eingangswerten Wahrscheinlichkeitsverteilungen zugeordnet. Es wurden Dreiecksverteilungen verwendet, da diese eine einfache Anwendung ermöglichen. Daten, die nicht zentral vorgegeben werden, sondern in jedem Raum abweichende Werte annehmen, wurden über Faktoren variiert, mit denen die jeweiligen Werte multipliziert wurden. Die Breite der Wertebereiche hängt von der Unsicherheit der jeweiligen Datenquelle ab. In dieser Analyse soll zunächst festgestellt werden, wie hoch die Unsicherheit mit pauschalen Annahmen für einzelne Parameter ist. Somit wurde für viele Parameter eine etwas höhere Unsicherheit gewählt, die mit zusätzlichem Aufwand für die Datenerhebung verringert werden könnte. Für die Parameter, die auch mit pauschalen Werten keine hohe Unsicherheit aufweisen, muss jedoch kein hoher Aufwand betrieben werden, um diese genauer zu bestimmen.

Tabelle 6.5 listet die in der folgenden Analyse untersuchten Eingangsparameter auf. Die gewählten Minima und Maxima der Parameter und die Begründung für die Wahl dieser Spannen sind in Tabelle C.1 im Anhang zu finden.

6.3.2 Durchführung der Sensitivitätsanalyse

Für die Sensitivitäts- und Unsicherheitsanalyse wurden dieselben Gebäude ausgewählt wie für die Untersuchungen zur Zonierung (Kapitel 4.2): eine Etage des Wahlleistungsgebäudes, zwei Stationen des Haupthauses und eine OP-Station. Wie auch bei der Zonierung wurden verschiedene Varianten der Gebäude berechnet (Tabelle 6.6), um den Einfluss verschiedener Lüftungsvarianten und verschiedener Dämmstandards auf die Gebäude untersuchen zu können.

Bei dem Wahlleistungsgebäude handelt es sich um ein Gebäude neueren Baustandards. Um zu untersuchen, wie sich die Sensitivitäten für ein Gebäude älterer Bauart verhalten, wurde dasselbe Gebäude noch einmal mit veränderten Verteilungen für die U-Werte der Außenbauteile simuliert. Auch die Infiltration wurde gegenüber der Infiltration des Neubaus erhöht. Für ältere Gebäude wurde eine höhere Unsicherheit der U-Werte der Außenbauteile angenommen (vgl. Tabelle C.1). Um zu unterscheiden, welchen Einfluss eine weitere Spanne der U-Werte und welchen Einfluss höhere U-Werte bei einer gleichen Spanne haben, wurden zwei Varianten des Wahlleistungsgebäudes mit Altbaudaten erstellt: Ein Satz an Simulationsrechnungen wurde mit einer Wahrscheinlichkeitsverteilung

Tabelle 6.5: In der Sensitivitätsanalyse betrachtete Parameter

Symbol	Parameter		
		Gebäudedaten	Konditionierung
α	Absorptionsgrad der Wände	$T_{Kühl}$	Sollraumtemperatur Kühlperiode
ϵ	Emissionsgrad der Wände	T_{Heiz}	Sollraumtemperatur Heizperiode
h	Wärmeübergangskoeffizient an den Außenbauteilen	$f_{\dot{V},Z}$	Luftaustausch zwischen den Zonen
U_{AW}	U-Wert der Außenwand	$f_{\dot{V}_{Zu}}$	Zuluftmenge
U_D	U-Wert des Daches	$f_{\dot{V}_{Ab}}$	Abluftmenge
U_B	U-Wert des Bodens		Nutzung
U_F	U-Wert der Fenster	\dot{Q}_P	Wärmeabgabe durch Personen
g	g-Wert der Fenster	\dot{Q}_G	Wärmeabgabe durch Geräte
U_{IW}	U-Wert der Innenwände	\dot{Q}_B	Wärmeabgabe durch Beleuchtung
C_{IW}	Wärmekapazität der Innenwände	$a_{Lüft}$	Koeffizient der Fensteröffnungsrate
C_{AW}	Wärmekapazität der Außenwände	$b_{Lüft}$	Koeffizient der Fensteröffnungsrate
C_D	Wärmekapazität des Dachs	a_{kon}	konvektiv übertragener Anteil der inneren Wärmequellen
C_B	Wärmekapazität des Bodens		Anlagendaten
$T_{Erdreich}$	Temperatur des Erdreiches	$P_{Ventilator}$	Leistung des Ventilators
$R_{Erdreich}$	Wärmedurchlasswiderstand des Erdreichs	RWZ	Rückwärmezahl der Wärmerückgewinnung
$C_{Erdreich}$	Wärmekapazität des Erdreichs	t_{RLT}	Betriebszeiten der RLT-Anlage
n_{Inf}	Infiltration	T_{Zul}	Zulufttemperatur
f_S	verschatteter Anteil der Fassade	T_{Abl}	Ablufttemperatur
	Geometrie	$P_{Nenn,KM}$	Nennleistung der Kältemaschine
h_{Etage}	Höhe der Etage	EER	Leistungszahl der Kältemaschine
a_R	Rahmenanteil der Fenster	$V_{Speicher}$	Volumen des Kältespeichers
A_{AW}	Außenwandfläche	$A_{Speicher}$	Oberfläche des Kältespeichers
A_F	Fensterfläche	$U_{Speicher}$	U-Wert des Kältespeichers
A_{IW}	Innenwandfläche	$T_{V,K}$	Kaltwassertemperatur
C_M	Wärmekapazität des Mobiliars	$T_{RK,KM}$	Rückkühltemperatur

Tabelle 6.6: Varianten der Gebäude für die Sensitivitätsanalyse

Gebäude	Variante
Wahlleistung	Ist-Zustand
	Altbaustandard mit schmaler U-Wert-Spanne
	Altbaustandard mit breiter U-Wert-Spanne
Bürotrakt Haupthaus	Ist-Zustand
Bettenstation Haupthaus	Ist-Zustand
OP-Station	Zuluftregelung
	Abluftregelung

der U-Werte, deren Werte höher sind als im Neubau, aber deren Differenz der minimalen und maximalen Werte der Differenz aus dem Neubaugebäude entsprechen, durchgeführt. Eine zweite Analyse wurde mit einer breiteren Verteilung der U-Werte, die den Werten des Altbaus aus Tabelle C.1 entsprechen, berechnet.

Auch für die OP-Stationen wurden zwei Varianten berechnet, indem ein Modell mit einer abluftgeregelten RLT-Anlage, ein weiteres mit einer zuluftgeregelten RLT-Anlage berechnet wurde.

Die Sensitivitätsanalyse wurde nach der Methode von Morris durchgeführt (siehe Abschnitt 6.1.2). Dazu wurden Sätze an Simulationen (Trajektorien) durchgeführt, bei denen pro Simulationsrechnung ein einzelner Parameter variiert wurde. Für jeden Parameter wurde anschließend ein elementarer Effekt EE berechnet, der eine Approximation der partiellen ersten Ableitungen des Modells ist. Anschließend wurden über die elementaren Effekte jedes Parameters i der Mittelwert μ_i und die Standardabweichung σ_i gebildet. Diese geben Auskunft über das Verhalten des Modells bezogen auf den jeweiligen Parameter.

6.3.3 Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse

Die Sensitivitäten der einzelnen Parameter werden jeweils für die Heizenergie, die Kühlenergie und die elektrische Energie jedes Gebäudeteils ausgewertet. Dazu wurden die μ - und σ -Werte bestimmt und die Parameter nach aufsteigenden μ -Werten sortiert. So entsteht eine Rangfolge des Einflusses des jeweiligen Parameters auf das Ergebnis unter der angenommenen Unsicherheit des jeweiligen Parameterwerts.

Bevor die Simulationsrechnungen für alle Gebäudebereiche durchgeführt wurden, wurden zunächst anhand des Wahlleistungsgebäudes die Anzahl der nötigen Trajektorien und der Einfluss der Zonierung auf die Ergebnisse bestimmt. So konnte für die Berechnung der übrigen Gebäude eine geringere Anzahl an Trajektorien gewählt und somit Rechenzeit eingespart werden.

Ermittlung der nötigen Anzahl der Simulations-Trajektorien

Um zu ermitteln, wie viele Simulations-Trajektorien berechnet werden sollten, um ein verlässliches Ergebnis zu erhalten, wurden für das Wahlleistungsgebäude zunächst zehn

Trajektorien berechnet und die Mittelwerte und Standardabweichungen der Elementaren Effekte auf Basis aller zehn Trajektorien bestimmt. Diese Ergebnisse wurden mit Ergebnissen verglichen, die auf der Auswertung einer geringeren Anzahl an Trajektorien basierten. Insgesamt zeigten sich leichte Abweichungen bei den μ -Werten, jedoch nur wenig Änderungen in der Rangfolge der Parameter. Bei sechs bis neun Trajektorien zeigte sich keine Änderung der Reihenfolge der ersten fünf Parameter. Bei fünf Trajektorien waren für die elektrische Energie und die Heizenergie einzelne Parameter in ihrer Reihenfolge vertauscht. Dennoch waren unter den wichtigsten fünf bzw. zehn Parametern dieselben Parameter zu finden. Erst bei der Auswertung von nur zwei Trajektorien waren erstmalig andere Parameter unter den ersten fünf Parametern zu finden. Sogar wenn die Auswertung auf nur einer Trajektorie beruht, traten unter den ersten fünf Parametern nur geringfügige Änderungen auf. Daraus lässt sich ableiten, dass eine Anzahl von mindestens sechs Trajektorien für die Auswertung ausreichend ist. Für eine schnelle Analyse, die nicht viel Rechenzeit kosten soll, kann auch eine Berechnung basierend auf einer oder zwei Trajektorien bereits gute Anhaltspunkte über die Wichtigkeit der Parameter liefern. Wird nur eine einzige Trajektorie ausgewertet, so lassen sich jedoch keine Werte für σ berechnen.

Ermittlung des Einflusses der Zonierung auf die Sensitivitäten der Eingangsparameter

Das Modell mit der zweitdetailliertesten Zonierungsvariante *d2* hat eine Rechenzeit von 90 min für ein volles Jahr. Im Vergleich dazu benötigt eine Simulation des Modells in der Zonierung *d3* nur 15 min. Um zu ermitteln, ob eine Berechnung der Sensitivitäten mit der weniger detaillierten Zonierung zu vergleichbaren Ergebnissen kommt, wurden die Sensitivitäten für das Wahlleistungsgebäude einmal mit einem Modell der Zonierung *d2* und einmal mit dem weniger detaillierten Modell *d3* bestimmt.

Werden nur die Parameter mit dem jeweils höchsten Einfluss (alle Parameter mit einem μ -Wert größer gleich 10 % des maximalen μ -Wertes) betrachtet, so zeigt sich eine maximale Abweichung der μ -Werte einzelner Parameter von 25 %, die meisten liegen unterhalb von 10 %. Es finden sich jeweils unter den wichtigsten Parametern für das detailliert und das weniger detailliert zionierte Modell dieselben Parameter. Lediglich bei den unwichtigeren Parametern ergeben sich Unterschiede in der Rangfolge, da deren μ -Werte enger zusammenliegen und so geringe Unterschiede eine Verschiebung der Rangfolge bewirken können. Vor diesem Hintergrund wurde es als ausreichend erachtet, die übrigen Berechnungen mit dem weniger detailliert zionierten Modell durchzuführen.

Parametersensitivitäten

Im folgenden Abschnitt erfolgt die Auswertung der Sensitivitätsanalyse, indem jeweils die einflussreichsten Parameter für die Heiz-, Kühl- und elektrische Energie identifiziert werden. Zunächst werden die Ergebnisse des Wahlleistungsgebäudes vorgestellt. Anschließend werden die verschiedenen Modelle mit Altbaustandard - das modifizierte Wahlleistungsgebäude und die beiden Altbaustationen - mit diesen Ergebnissen verglichen. Abschließend erfolgt die Auswertung der OP-Stationen.

Wahlleistungsgebäude Die Ergebnisse sind in Abbildung 6.4 grafisch als μ^*/σ -Diagramm dargestellt. Parameter mit hohen μ^* -Werten, die demnach einen hohen Einfluss auf die Ergebnisvarianz aufweisen, sind auf der rechten Seite des Diagrammes zu finden, während die Parameter auf der linken Seite einen geringen Einfluss haben. Die Höhe des σ -Wertes gibt an, wie stark der Parameter von Interaktionen mit anderen Parametern beeinflusst ist. Es wurden jeweils die sensitivsten Parameter, die sich durch hohe μ^* -Werte auszeichnen, beschriftet. Auf die Beschriftung der übrigen Parameter wurde aus Gründen der Lesbarkeit verzichtet. Die einzelnen Parametergruppen wurden zudem farblich gekennzeichnet.

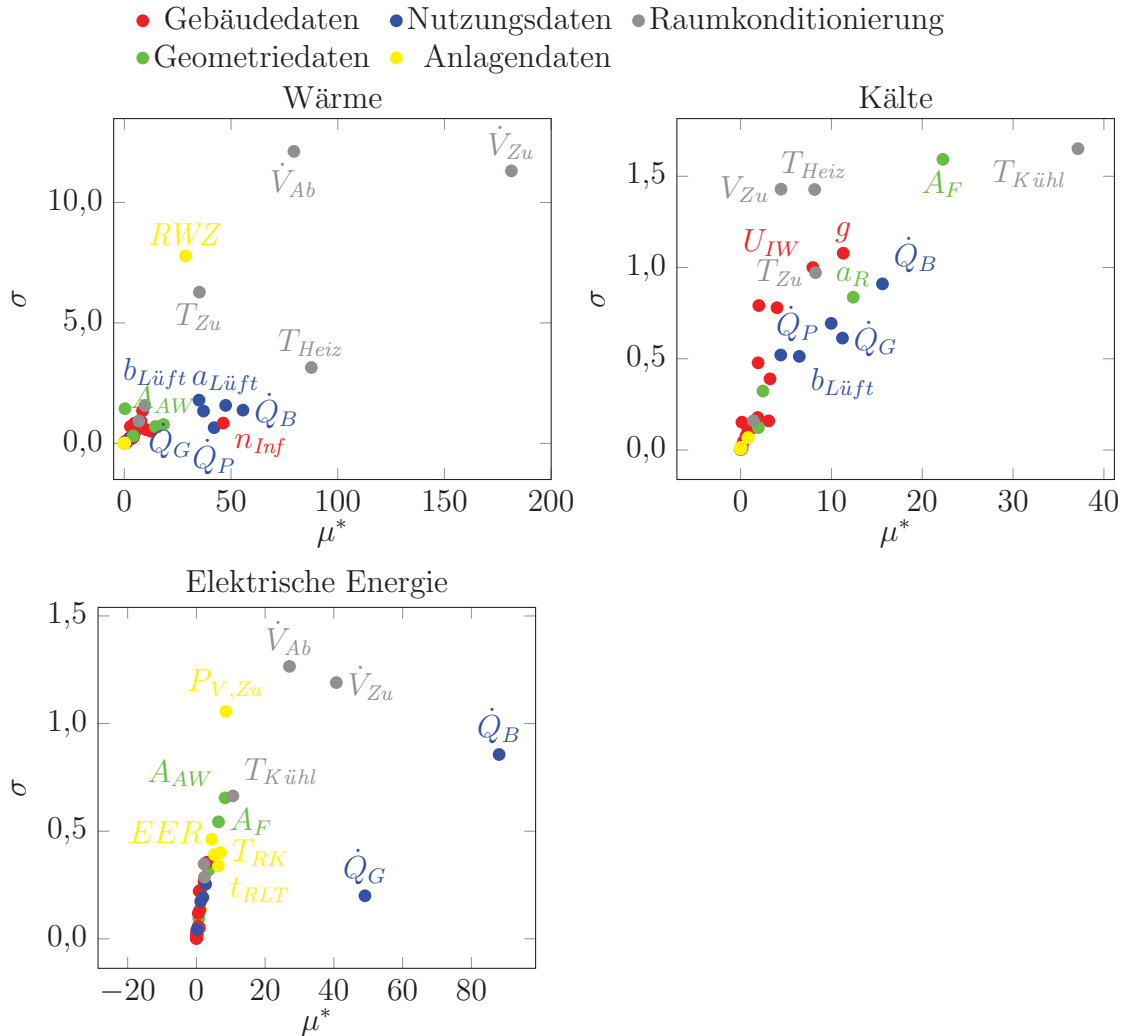


Abbildung 6.4: Ergebnisse des Screenings des Wahlleistungsgebäudes: Je weiter rechts sich ein Parameter im Diagramm befindet, um so höher ist seine Sensitivität

Zunächst ist erkennbar, dass jeweils nur einige wenige Parameter für die Unsicherheit verantwortlich sind. Für die **Heizenergie** (Wärmebedarf von sowohl statischer Heizung als auch der raumlufttechnischen Anlage) zeigen sich die folgenden Ergebnisse:

- Die höchsten Einflüsse haben die Parameter der Raumkonditionierung: Zuluft- und

Abluftvolumenstrom \dot{V}_{Zu} und \dot{V}_{Ab} , die minimale Raumtemperatur in der Heizperiode T_{Heiz} und die Zulufttemperatur T_{Zu} . Der Einfluss dieser Parameter hat zudem die höchsten Abhängigkeiten von anderen Parameterwerten.

- Auch die Parameter zur Gebäudenutzung, insbesondere die Wärmeabgabe durch Beleuchtung \dot{Q}_B , durch Geräte \dot{Q}_P und durch Personen \dot{Q}_P , ebenso wie das Lüftungsverhalten der Nutzer, welches durch die Koeffizienten $a_{Lüft}$ und $b_{Lüft}$ beschrieben wird, haben einen relevanten Einfluss auf das Ergebnis.
- Gebäude-, Anlagen-, und Geometrieparameter haben einen untergeordneten Einfluss, mit Ausnahme der Rückwärmezahl RWZ und der Infiltrationsrate n_{inf} .

Die **Kühlenergie** setzt sich aus dem Kältebedarf der raumlufttechnischen Anlage und der direkten Kühlung einzelner Räume über Kühldecken zusammen. Diese wird von den folgenden Parametern beeinflusst:

- Wie bei der Heizenergie haben die Parameter zur Raumkonditionierung einen hohen Einfluss. Im Gegensatz zur Heizenergie ist aber nun auch die Maximaltemperatur in der Kühlperiode $T_{Kühl}$ eine wichtige Größe. Der Abluftvolumenstrom hingegen ist weniger wichtig als für die Heizenergie, da über die Wärmerückgewinnung nur wenig Kälte zurückgewonnen wird.
- Wie bei der Heizenergie haben die Parameter zum Nutzerverhalten einen hohen Einfluss.
- Im Gegensatz zur Heizenergie sind nun auch die Geometrieparameter Fensterfläche A_F und Rahmenanteil des Fensters a_R wichtig.
- Gebäudeparameter, insbesondere der U-Wert der Innenwände U_{IW} und der g-Wert der Fenster g sind relevanter als für die Heizenergie
- Alle Anlagenparameter spielen eine untergeordnete Rolle für den Kühlenergiebedarf

Die **elektrische Energie** wird bestimmt durch die Geräte und Beleuchtung auf den Räumen, sowie dem elektrischen Bedarf der Kältemaschine und der raumlufttechnischen Anlage.

- Einen Einfluss auf die elektrische Energie haben daher maßgeblich die Beleuchtungsleistung und die Geräteleistung sowie die Abluft- und Zuluftvolumenströme.
- Zudem sind auch Anlagenparameter unter den wichtigeren Parametern: Die Leistung des Zuluftventilators $P_{V,Zu}$, die Leistungszahl EER und Vorlauftemperatur $T_{Kühl}$ der Kältemaschine sowie die Betriebszeiten der Lüftungsanlagen t_{RLT} .

Altbau-Simulationen Insgesamt stehen vier verschiedene Modelle mit Altbaustandard der Wände zur Verfügung: die beiden modifizierten Modelle des Wahlleistungsgebäudes sowie zwei Haupthausstationen. Da die Diagramme qualitativ sehr ähnlich aussehen, werden diese im Folgenden nicht abgebildet, sondern nur die Änderungen im Vergleich zum Ist-Zustand des Wahlleistungsgebäudes aufgeführt. Die μ^*/σ -Diagramme können in Anhang C.2 gefunden werden.

Obwohl der Wärmebedarf bei den Altbau-Rechnungen ansteigt, erhöhen sich μ^* und σ nur geringfügig. Insgesamt sind sehr ähnliche Parameter für die Unsicherheit der Ergebnisse verantwortlich. Für die Heizenergie ergeben sich die folgenden Änderungen:

- Für alle Altbaumodelle hat die Außenwandfläche einen deutlich höheren Einfluss und zählt zu den im Vergleich wichtigsten Parametern, was bei den Neubau-Parametern nicht der Fall war.
- Für die Modelle mit erhöhter Unsicherheit der U-Werte steigt auch der Einfluss der U-Werte von Außenwänden und Fenstern auf die Ergebnisunsicherheit.
- Zwischen den Modellen des Bürotraktes und der Bettenstation zeigen sich keine bedeutenden Unterschiede. Die Höhe der Last, bzw. das Vorhandensein eines Daches und der zugehörigen Parameter bewirken demnach keine Änderung der einflussreichsten Parameter.

Für die Kühlenergie und die elektrische Energie zeigen sich hauptsächlich Unterschiede in der Höhe einiger σ -Werte. Außerdem nimmt die Wichtigkeit von Beleuchtungswärmeabgabe und U-Wert der Innenwand für die Kühlenergie ab. Da die beiden Haupthausstationen weder gekühlt noch mechanisch belüftet sind, fallen die Anlagenparameter und die Parameter zur Raumkonditionierung weg. Dementsprechend sind für diese Modelle Geräte- und Beleuchtungsleistung die einzigen relevanten Parameter für die elektrische Energie.

OP-Station Der Großteil der Wärmezufuhr erfolgt über die raumlufttechnische Anlage, der Wärmebedarf der statischen Heizung ist demnach eher untergeordnet. Die μ^*/σ -Diagramme für sowohl Abluft- als auch Zuluftregelung sind in Abbildung 6.5 aufgeführt. Die Parameter der Kältemaschine wurden bei der Analyse nicht berücksichtigt, da die Kältemaschine außer den RLT-Anlagen der OP-Stationen noch weitere Verbraucher versorgt.

Die Ergebnisse der Wahlleistungs- und Haupthaussimulation waren trotz der unterschiedlichen Dämmstandards sehr ähnlich. Die Sensitivitäten der Parameter der OP-Stationen weichen jedoch von den bisher betrachteten Ergebnissen ab. Da ein Großteil der Räume innenliegend ist, die OP-Stationen mechanisch belüftet sind und aus hygienischen Gründen ein Überdruck eingestellt wird, spielen die Parameter der Außenwände sowie die Infiltration und Lüftung nur eine untergeordnete Rolle.

Die **Heizenergie** setzt sich aus den Wärmebedarfen der statischen Heizung und der raumlufttechnischen Anlage zusammen.

- Die Heizenergie wird hauptsächlich durch die Parameter zur Raumkonditionierung beeinflusst: Zuluftvolumenströme sowie Zuluft- bzw. Ablufttemperatur. Für die Zuluftregelung hat der Zuluftvolumenstrom einen deutlich höheren Einfluss als für die Ablufttemperatur.
- Auch Anlagenparameter (Rückwärmezahl, Betriebszeiten) sind unter den wichtigen Parametern zu finden.
- Nutzerparameter und Gebäude- und Geometriedaten haben einen untergeordneten

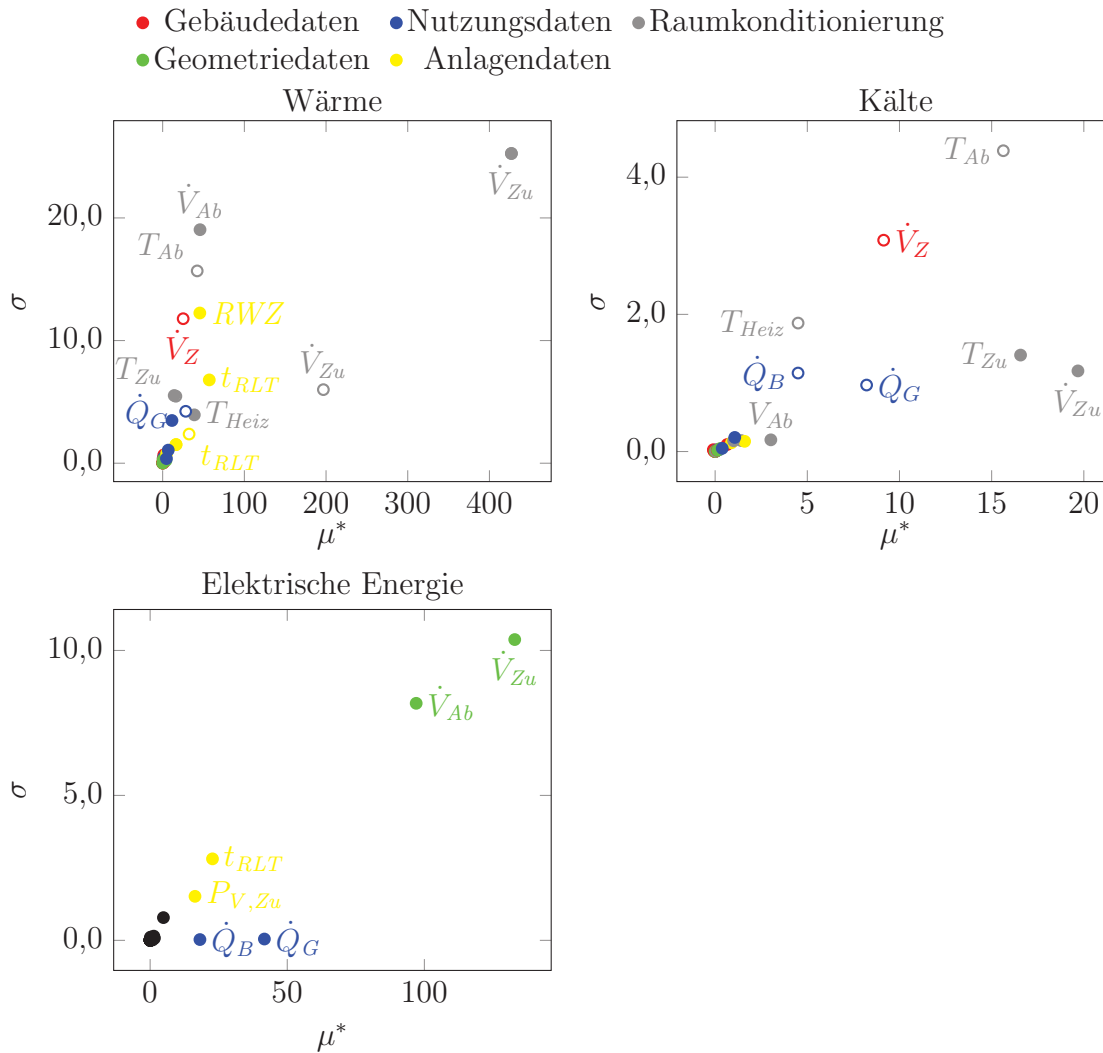


Abbildung 6.5: Ergebnisse des Screenings für die OP-Station, ausgefüllt: Zuluftregelung, nicht ausgefüllt: Abluftregelung. Je weiter rechts ein Punkt angeordnet ist, desto höher ist sein Einfluss auf das Ergebnis.

Einfluss. Lediglich der Luftaustausch zwischen den Zonen \dot{V}_Z hat für die Abluftregelung erstmals einen relevanten Einfluss auf das Ergebnis.

Da keiner der Räume direkt gekühlt ist, besteht der **Kältebedarf** für die OP-Station ausschließlich aus dem Kältebedarf der raumluftechnischen Anlage.

- Der Kältebedarf der Zuluftregelung wird hauptsächlich durch die Zulufttemperatur und den Zuluftvolumenstrom beeinflusst.
- Für die Abluftregelung sind zusätzlich der Luftaustausch zwischen den Zonen sowie die Wärmeabgabe durch Personen und Beleuchtung relevant.

Die Regelungsart der raumluftechnischen Anlage hat keinen Einfluss auf die Relevanz der Parameter für die **elektrische Energie**. Für beide Varianten ergeben sich dieselben

Werte für μ^* und σ .

- Da die raumlufttechnische Anlage aufgrund der hohen Luftwechselraten einen erheblichen Teil des Stromverbrauchs der Station ausmacht, haben Zu- und Abluftvolumenströme den höchsten Einfluss auf den Energieverbrauch. Auch die Ventilatorleistung und die Betriebszeiten haben einen relevanten Einfluss.
- Ein ebenfalls sehr wichtiger Parameter ist der Strombezug durch Beleuchtung und Geräte.

6.3.4 Ergebnisse der Unsicherheitsanalyse

Die Methode nach Morris gibt Aufschluss über die relevanten Eingangsparameter, jedoch nicht über die Höhe der Unsicherheit. Um diese zu bestimmen, wurde eine Unsicherheitsanalyse für das Modell des Wahlleistungsgebäudes mit denselben Wahrscheinlichkeitsverteilungen der Eingangsparameter wie für die Sensitivitätsanalyse durchgeführt (Tabelle 6.7). Es wurden 500 Simulationsrechnungen ausgewertet.

Tabelle 6.7: Ergebnisse der Unsicherheitsanalyse

	Q_{Heiz} in MWh	$Q_{Kühl}$ in MWh	E_{el} in MWh	E_{ges} in MWh
Min	141,6	57,3	243,8	459,8
Max	416,8	126,8	382,0	751,8
Mittelwert	262,7	88,1	311,3	547,1
25%-Quartil	229,5	80,0	292,8	536,0
75%-Quartil	291,4	95,7	328,9	607,4
Standardabweichung	49,3	12,3	24,4	52,0

Die Quartilswerte der Heizenergie liegen bei 230 MWh und 291 MWh, die Hälfte der Ergebnisse liegt also in dieser Spanne, die einer Abweichung von $\pm 9\%$ des Medians entspricht. Die Standardabweichung der gesamten Energiemenge liegt bei $9,5\%$ des Mittelwertes.

Das Histogramm der Ergebnisse der Heizenergie und die sich unter Annahme einer Normalverteilung der Ergebnisse ergebende Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion sind in Abbildung 6.6 dargestellt. Es zeigt sich, dass die Verteilung der Ergebnisse annähernd gut über die Normalverteilung abgebildet werden kann.

Um zu ermitteln, ob auch weniger Simulationsrechnungen für die Unsicherheitsanalyse ausreichen, wurden die statistischen Kennwerte noch einmal für verschiedene, geringere Anzahlen an Simulationsrechnungen ausgewertet (Abbildung 6.7). Es wird angenommen, dass Mittelwert, Standardabweichung und oberes Quartil umso genauer bestimmt werden können, je mehr Rechnungen durchgeführt werden. Die Abweichung zum besten Wert bei 500 Simulationsrechnungen nimmt mit zunehmendem Stichprobenumfang ab. Da die Standardabweichung den geringsten Wert annimmt, ist die relative Abweichung hier am größten und beträgt maximal -26% des Wertes für 500 Simulationsrechnungen. Die Ab-

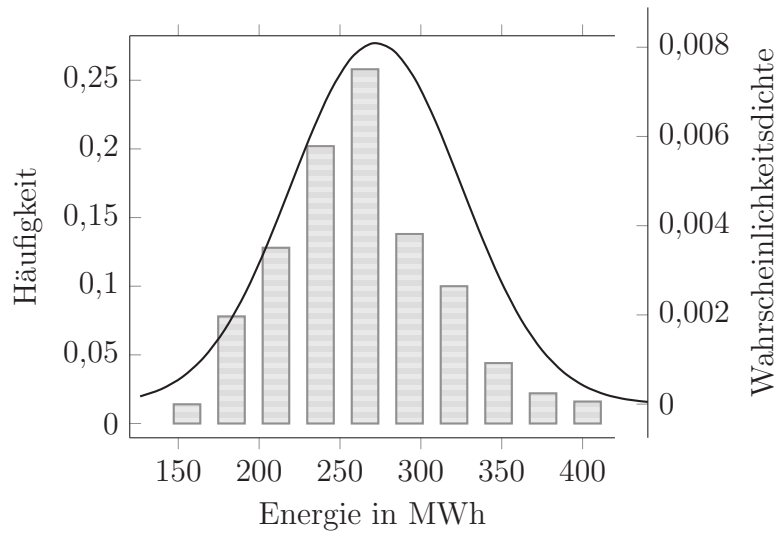


Abbildung 6.6: Histogramm und Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion der Ergebnisse der Unsicherheitsanalyse für die Heizenergie

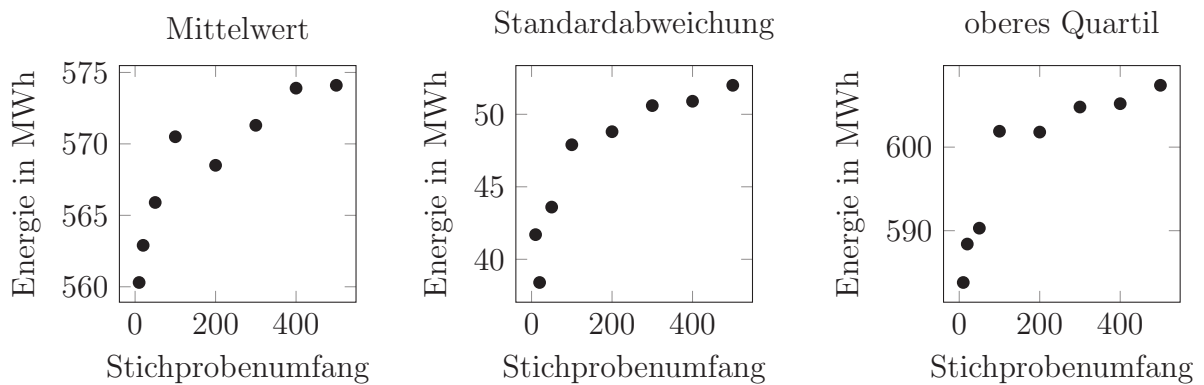


Abbildung 6.7: Mittelwert, Standardabweichung und oberes Quartil der Gesamtenergie für unterschiedliche Stichprobenumfänge

weichungen für den Mittelwert und das obere Quartil liegen auch bei einem Stichprobenumfang von nur 10 bei -4% bzw. -3% . Aus dem Ergebnis kann geschlossen werden, dass eine höhere Anzahl an Simulationsrechnungen zwar zu einem genaueren Ergebnis führt, jedoch bereits ab einem Stichprobenumfang von 300 der Fehler für Mittelwert und oberes Quartil unter 1% liegt, sodass sich der zusätzliche Aufwand für die weiteren Rechnungen nicht immer lohnt. Über die notwendige Genauigkeit sollte jedoch im Einzelfall entschieden werden. Die weiteren Rechnungen in dieser Arbeit wurden mit einem Stichprobenumfang von 300 durchgeführt.

Auch für alle weiteren untersuchten Bereiche des Krankenhauses wurde eine Unsicherheitsanalyse durchgeführt. Da diese qualitativ ähnliche Ergebnisse bezüglich der Verteilung und der relativen Höhe der Unsicherheit zeigte, sind die Ergebnisse im Folgenden nicht mehr explizit aufgeführt.

6.3.5 Fazit

Zusammenfassend zeigen die in Tabelle 6.8 für die einzelnen Bereiche aufgelisteten Parameter einen hohen Einfluss auf die Simulationsergebnisse. Diese sind konsistent mit den Ergebnissen aus der Literatur, mit Ausnahme der Zuluftmenge, -temperatur und Rückwärmzahl, die in den Literaturuntersuchungen nur eine geringe Relevanz zeigten. Dies kann dadurch begründet sein, dass die Luftmengen im Krankenhaus höher sind.

Tabelle 6.8: Übersicht über die durch das Screening identifizierten relevanten Parameter für die verschiedenen Bereiche des Krankenhauses

Eigenschaften des Bereiches	relevante Parameter
manuell belüftet	$T_{Heiz}, a_{Lüft}, b_{Lüft}, n_{Inf}, \dot{Q}_{IL}, U_{AW}, U_F, A_F$
mechanisch belüftet, geringe Luftmengen	$\dot{V}_{Zu}, \dot{V}_{Ab}, RWZ, T_{Heiz}, a_{Lüft}, b_{Lüft}, n_{Inf}, \dot{Q}_{IL}, U_{AW}, U_F, A_F$
innenliegend, mechanisch belüftet mit hohen Luftmengen	$\dot{V}_{Zu}, \dot{V}_{Ab}, f_{\dot{V}_Z}, t_{RLT}, P_V, \dot{Q}_{IL}, RWZ$

Der U-Wert der Außenwand lässt sich für Altbauten nur mit einer hohen Unsicherheit aus dem Baualter ableiten. Demnach ergibt sich auch ein hoher Einfluss auf die Unsicherheit des Heizwärmebedarfes. Hier sollte, wenn möglich, nicht auf die alleinige Information des Baualters zurückgegriffen werden, sondern genauere Informationen über Wanddicken und Wandaufbauten verwendet werden. Je höher der U-Wert ist, desto größer wird auch der Einfluss der Unsicherheit der Wandfläche. Dies ist unabhängig von der Unsicherheit des U-Wertes. Die Unsicherheit des Fensteranteils ist nur relevant, wenn dieser hoch ist und die Fenster zudem einen hohen U-Wert haben.

Parameter, die in keinem der Bereiche einen hohen Einfluss zeigen, sind die Emissionsgrade der Wände und, trotz hoher Unsicherheit in den Eingangsdaten, die Wärmekapazitäten von Außenwänden, Dach und Boden. Hier ist demnach kein Aufwand zur genauen Bestimmung der Daten nötig. Die Innenwandflächen und deren Wärmekapazitäten sowie der Luftaustausch zwischen den Zonen wurden mit einer hohen Unsicherheit belegt, da bisher kein hoher Aufwand betrieben wurde, um diese genauer zu bestimmen. Da die Parameter trotz ihrer hohen Unsicherheit keinen großen Einfluss auf die Ergebnisgrößen zeigten, sind diese Annahmen gerechtfertigt. Die direkte Kühlung der Räume macht nur einen untergeordneten Anteil der gesamten Energiemenge aus. Somit haben die Parameter der Kältemaschine ebenfalls eine geringe Relevanz. Soll jedoch die Kälteerzeugung direkt untersucht werden, so ist die Relevanz dieser Parameter höher einzustufen.

Im Rahmen der Unsicherheitsanalyse wurden die Quartils- und Mittelwerte sowie die Standardabweichung berechnet. Die Standardabweichung der Gesamtenergie liegt mit der gewählten Unsicherheit bei 10 bis 15 %. Sie kann für einzelne Energieformen, beispielsweise die Wärmeenergie der raumlufttechnischen Anlage, jedoch bis zu 100 % des Mittelwertes betragen. Demnach sollte angestrebt werden, vor allem die Unsicherheit in den oben genannten Eingangsparametern zu reduzieren, um eine insgesamt geringere Unsicherheit

der Ergebnisgrößen zu erzielen. Für die inneren Lasten, die manuelle Lüftung sowie die Raumtemperaturen, die stark von dem stochastischen Verhalten der Nutzer abhängen, ist dies jedoch nur schwer möglich. Auch für die Luftmengen der mechanischen Belüftung wären zusätzliche Messungen nötig, die im Rahmen dieser Arbeit nicht durchgeführt werden konnten. Eine Kalibrierung des Modells ist dementsprechend der nächste Schritt, um die nicht näher bestimmbaren Parameter so anzupassen, dass die Modellergebnisse mit Messwerten des Gebäudes vereinbar sind. Die verbleibende Unsicherheit sollte in der Auswertung der Ergebnisse beachtet und in auf den Ergebnissen aufbauende Entscheidungsprozesse mit einbezogen werden.

Kapitel 7

Kalibrierung

Liegen reale Verbrauchsdaten des simulierten Gebäudes vor, so können diese genutzt werden, um das Gebäudemodell zu kalibrieren. Dabei werden die verschiedenen Eingangsparameter so angepasst, dass die Simulationsergebnisse mit den Verbrauchswerten des realen Gebäudes übereinstimmen (Reddy, 2006). Der Vorgang der Kalibrierung ist gebäudespezifisch und muss demzufolge für jedes simulierte Gebäude wiederholt werden. Damit unterscheidet sich die Kalibrierung von der Verifizierung, die während der Programmentwicklung durchgeführt wird und die Genauigkeit und Fehlerfreiheit des Programmes sicherstellt. Im folgenden Abschnitt werden der Hintergrund zur Kalibrierung und die verschiedenen Vorgehensweisen vorgestellt. Anschließend wird im Rahmen der Fallstudie eine Kalibrierungsmethodik definiert und auf das Krankenhaus angewandt.

7.1 Hintergrund zur Kalibrierung

Zunächst werden die Notwendigkeit der Kalibrierung und die sich daraus ergebenden Herausforderungen erläutert. Anschließend werden verschiedene Methoden zur Durchführung einer Kalibrierung vorgestellt.

7.1.1 Nutzen der Kalibrierung

Da das kalibrierte Modell den realen Gebäudebetrieb abbildet, stellt es einen virtuellen Teststand dar, mit dessen Hilfe verschiedenste Modifizierungen der Betriebsstrategien getestet werden können und ihr Einfluss sichtbar gemacht werden kann (Costa et al., 2009). Die im Betrieb oftmals unbekannte Energiebilanz des Gebäudes kann bestimmt und der Effekt von Einsparmaßnahmen eingeschätzt werden (Reddy, 2006). Die Kalibrierung kann helfen, fehlerhafte Betriebsweisen zu identifizieren, da Abweichungen zwischen unkalibriertem Modell und realem Gebäude häufig durch untypischen und fehlerbehafteten Betrieb im realen Gebäude, zurückzuführen sind (Raftery, 2011; Waltz, 2000).

Die Durchführung einer Kalibrierung ist von hoher Bedeutung, da die Fehler in unkalibrierten Modellen sehr hoch sein können. Ahmad und Culp (2006) modellierten vier verschiedene Gebäude und verglichen die Ergebnisse der unkalibrierten Modelle mit tatsächlichen Verbrauchswerten der Gebäude. Für den Gesamtenergieverbrauch der Gebäude ergaben sich Abweichungen von $\pm 30\%$, während für einzelne Komponenten wie Kalt- und Warmwasserverbräuche Abweichungen von über $\pm 90\%$ auftraten.

7.1.2 Herausforderungen

Der Prozess der Kalibrierung ist ein sehr aufwändiger Prozess, der viele Modelldurchläufe sowie unter Umständen weitere Recherchearbeiten erfordert, um unbekannte oder unsichere Parameter genauer zu bestimmen. Dieser Prozess lohnt sich demnach nur für große Gebäude, da in kleineren Gebäuden das Budget für Audit und Messungen meist nicht hoch genug ist, um eine Kalibrierung zu erlauben (Reddy et al., 2007a). Die Kalibrierung eines komplexen Gebäudemodells wird durch eine Vielzahl von Faktoren erschwert:

- Es gibt keine standardisierten Methoden für die Kalibrierung und es gibt nur wenige Simulationsprogramme, in die die Werkzeuge zur Durchführung einer Kalibrierung bereits integriert sind (Tupper et al., 2011).
- Häufig stehen keine ausreichenden Verbrauchsdaten des realen Gebäudes zur Verfügung. Zudem sind die vorhandenen Daten oft unorganisiert und unstrukturiert (Maile, 2010). Diesen wenigen Vergleichsdaten des Gebäudes stehen Hunderte von Eingangsdaten gegenüber. Somit ist das System unterbestimmt. Wird eine Kombination der Eingangswerte gefunden, mit der die Ausgangsgrößen nur eine geringe Abweichung zu den Messwerten zeigen, so kann dies nur eine mögliche Lösung von vielen sein und auch mit sehr realitätsfernen Werten der Eingangsparameter erreicht werden (Coakley et al., 2014).
- Durch die große Anzahl an nötigen Eingangsdaten ist eine hohe Fehleranfälligkeit gegeben, die zu Abweichungen zwischen Modell und Messwerten führen kann. Eine sorgfältige Eingabe und Überprüfung ist daher unerlässlich (USAID, 2010).
- Auch Messwerte können Fehler enthalten (Reddy et al., 2007a). Weiterhin weisen diese unter Umständen ein Rauschen auf oder sind verzerrt, sodass eine Übereinstimmung mit den Simulationsergebnissen nicht immer leicht zu erkennen ist (Manfred et al., 2013).

Wie schwer es ist, mit Hilfe einer Kalibrierung die wahren Eingangswerte eines Modells zu bestimmen, konnten Reddy et al. (2007b) zeigen. Sie modellierten zwei fiktive Bürogebäude und nahmen die Werte des ursprünglichen Modells als Wahrheitswerte an. Anschließend wurde für jeden Eingangsparameter eine Wahrscheinlichkeitsverteilung festgelegt und über eine Monte-Carlo-Analyse Eingangsparametersätze bestimmt, die zu einer guten Übereinstimmung mit den „wahren“ Simulationsergebnissen führten. Nur für einige Parameter konnten die ursprünglichen Eingangswerte wieder ermittelt werden, obwohl die Übereinstimmung der Gesamtergebnisse sehr gut war. Die aus der Kalibrierung ermittelten besten Werte für die Eingangsparameter müssen demnach nicht den physikalischen Werten dieser Parameter übereinstimmen, genauso wie eine Simulation mit den genauen physikalischen Werten nicht zu dem besten Ergebnis führen muss (Kennedy und O’Hagan, 2001).

7.1.3 Methoden

Die Minimaldaten, die in der Regel in jedem Gebäude aus Rechnungsdaten zur Verfügung stehen und häufig für die Kalibrierung verwendet werden, sind monatliche Gesamtver-

bräuche an Strom und Gas. Mit diesen können jedoch Fehler auf täglicher oder stündlicher Ebene nicht identifiziert werden. Außerdem können Verbräuche für Beleuchtung und Geräte nicht von den Gesamtlasten getrennt betrachtet werden, sodass sich Fehler in inneren Lasten und in den Wärme- und Kältebedarfen aufheben können und somit unbemerkt bleiben. Die Verwendung hoch aufgelöster Verbrauchsdaten verschiedener Endverbraucher als Vergleichsdaten für die Simulation ist demnach von Vorteil (Raftery, 2011).

Zu Beginn der Kalibrierung sollte festgelegt werden, wann das Modell als kalibriert gilt. Dazu sollten die simulierten Ergebnisse einerseits mit den jährlichen und saisonalen Energiemengen verglichen werden, andererseits aber auch die Übereinstimmung der täglichen oder stündlichen Lastprofile überprüft werden, sofern diese vorliegen (Waltz, 2000). Um die Abweichung zwischen den simulierten Werten und den Messwerten zu quantifizieren, verwendet ein Großteil der Autoren den relativen Fehler MBE (*engl: mean bias error*) sowie den Variationskoeffizienten der Wurzel der mittleren Fehlerquadratsumme CV(RMSE) (*engl: coefficient of variation of the root mean squared error*).

$$MBE = \sum_{i=1}^n \frac{M_i - S_i}{M_i} \quad (7.1)$$

$$CV(RMSE) = \frac{RMSE}{\bar{M}} \quad \text{mit} \quad \bar{M} = \frac{\sum_{i=1}^n M_i}{N}, \quad RMSE = \frac{\sum_{i=1}^n (M_i - S_i)^2}{N} \quad (7.2)$$

Als Toleranzwert der Fehlermaße werden häufig die in Tabelle 7.1 aufgelisteten Werte nach ASHRAE 14-2002 verwendet. Die Fehlertoleranz ist abhängig von der Auflösung der Vergleichsdaten. Je höher die Auflösung der Messwerte, desto höher ist auch die Fehlertoleranz. Letztendlich bestimmt jedoch der geplante Verwendungszweck, wie genau ein Modell kalibriert werden sollte (Waltz, 2000).

Tabelle 7.1: Toleranzen für eine Kalibrierung nach ASHRAE Guideline 14-2002

Auflösung	MBE in %	CV(RMSE) in %
stündlich	±10	±30
monatlich	±5	±15

Um das Problem der Unterbestimmtheit zu adressieren, schlagen Reddy et al. (2007b) vor, nicht einzelne Werte für die Eingangsparameter zu identifizieren, sondern stattdessen einen Satz an Parametervektoren, der jeweils für eine gute Übereinstimmung mit den Messwerten sorgt. Bei der Analyse von Einsparmaßnahmen sollte der Einfluss der Maßnahmen für jede dieser Kombinationen der Eingangsparameter berechnet werden.

Das Vorgehen für die Kalibrierung ist abhängig von der zur Verfügung stehenden Datenmenge und -qualität. Sind stündliche Daten von Unterzählern vorhanden, kann ein anderes Vorgehen gewählt werden, als wenn monatliche Gesamtverbräuche vorliegen. Da es keine einheitliche Empfehlung zur Durchführung einer Kalibrierung gibt, haben unterschiedliche Autoren jeweils eigene Methoden entwickelt. Eine Übersicht über die verschiedenen Methoden wurde von Coakley et al. (2014) erstellt. Diese identifizierten verschiedene Bausteine einer Kalibrierung. Das angewendete Verfahren der Kalibrierung kann aus einem

oder mehreren dieser Bausteine zusammengesetzt sein. Die Autoren unterscheiden grundlegend zwischen manuellen und automatisierten Methoden. Manuelle Methoden, die in der großen Mehrzahl der Kalibrierungsanwendungen angewandt werden, beruhen auf analytischen Techniken. Diese gliedern sich weiter auf in die nachfolgend genannten Verfahren:

- Charakterisierungsmethoden, bei denen die Charakterisierung der physikalischen und Betriebscharakteristika über Gebäude-Audits und Kurzzeitmessungen im Vordergrund steht, um diese im Modell anpassen und gezielt vergleichen zu können.
- Grafische Methoden zum Vergleich von Simulationsergebnissen mit Messwerten.
- Modell-Vereinfachungen, bei denen die Komplexität des Modells über Reduzierung oder Aggregation der Eingangsvariablen herabgesetzt wird, beispielsweise indem die Kalibrierung zu einem Zeitraum durchgeführt, zu dem weder Heiz- noch Kühlenergie benötigt wird und das Gebäude von inneren, nicht-wetterabhängigen Lasten dominiert wird.
- Verfahrenserweiterungen, beispielsweise Sensitivitäts- und Unsicherheitsanalysen, mit deren Hilfe die Anzahl der zu kalibrierenden Parameter auf die einflussreichsten reduziert wird. Weiterhin zählen die Autoren die evidenzbasierte Methode zu dieser Gruppe, bei der Änderungen an Parametern nur dann vorgenommen werden, wenn dies über die Gebäudedokumentation oder Messungen begründet werden kann, statt zufälligen oder rein nach Maßgabe des Anwenders ausgewählten Änderungen. Jede Änderung wird genau dokumentiert und erfolgt nach einer festgelegten Priorisierung. So können die Entscheidungen nachvollzogen werden, sind reproduzierbar, verlässlich, physikalisch und über das tatsächliche Gebäude begründet. Die evidenzbasierte Methode wurde vor allem durch Raftery (2011) angewandt.

Bei den automatisierten Methoden wird auf mathematische oder statistische Verfahren zurückgegriffen, beispielsweise Optimierungsrechnungen oder die Verwendung alternativer Modellierungstechniken (Meta-Modelle oder neuronale Netze).

7.1.4 Fazit

Die Kalibrierung ist ein wichtiger Schritt bei der Modellierung, da andernfalls die korrekte Abbildung der Realität nicht garantiert werden kann und somit auch Rückschlüsse für den Gebäudebetrieb auf Basis des unkalibrierten Modelles fehlerhaft ausfallen können. Wichtige Herausforderungen sind die Wahl der Vergleichsdaten für die Kalibrierung und die Wahl einer geeigneten Methode. Hierzu gibt es keine Vorgabe eines standardisierten Vorgehens. Somit wird im nächsten Abschnitt eine Methodik für die Kalibrierung eines Gebäudemodells entwickelt und angewandt, welches für die Kalibrierung des Modells eines Krankenhauses geeignet ist.

7.2 Entwicklung und Anwendung einer eigenen Kalibrierungsmethodik

Im untersuchten Krankenhaus werden keine hoch aufgelösten Verbrauchsdaten erfasst. Die Verwendung der über Rechnungsdaten verfügbaren Gesamtverbräuche des Krankenhauses wird jedoch als nicht ausreichend angesehen, da das Krankenhaus aus mehreren komplexen Einzelgebäuden besteht und somit die Anzahl der Parameter, die das Gesamtgebäude beeinflussen, sehr hoch ist. Stattdessen werden die thermischen Energieströme einzelner Gebäude während relevanter Zeiträume gemessen und jeweils die einzelnen Gebäudebereiche mit den gemessenen Messwerten kalibriert. Die gewählte Methode wird im folgenden Unterkapitel erläutert und das Vorgehen anschließend am Beispiel des Wahlleistungsgebäudes vorgestellt.

7.2.1 Methode

Eine Reihe von Verfahren zur Kalibrierung von Gebäudemodellen aus der Literatur ist für Krankenhäuser nicht anwendbar. So gibt es beispielsweise in Krankenhäusern keine Zeiträume, in denen weder geheizt noch gekühlt wird, sodass das Modell vereinfacht und die inneren Lasten getrennt von den wetterabhängigen Lasten kalibriert werden können. Auch die Durchführung kontrollierter Messungen während der Nichtnutzung des Gebäudes ist nicht möglich, da es keine Phasen der Nichtnutzung gibt. Durch die Komplexität von Krankenhäusern, die zudem häufig aus vielen Einzelgebäuden bestehen, wird überdies die Verwendung der Gesamtverbräuche für die Simulation als nicht ausreichend angesehen. Daher wird eine Kalibrierungsmethode, die auf Kurzzeitmessungen der einzelnen Wärme- und Kälteströme im Gebäude aufbaut, vorgeschlagen. Eine schematische Darstellung der Methode ist in Abbildung 7.1 zu finden.

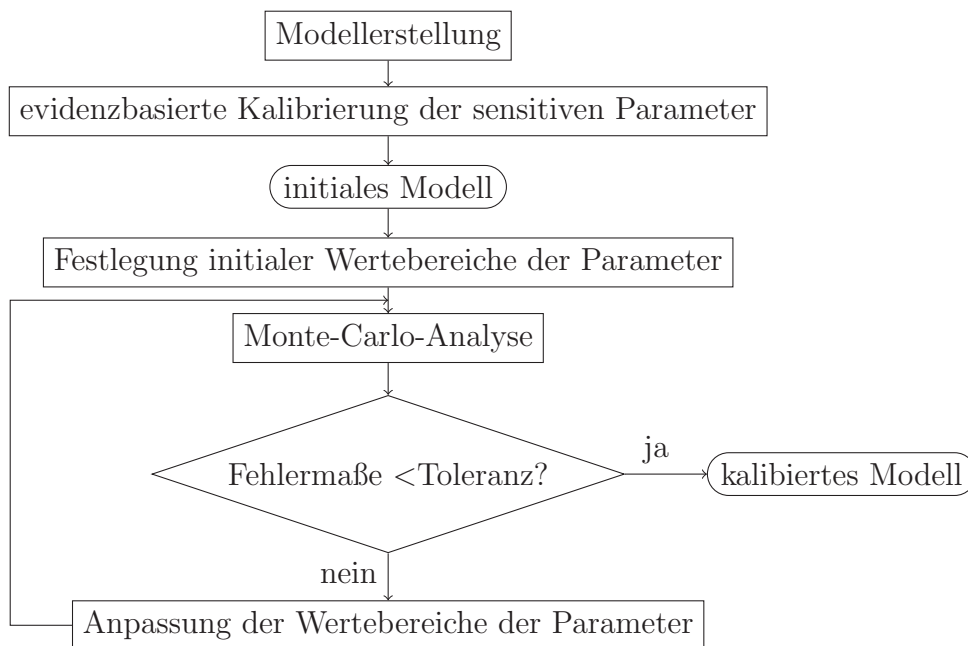


Abbildung 7.1: Ablaufschema der Kalibrierung

Zunächst sollten die vorhandenen Datenquellen so weit wie möglich ausgeschöpft und unter Anwendung der evidenzbasierten Kalibrierung nach Raftery (2011) ein Modell erstellt werden, welches die bestmöglichen Werte der Eingangsdaten verwendet. Dabei sollte vor allem den Parametern, die in der Sensitivitätsanalyse als wichtige Parameter identifiziert wurden und in Tabelle 6.8 aufgeführt sind, eine hohe Aufmerksamkeit geschenkt werden. So wird nur für die Eingangsdaten mit einem hohen Einfluss auf das Ergebnis ein hoher Aufwand bei der Bestimmung der Parameter betrieben. Außerdem sollten die stündlich aufgelösten Lastkurven verglichen werden, um festzustellen, ob grundsätzliche Abweichungen zwischen Modell und Simulation auftreten. So können beispielsweise fehlerhafte Betriebszeiten oder falsche Nutzungsmuster aufgedeckt werden.

Da durch die vorhandenen Datenquellen nicht alle Parameter mit hoher Genauigkeit bestimmt werden können, werden anschließend für alle diejenigen Eingangsparameter, deren Werte eine Restunsicherheit aufweisen, die minimalen und maximalen möglichen Werte bestimmt. Innerhalb dieser Grenzen wird eine Gleichverteilung angenommen. Auf Basis der Wahrscheinlichkeitsverteilungen wird eine Monte Carlo Analyse mit 100 Modellrechnungen durchgeführt. Dies geschieht unter der Annahme, dass die wahren Werte der Parameter innerhalb der angenommenen Wertebereiche liegen, der genaue Wert jedoch unbekannt ist. Durch die Simulation verschiedener Kombinationen der Werte der unsicheren Eingangsparameter wird diejenige Kombination gefunden, die zu der geringsten Abweichung zwischen Modell und Messwerten führt. Die Abweichung wird über den CV(RMSE) und den MBE bestimmt.

Die beste oder einige der besten Kombinationen könnten bereits als Parameter für das kalibrierte Modell ausgewählt werden. Da jedoch nicht für jede untersuchte Ergebnisgröße derselbe Satz an Eingangsparametern derjenige sein muss, der zu einer guten Übereinstimmung mit den Messwerten führt und um das Ergebnis noch weiter zu verbessern, werden mehrere Iterationsschritte durchgeführt. Dazu werden die Wertebereiche der Eingangsparameter so angepasst, dass sie die Werte der besten Ergebnisse repräsentieren. Diese Methode wird in den folgenden Kapiteln anhand der Kalibrierung des Wärme- und Kältebedarfs des Wahlleistungsgebäudes erläutert. Für die Beschreibung des Gebäudes siehe Kapitel 3.2.2.

7.2.2 Vergleichsdaten für die Kalibrierung

Der Wärmebedarf des Gebäudes teilt sich auf in den Bedarf der statischen Heizung, der Trinkwarmwasserbereitung und der raumluftechnischen Anlage. Der Kältebedarf setzt sich aus dem Bedarf für die raumluftechnische Anlage und dem Bedarf für die Kühldecken zusammen. Die minimale Außentemperatur für den Betrieb der Kältemaschine liegt bei 16 °C, sodass im Winter keine Kühlenergie genutzt wird. Die Wärme- und Kältemengen wurden jeweils im Winter und im Frühjahr gemessen. Für die Wärme wurden zwei verschiedene Messungen durchgeführt. Von dem zweiten Messzeitraum sind jedoch nur wenige Tage verwertbar, da daran anschließend durch einen funktionsunfähigen Ventilator kein Normalbetrieb mehr vorlag. Tabelle 7.2 fasst die für die Kalibrierung verwendbaren Messungen zusammen. Die Messdaten wurden in minütlicher Auflösung erfasst, sodass sehr viele Schwankungen der thermischen Leistungen enthalten sind, die im Modell nicht

Tabelle 7.2: Gemessene thermische Energiemengen im Wahlleistungsgebäude

Messgröße	Messzeitraum	Energiemenge in kWh
Wärme RLT	14.01.-22.01.2014	1426
	04.02.-08.02.2014	326
stat. Heizung	14.01.-20.01.2014	2337
	04.02.-08.02.2014	1556
Kälte RLT	28.04.-08.05.2014	598
Kälte Kühldecken	28.04.-08.05.2014	55

repräsentiert werden können. Zur Verwendung für die Kalibrierung wurden die Messwerte zu stündlichen Werten aggregiert und der Verlauf somit geglättet.

7.2.3 Initiales Modell

Das initiale Modell wurde mit Hilfe der im Gebäude verfügbaren Dokumentation zu Gebäude, Anlagen und Anlagenbetrieb sowie den Profilen der einzelnen Raumtypen für Beleuchtung, Geräte und Lüftung erstellt. Beim Vergleich der gemessenen, stündlich aufgelösten Verläufe der Wärme- und Kältebelastungen mit den simulierten Lastverläufen fiel auf, dass in der Simulation der Kältebedarf erst bei höheren Temperaturen auftrat. Obwohl in den Dokumentationsunterlagen eine Freigabe der Kältemaschine erst ab einer Außentemperatur von 16 °C angegeben war, lag der Grenzwert für die Freigabe der Kältemaschine in der Praxis niedriger. Das Modell wurde dementsprechend angepasst.

Im Vergleich mit den Messdaten ergaben sich die in Tabelle 7.3 aufgeführten Abweichungen. Das initiale Modell überschätzt den Wärmebedarf der statischen Heizung und den Kältebedarf für RLT und Kühldecken. Der Wärmebedarf der RLT-Anlage wird jedoch deutlich unterschätzt. Die besten Ergebnisse werden für den RLT-Kältebedarf erreicht. Die Werte der Fehlermaße liegen jedoch für alle vier Größen weit über den zulässigen Grenzwerten nach ASHRAE (Tabelle 7.1). Da im Messzeitraum nur eine geringe Kältemenge über die Kühldecken abgenommen wurde, tritt hierbei eine besonders hohe relative Abweichung auf.

Tabelle 7.3: Fehler der initialen Simulation im Vergleich zu den Messdaten

	Fehler in %			
	stat. Heizung	Wärme RLT	Kühldecken	Kälte RLT
CV(RMSE)	119,3	129,2	363,1	26,7
MBE	99,6	-56,1	249,9	23,5

Der Vergleich der Simulationsergebnisse mit den Messdaten des ersten Messzeitraums ist zudem in Abbildung 7.2 grafisch dargestellt. Auch hier zeigt sich deutlich, dass insbesondere die thermischen Energien der raumlufttechnischen Anlage durch das Modell sehr

fehlerhaft wiedergegeben werden.

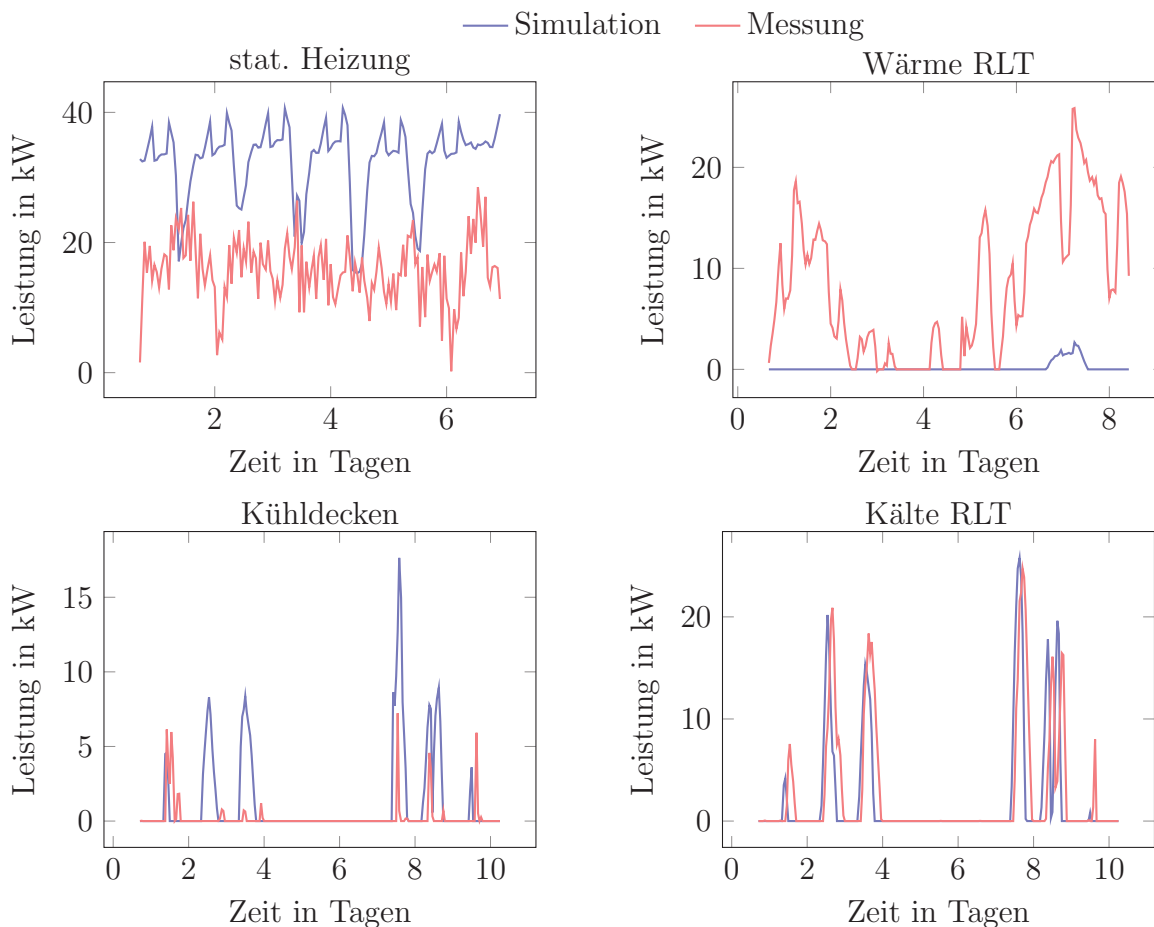


Abbildung 7.2: Vergleich der Mess- und Simulationsergebnisse des initialen Modells

7.2.4 Iterative Monte-Carlo-Analyse

Ausgehend von dem initialen Modell wurde eine Monte-Carlo-Simulation mit 100 Simulationsrechnungen durchgeführt. Dabei wurden 13 Eingangsparameter variiert. Die Wärmeabgabe der inneren Lasten (Geräte, Beleuchtung und Personen) wurde nicht, wie in der Sensitivitätsanalyse in Kapitel 6, getrennt, sondern als gemeinsamer Faktor variiert. Tabelle 7.4 listet die untersuchten Parameter mit den initialen Werten der Verteilungen auf.

Tabelle 7.4: Werte der Parameter für die erste Iterationrechnung der Kalibrierung

	U_F	g	a_R	T_{Heiz}	$T_{Kühl}$	\dot{V}_{ZW}	$f_{\dot{V}_{Zu}}$	$f_{\dot{V}_{Ab}}$	\dot{Q}_{IL}	a_{Inf}	b_{Inf}	RWZ	T_{Zu}
Min	1,3	0,6	0,18	21,0	23	0,5	0,7	0,7	0,6	-0,5	-0,05	0,5	15,5
Max	1,5	0,7	0,32	22,5	25	1,5	1,3	1,3	1,4	0,5	0,05	0,7	16,5

Es wurden Gleichverteilungen verwendet, um aus den Ergebnissen einfach die Parameter

ablesen zu können, die zu einer guten oder schlechten Übereinstimmung mit den Messwerten führen.

Mit diesen Eingangsparametern ergeben sich die in Tabelle 7.5 aufgelisteten Werte für den stündlichen CV(RMSE) für die einzelnen Energiemengen. Es ist jeweils der Wert für das beste und schlechteste Ergebnis der 100 Simulationsrechnungen aufgeführt. Während für den Wärmebedarf bereits einzelne gute Ergebnisse mit einer geringen Abweichung von den Messwerten erreicht werden, weisen alle Ergebnisse für den Kältebedarf hohe Unterschiede im Vergleich zu den Messwerten auf. Zu erwähnen ist weiterhin, dass derjenige Eingangsparametersatz, der zu dem besten Ergebnis für die Wärme- und Kältemengen der statischen Heizung und der Kühldecken führt, nicht mit den besten Parameterkombinationen für die Wärme- und Kältebedarfe der raumlufttechnischen Anlage übereinstimmt.

Tabelle 7.5: Abweichungen der besten und schlechtesten Ergebnisse im Vergleich zu den Messwerten für die 1. Iteration

	Fehler in %			
	stat. Heizung	Wärme RLT	Kühldecken	Kälte RLT
CV(RMSE) min	6,3	4,3	38,6	7,0
CV(RMSE) max	269,7	336,1	3356,3	79,4

Die Verteilung der Simulationsergebnisse kann grafisch in Form eines Histogramms (Abbildung 7.3) dargestellt werden.

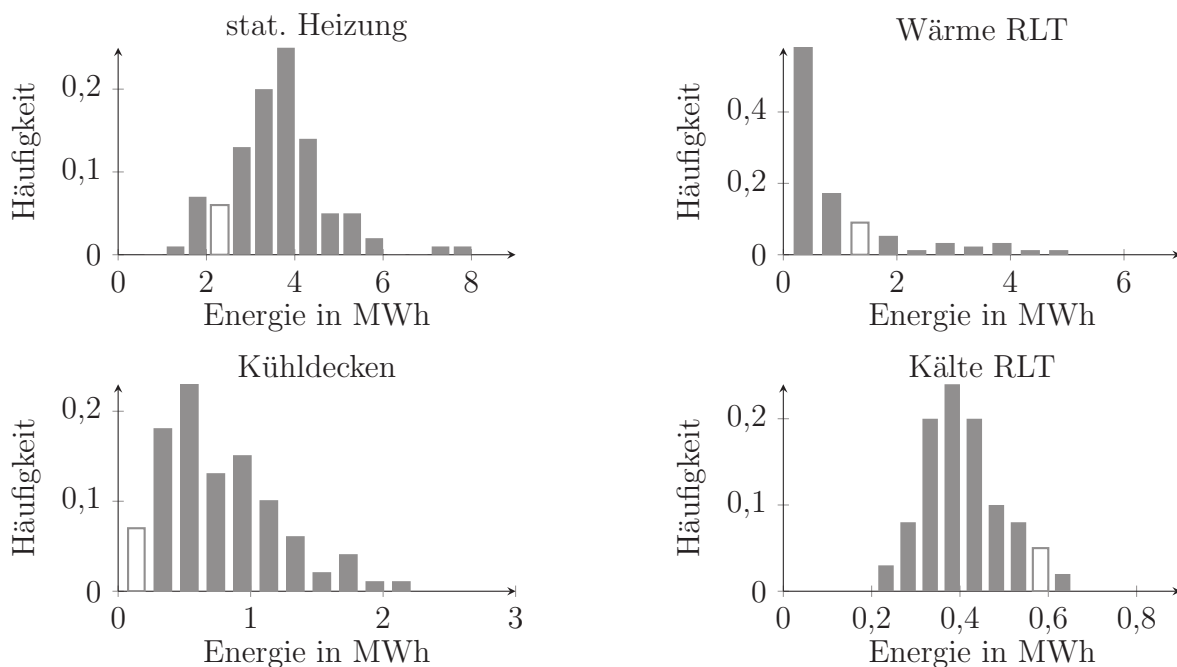


Abbildung 7.3: Ergebnisse der ersten Monte-Carlo-Analyse zur Kalibrierung des Wahlleistungsgebäudes, nicht-ausgefüllter Balken: Messung

Der nicht-ausgefüllte Balken zeigt an, in welchem Wertebereich die Messergebnisse liegen. Für jede der vier Messgrößen wurden Parameterkonfigurationen gefunden, für die die Simulationsergebnisse in der richtigen Höhe liegen. Diese machen jedoch für keine der vier Größen die häufigsten simulierten Ergebnisse aus. Zudem ist die Spannweite der Ergebnisgrößen sehr breit. Das Ziel ist es nun, die Verteilungen der Eingangsgrößen so anzupassen, dass die Bandbreite der Ergebnisse reduziert wird, die korrekten Ergebnisse mit einer hohen Wahrscheinlichkeit auftreten und der stündliche CV(RMSE) reduziert wird.

Dazu wird betrachtet, für welche Werte der Eingangsparameter Simulationsergebnisse mit einem geringen CV(RMSE) auftreten und für welche dieser einen hohen Wert annimmt. Da die RLT-Kälteleistung lediglich von der Zuluftmenge und der Zulufttemperatur abhängt (vgl. Kapitel 6.3.3), werden zunächst diese Verteilungen angepasst. In Abbildung 7.4 ist ein grafischer Vergleich der Verteilung der Werte, die von den besten zehn und schlechtesten zehn Ergebnissen für die Kälteenergie der raumlufttechnischen Anlage angenommen werden, abgebildet. Es zeigt sich sehr deutlich, dass nur derjenige Satz an Eingangsdaten, bei denen ein hoher Zuluftvolumenstrom $f_{\dot{V}_{Zu}}$ und eine geringe Zulufttemperatur T_{Zu} simuliert wurden, zu guten Simulationsergebnissen führen.

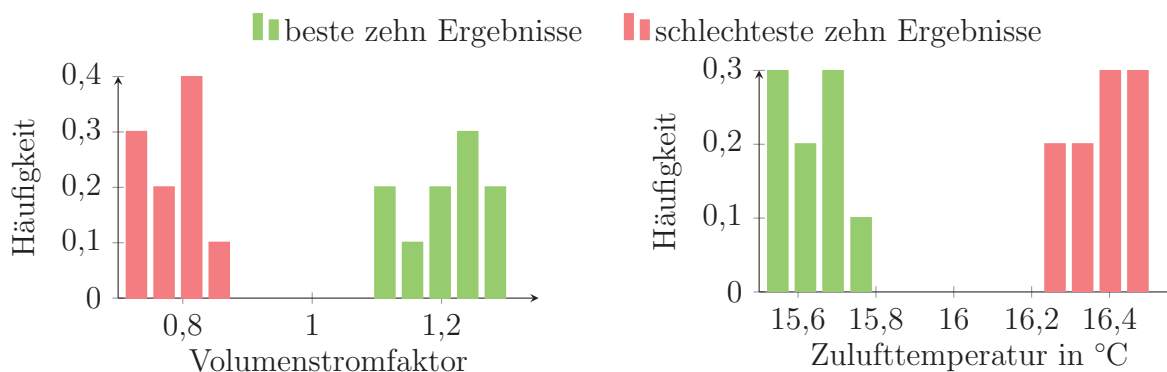


Abbildung 7.4: Verteilung der Eingangswerte für Zuluftvolumenstrom und -temperatur der besten und schlechtesten zehn Ergebnisse der RLT-Kälteenergie

Als Folge werden die Wahrscheinlichkeiten dieser beiden Eingangsdaten angepasst und die Monte-Carlo-Rechnungen mit einem neu generierten Eingangsdatensatz wiederholt. Die Werte der Parameter des zweiten Satzes an Rechnungen sind in Tabelle 7.6 angegeben.

Tabelle 7.6: Werte der Parameter für die zweite Iterationrechnung der Kalibrierung

	U_F	g	a_R	T_{Heiz}	$T_{Kühl}$	\dot{V}_{ZW}	$f_{\dot{V}_{Zu}}$	$f_{\dot{V}_{Ab}}$	\dot{Q}_{IL}	a_{Inf}	b_{Inf}	RWZ	T_{Zu}
Min	1,3	0,6	0,18	21,0	23	0,5	0,85	0,7	0,6	-0,5	-0,05	0,5	15,3
Max	1,5	0,7	0,32	22,5	25	1,5	1,3	1,3	1,4	0,5	0,05	0,7	15,9

Mit diesen Parameterwerten ergeben sich die in Tabelle 7.7 angegebenen Abweichungen von den Messwerten. Abbildung 7.5 zeigt die Histogramme für die vier Ergebnisgrößen.

Tabelle 7.7: Abweichungen der besten und schlechtesten Ergebnisse im Vergleich zu den Messwerten nach der zweiten Iterationsrechnung

	Fehler in %			
	stat. Heizung	Wärme RLT	Kühldecken	Kälte RLT
CV(RMSE) min	6,7	5,4	47,1	5,1
CV(RMSE) max	294,1	253,2	2865,8	37,7

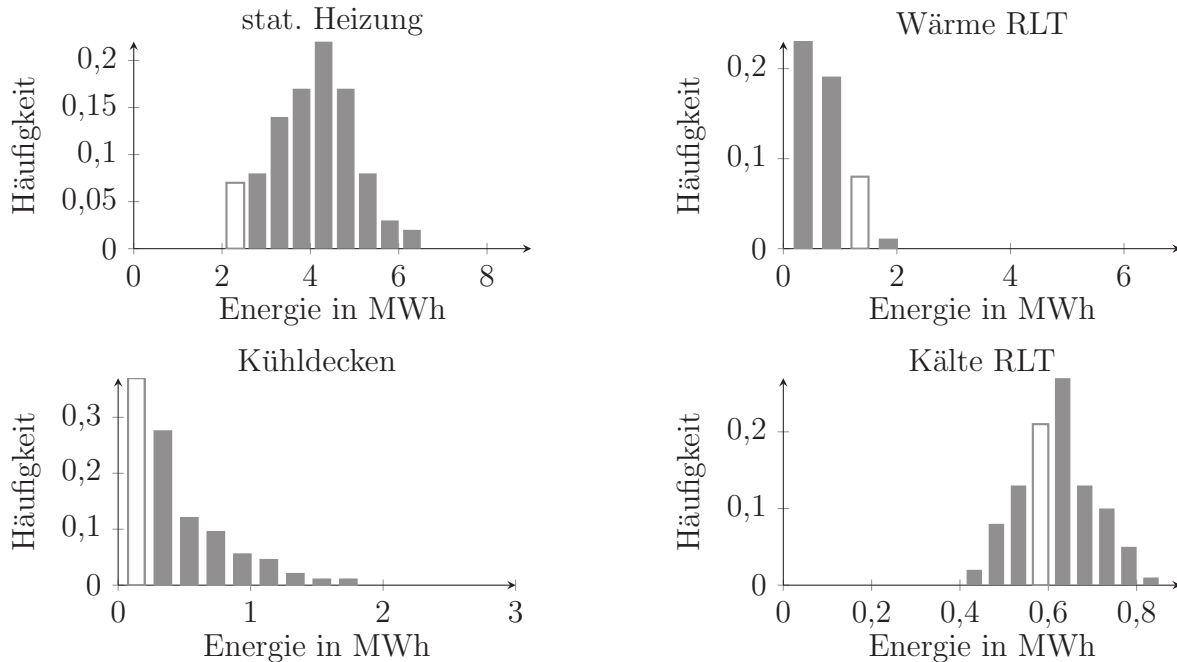


Abbildung 7.5: Ergebnisse der Monte-Carlo-Analyse zur Kalibrierung des Wahlleistungsgebäudes nach zwei Iterationen, nicht-ausgefüllter Balken: Messung

Die Abweichungen von den Messwerten haben sich für die Kälte der raumlufttechnischen Anlage deutlich verbessert. Die besten Ergebnisse weisen nun einen CV(RMSE) von 5% auf und auch die Wertebereiche der Fehlermaße haben sich verkleinert und der maximale Fehler ist nun signifikant geringer. Die Wertebereiche der Ergebniswerte in Abbildung 7.5 haben sich zwar nicht verkleinert, sind jedoch nun so verschoben, dass die korrekten Ergebnisse einen größeren Anteil ausmachen als nach der ersten Rechnung. Auch für den Wärme- und Kältebedarf der RLT-Anlage haben sich die Ergebnisse verbessert. Die Ergebnisse der statischen Heizung weisen hingegen eine leichte Verschlechterung auf.

Nun werden wieder die Werte der Parameter betrachtet, die zu den besten und schlechtesten zehn Ergebnissen führen. Dazu wird für jeden Parameter und auch für die übrigen Ergebnisgrößen ein Histogramm wie in Abbildung 7.4 erzeugt. Bei eindeutigen Unterschieden zwischen den besten und schlechtesten Ergebnissen wurde die Verteilung des Parameters entsprechend angepasst. Da die Parameter sich gegenseitig beeinflussen und

veränderte Werte für einige Parameter auch eine Veränderung der besten und schlechtesten Werte für andere Werte bedingen, ist ein iterativer Prozess nötig. Das beschriebene Vorgehen wurde insgesamt 14 Mal wiederholt, bis keine eindeutigen Tendenzen für die Parameter mehr feststellbar waren und die Wertebereiche der Ergebniswerte verringert waren. Nicht immer sind die Tendenzen so eindeutig wie in Abbildung 7.4. Angepasst wurden daher jeweils nur die Parameter, für die ein eindeutiger Unterschied zwischen den Werten der besten und schlechtesten Ergebnisse sichtbar war.

7.2.5 Kalibriertes Modell

Die Wertebereiche der Eingangsparameter für die letzte Monte-Carlo-Rechnung sind in Tabelle 7.8 aufgeführt. Im Vergleich zu den Werten der ersten Iteration zeigt sich, dass sich die Wertebereiche aller Parameter verkleinert haben. Besonders für den U-Wert des Fensters, die Zuluftmenge und die Zulufttemperatur wurden diese deutlich schmaler. Für die Zulufttemperatur wurden in der letzten Iteration Werte gewählt, die außerhalb des Wertebereiches für die erste Iteration liegen.

Tabelle 7.8: Werte der Parameter für die 14. Iterationrechnung der Kalibrierung

	U_F	g	a_R	T_{Heiz}	$T_{Kühl}$	\dot{V}_{ZW}	$f_{\dot{V}_{Zu}}$	$f_{\dot{V}_{Ab}}$	\dot{Q}_{IL}	a_{Inf}	b_{Inf}	RWZ	T_{Zu}
Min	1,43	0,61	0,20	21,4	24,9	1,35	0,971	0,70	1,34	0,2	0,030	0,51	15,30
Max	1,44	0,63	0,25	21,7	25,1	1,48	0,974	0,76	1,40	0,35	0,038	0,54	15,33

Tabelle 7.9 listet die minimalen und maximalen Fehlermaße der Ergebnisse der letzten Simulationsrechnungen auf. Für alle vier Größen werden die nach ASHRAE 14-2002 zulässigen Fehler eingehalten.

Tabelle 7.9: Abweichungen der besten und schlechtesten Ergebnisse im Vergleich zu den Messwerten nach 14 Iterationen

	Fehler in %			
	stat. Heizung	Wärme RLT	Kühldecken	Kälte RLT
CV(RMSE) min	6,3	4,6	33,5	5,0
CV(RMSE) max	21,0	37,6	56,6	5,5

Ein Vergleich der Lastverläufe für die vier Energiemengen ist in Abbildung 7.6 für das jeweils beste Ergebnis dargestellt. Es zeigt sich, dass das Ziel erreicht wurde und die Simulationsergebnisse die Messwerte gut nachbilden. Lediglich für die statische Heizung, bei der die Messwerte eine starke Schwankung aufweisen, treten Abweichungen zwischen Messung und Simulation auf. Da sich die positiven und negativen Abweichungen aufheben und die simulierte Energiemenge über den Zeitraum somit nur eine geringe Abweichung von den Messwerten aufweist, werden die Differenzen zwischen Messung und Simulation als nicht gravierend angesehen. Grundsätzlich zeigt sich, dass schnell reagierende, gut geregelte Systeme, wie die RLT-Anlagen besser abgebildet werden als die trägeren Heizungssysteme und Kühldecken, die zudem auch stärker durch den Nutzer beeinflusst werden.

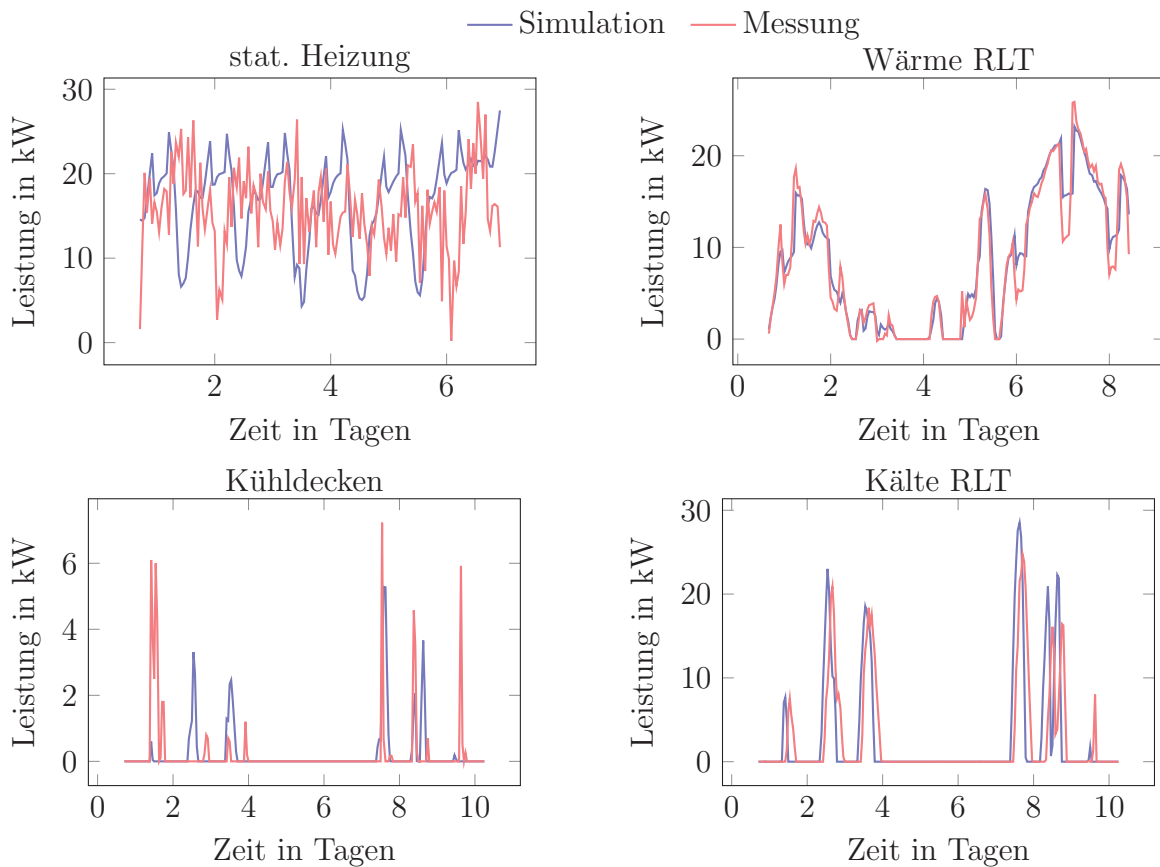


Abbildung 7.6: Vergleich der Messwerte und Simulationsergebnisse nach 14 Iterationen

Ein Vergleich der Verteilungen der Ergebnisse für die letzte Simulation ist in Abbildung 7.7 dargestellt. Es wurde der gleiche Maßstab gewählt wie in den vorherigen Abbildungen, was dazu führt, dass nur noch einzelne Balken erkennbar sind, da deutlich schmalere Wertebereiche der Ergebnisse auftreten. Für die Kälte der RLT-Anlage liegen die Ergebnisse aller Parametersätze leicht über den Messwerten. Da jedoch nur eine geringe Kältemenge abgenommen wurde, ist der absolute Fehler dennoch nicht hoch.

7.2.6 Fazit

Die Betrachtung der initialen Modelle zeigt, dass die Durchführung einer Kalibrierung unerlässlich ist. Auch wenn die initialen Modelle sorgfältig und auf Basis aller im Gebäude vorhandenen Informationen erstellt wurden, können große Abweichungen zwischen den Mess- und Simulationsergebnissen auftreten.

Die Erfassung der thermischen Energiemengen über Kurzzeitmessungen erwies sich grundsätzlich als geeignet für die Kalibrierung. Für das Wahlleistungsgebäude konnten die Abweichungen zwischen Simulation und Messwerten so weit reduziert werden, dass die Grenzwerte nach ASHRAE eingehalten werden.

Indem die Kälte- und Wärmeenergie für die direkte Konditionierung der Gebäude über

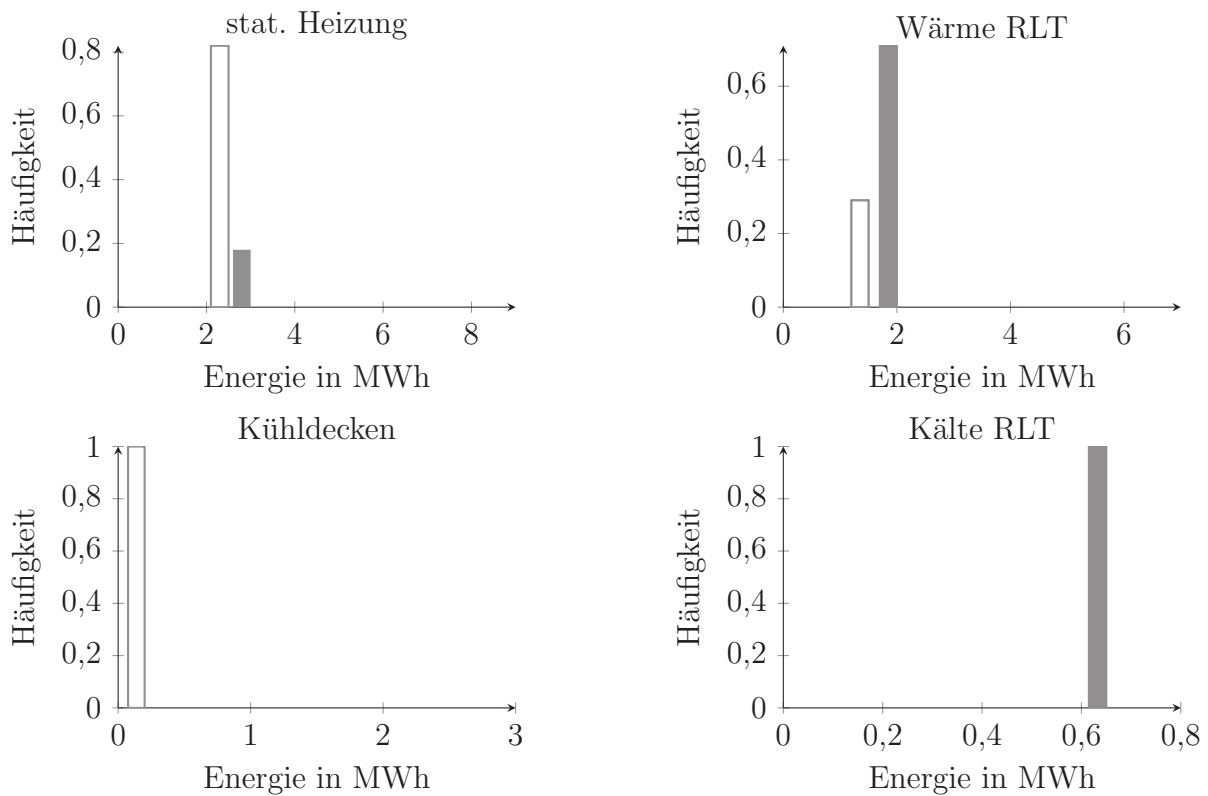


Abbildung 7.7: Ergebnisse der Monte-Carlo-Analyse zur Kalibrierung des Wahlleistungsgebäudes nach 14 Iterationen, nicht-ausgefüllter Balken: Messung

statische Heizung und Kühldecken separat von der Kälte- und Wärmemenge für die Konditionierung der Zuluft erfasst wurde, standen verschiedene Ergebnisgrößen für die Kalibrierung zur Verfügung. Durch die zuvor durchgeführte Sensitivitätsanalyse konnte die Anzahl der zu variierenden Parameter auf die Parameter mit hohem Einfluss auf die Ergebnisse beschränkt werden. Einige Parameter hatten einen Einfluss auf mehrere der Ergebnisgrößen, andere nur auf eine. Indem beispielsweise die Zulufttemperatur eine Relevanz für alle vier Vergleichsgrößen zeigte und so angepasst werden musste, dass dies für alle Energiemengen passende Ergebnisse ergab, wurde die Gefahr verringert, dass die Ergebnisse zwar für den Betrachtungszeitraum und eine einzelne Ergebnisgröße stimmen, außerhalb dieser aber falsche Ergebnisse aufweisen.

Da die Messzeiträume nur wenige Wochen umfassen, ist die Rechenzeit der Modelle für diese Zeiträume ausreichend kurz, sodass eine mehrmalige Wiederholung der Modellrechnungen möglich ist. Die nötige Anzahl der Iterationsrechnungen kann je nach Zielsetzung variiert werden, bis die jeweils gewünschte Genauigkeit der Ergebnisse erreicht ist.

Durch den nicht immer idealen Gebäudebetrieb kann die Messung ungewöhnliches, fehlerhaftes und nicht ideal geregeltes Verhalten beinhalten. Dies muss in der Kalibrierung beachtet und das Modell angepasst werden. Sollwerte können innerhalb des Kalibrierungszeitraums verändert werden. Diese Sollwertänderung muss auch im Modell vorgenommen werden, damit die Kalibrierung erfolgreich durchgeführt werden kann.

Kapitel 8

Durchführung von Auswertungen

Anhand des erstellten kalibrierten Gebäudemodells kann eine Vielzahl von Auswertungen durchgeführt werden. Im Rahmen dieser Arbeit liegt ein Fokus einerseits darauf, basierend auf den Simulationsergebnissen ein besseres Verständnis der Zusammenhänge im Gebäude zu erlangen sowie andererseits mit Hilfe des Modells Einsparmaßnahmen zu analysieren. Zunächst wird das Vorgehen in bisherigen Studien zusammengefasst, um anschließend im Rahmen der Fallstudie eigene, beispielhafte Analysen durchzuführen.

8.1 Hintergrund zur Durchführung von Auswertungen

Mit Hilfe von Simulationen können verschiedene Fragestellungen untersucht werden. Wird, wie im vorliegenden Fall, ein bestimmtes reales Gebäude simuliert und das Modell mit Hilfe dieses Gebäudes kalibriert, so werden zumeist gebäudespezifische Fragestellungen ausgewertet. Das kalibrierte Modell kann verwendet werden, um einen Einblick in die Lastkurven des Gebäudes und seiner Endverbraucher zu erlangen und anhand des Modells Betriebsoptimierungen und andere Einsparmaßnahmen zu untersuchen (Costa et al., 2009; Reddy, 2006). Dies kann beispielsweise im Rahmen einer energetischen Gebäudesanierung eingesetzt werden, um vorab die Höhe der Einsparmaßnahmen zu bestimmen. Hierzu werden verschiedene Maßnahmen vordefiniert und durch die Simulation ausgewertet (Diakaki et al., 2008). Da für die Kalibrierung des Modells ein Gebäudeaudit notwendig ist, welches auch im Rahmen der energetischen Gebäudesanierung benötigt wird, um den Ist-Zustand des Gebäudes einzuschätzen, ergibt sich ein Synergieeffekt.

8.1.1 Berechnung von Einsparmaßnahmen durch energetische Gebäudesimulation

Das Ziel einer energetischen Gebäudesanierung ist die Verbesserung der Energieeffizienz eines Gebäudes unter Beibehaltung des thermischen und visuellen Komforts und einer akzeptablen Luftqualität für die Nutzer. Die Auswahl von Einsparmaßnahmen ist ein multikriterielles Optimierungsproblem, da viele interne und externe Faktoren und Zielsetzungen in die Entscheidung einfließen und einzelne Maßnahmen sich untereinander beeinflussen können (Ma et al., 2012).

Auswahl der Einsparmaßnahmen

Eine Möglichkeit zur Identifikation von Einsparpotenzialen ist der Vergleich der Verbrauchsdaten des jeweiligen Gebäudes mit denen anderer Gebäude (Xing et al., 2015). Häufig wird begleitend zur Simulation ein Gebäudeaudit durchgeführt, um die Eingangsdaten für die Simulation zu erheben. Mit Hilfe dieses Audits können Mängel und fehlerhafter Betrieb aufgedeckt werden (Zhu, 2006; Tahsildoost und Zomorodian, 2015). Auch über die Analyse von Datentrends über einen längeren Zeitraum können Einsparpotenziale identifiziert werden (Iqbal und Al-Homoud, 2007; Wang et al., 2013). In einigen Studien wurden die zu simulierten Maßnahmen unter Berücksichtigung der Randbedingungen des jeweiligen Gebäudes aus Standardmaßnahmen aus der Literatur ausgewählt (Tahsildoost und Zomorodian, 2015; Gücyeter und Günaydın, 2012). Die Zahl der simulierten Maßnahmen lag in den betrachteten Studien zwischen eins und neun. Im Mittel wurden vier Maßnahmen untersucht.

Methoden

In den betrachteten Studien wurden die Maßnahmen häufig sowohl einzeln, als auch kombiniert simuliert. Würden nur die kombinierten Maßnahmen simuliert, so würde nicht deutlich werden, wie groß der Anteil jeder einzelnen Maßnahme an der Einsparung ist und ob jede Maßnahme zur Einsparung beiträgt. Die Simulation der kombinierten Maßnahmen ist zusätzlich sinnvoll, da die Einsparung bei der gleichzeitigen Anwendung mehrerer Maßnahmen nicht der Summe der Einsparungen der Einzelmaßnahmen entspricht. Zumeist ist die Einsparung der Summe der einzelnen Maßnahmen höher als die der kombinierten Maßnahmen. In Einzelfällen kann jedoch auch der umgekehrte Fall auftreten. Thermische Verbräuche sind stärker als elektrische Verbräuche von dem nicht-additiven Effekt der Einsparmaßnahmen betroffen (Chidiac et al., 2011). Somit sollte die Berechnung der Maßnahmen immer sowohl einzeln als auch kombiniert erfolgen.

Statt der Simulation einzelner, vorausgewählter Maßnahmen könnten die optimalen Werte für die Betriebs- und Anlagenparameter auch über eine mathematische Optimierung gewählt werden. Dies ist jedoch nur für sehr einfache Modelle und wenige Maßnahmen gleichzeitig möglich. Bei realistischeren Aufgabenstellungen, die über die sehr vereinfachten, bisher betrachteten Probleme hinausgehen, steigt die Komplexität sehr stark an, sodass diese nur mit großem Aufwand gelöst werden können (Diakaki et al., 2008).

Mit Hilfe des kalibrierten Modells kann eine automatisierte Bestimmung optimaler Betriebsstrategien durchgeführt werden. Costa et al. (2009) entwickelten die *Key Factors Methode* für die kontinuierliche Betriebsüberwachung (continuous commissioning). Bei dem Verfahren wird eine modellbasierte Wahl der besten Werte für bestimmte Betriebsparameter, die sogenannten *Key Factors*, getroffen. Die Entscheidung, welche Betriebsparameter zu den *Key Factors* gezählt werden, sollte über eine Sensitivitätsanalyse erfolgen. Für die Bestimmung der Werte der *Key Factors* wird ein kalibriertes Modell zunächst mit dem Basis-Satz der *Key Factors*, deren Werte dem realen Gebäudebetrieb entsprechen, simuliert. Zuvor definierte Ergebnisgrößen, die sowohl den Energieverbrauch als auch den Nutzerkomfort quantifizieren, werden berechnet und in einer Ergebnistabelle notiert. Anschließend werden die Werte der *Key Factors* verändert und die Ergebnisse für jede

Simulationsrechnung wiederum in die Ergebnistabelle eingetragen. Schließlich werden die besten Wertekombinationen der *Key Factors* über die Ergebnistabelle identifiziert. Dabei muss in der Regel ein Kompromiss zwischen Nutzerkomfort und Energieverbrauch getroffen werden.

Einbeziehung der Unsicherheit

Trotz der Nutzung eines kalibrierten Modells für die Berechnung der Einsparung kann es zu Diskrepanzen zwischen der Einsparung, wie sie im Modell berechnet wurde und dem realen Einspareffekt kommen. Dies ist nach Li et al. (2015) unter anderem gegeben durch die Verwendung von auf Schätzungen basierenden Anwesenheitsprofilen und der Tatsache, dass ein Modell, welches für einen Ist-Zustand kalibriert wurde, nicht uneingeschränkt für die Modellierung des Zustands nach der Durchführung einer Sanierung verwendet werden kann. Traditionell wird mit dieser Unsicherheit umgegangen, indem das installierte Equipment überdimensioniert wird (Macdonald, 2002).

Mit Hilfe einer Simulation in Kombination mit einer Unsicherheitsanalyse kann die Unsicherheit jedoch quantifiziert und in den Entscheidungsprozess einbezogen werden. Die Fragestellung, ob ein bestimmter Grenzwert überschritten wird, ist eine beispielhafte Problemstellung, die mit Hilfe des Modells beantwortet werden kann. Bei deterministischen Untersuchungen, bei denen die Unsicherheitsverteilung nicht berücksichtigt wird, werden derartige Fragen mit einem einfachen „Ja“ oder „Nein“ beantwortet. Mit Einbeziehung der Unsicherheit kann hingegen eine Aussage über die Wahrscheinlichkeit des Überschreitens eines Grenzwertes getroffen werden. Dies ermöglicht fundiertere und objektivere Entscheidungen (Burhenne und Herkel, 2012).

Wie die Einbeziehung dieser Unsicherheit in den Entscheidungsprozess aussehen kann, zeigt eine Studie von Burhenne und Herkel (2012). Sie simulierten ein Wohngebäude mit Solarkollektor und bestimmten den solaren Deckungsgrad der thermischen Energie in Abhängigkeit von vier unsicheren Gebäudeparametern. Mit Hilfe einer Monte-Carlo-Simulation konnten sie die Unsicherheitsverteilung des solaren Deckungsgrades bestimmen. Somit wurde ersichtlich, mit welcher Wahrscheinlichkeit für ein bestimmtes Design ein solarer Deckungsgrad von mindestens 20 % erreicht wird. Ist diese Wahrscheinlichkeit für den Entscheidungsträger zu gering, so können die Designparameter angepasst werden, um so eine höhere Wahrscheinlichkeit zu erzielen.

Diese Methode lässt sich ebenfalls auf die Bewertung von Einsparmaßnahmen anwenden. Burhenne et al. (2010a) simulierten ein Bürogebäude und führten jeweils Monte-Carlo-Simulationen eines Modells, das den Ist-Zustand repräsentierte und eines Modells, das veränderte Betriebszeiten der Heizkreispumpen aufwies, durch. Für jede Rechnung wurde die Differenz des Heizwärmebedarfes beider Modelle bestimmt. Somit ergab sich eine Verteilung der erwarteten Einsparung und die Wahrscheinlichkeit, dass eine bestimmte Menge an Heizwärme eingespart wird, konnte bestimmt werden.

Vergleich mit tatsächlich umgesetzten Maßnahmen

Nur in drei Fällen wurden die zuvor berechneten Einsparmaßnahmen tatsächlich im Gebäude umgesetzt, sodass ein Vergleich der berechneten mit der tatsächlichen Einsparung

möglich ist. Bei Wang et al. (2013) sowie Tahsildoost und Zomorodian (2015) war die tatsächliche Einsparung jeweils um einige Prozentpunkte geringer als die berechnete Einsparung (30 % statt 34 %, 38 %/43 % und 10 % statt 15 %). Bei Xing et al. (2015) trat sogar eine höhere Einsparung (77,3 % statt 76,7 %) auf.

8.1.2 Fazit

Steht ein kalibriertes Gebäudemodell zur Verfügung, können mit dessen Hilfe verschiedene Fragestellungen beantwortet werden. Zum einen können Erkenntnisse über die Zusammensetzung der Energieverbräuche gewonnen werden, die in komplexen Gebäuden häufig nicht bekannt ist. Dies ist in der Regel auch in Krankenhäusern der Fall. Ein bestehendes Gebäude wird zudem häufig mit der Zielstellung simuliert, Betriebsoptimierungen zu ermitteln, die zu einem reduzierten Energieverbrauch und Betriebskosteneinsparungen führen. Da das Verhalten komplexer Gebäude häufig nicht intuitiv zu verstehen ist, hilft eine simulative Berechnung der Einsparmaßnahmen, die Auswirkungen von Änderungen quantitativ zu erfassen. Häufig werden während der Modellerstellung und -kalibrierung bereits Einsparmöglichkeiten deutlich. Andernfalls können Standardmaßnahmen ausgewählt werden. Um den Effekt der Maßnahmen einzuschätzen, können diese Maßnahmen simuliert und der resultierende Energieverbrauch mit dem Ist-Verbrauch des Gebäudes verglichen werden. Die einzelnen Maßnahmen sollten möglichst in Kombination simuliert werden, um additive Effekte der Maßnahmen zu erfassen. Indem die Unsicherheit der Eingangsparameter der Simulation berücksichtigt wird, kann die Wahrscheinlichkeit, dass ein bestimmter Einspareffekt eingehalten wird, bestimmt und in den Entscheidungsprozess mit einbezogen werden. Diese Methoden sind auf Krankenhäuser ebenso anwendbar wie auf andere Gebäudetypen.

8.2 Fallstudie zur Durchführung von Auswertungen

Mit Hilfe des kalibrierten Modells werden zwei Arten von Untersuchungen beispielhaft durchgeführt. Zum einen wird die Zusammensetzung der Energiebilanz des Krankenhauses analysiert. So können die Zusammenhänge zwischen dem Gebäudebetrieb, der Nutzung und dem Energiebedarf deutlich gemacht und Einsparpotenziale ermittelt werden. Zum anderen werden beispielhafte Einsparmaßnahmen simuliert.

8.2.1 Zusammensetzung der Energiebilanz des Krankenhauses

Das Krankenhaus hat einen Verbrauch von rund 5 Mio. kWh elektrischer Energie und rund 8,7 Mio. kWh thermischer Energie. Da die Kälteerzeugung elektrisch erfolgt, ist diese in der elektrischen Energiemenge enthalten. Tabelle 8.1 gibt die Anteile einzelner Verbraucher am elektrischen Gesamtverbrauch des Krankenhauses wieder. Falls Messungen vorhanden waren, sind diese Daten für die Bestimmung der Tabellenwerte verwendet worden. Die übrigen Zahlenwerte wurden über Simulationen berechnet.

Die Verbrauchsanteile der auf der linken Seite der Tabelle aufgelisteten Bereiche enthalten lediglich den Verbrauch der Geräte und der Beleuchtung. Der Stromverbrauch für die mechanische Belüftung und die Kälteerzeugung sind nicht enthalten, sondern geson-

Tabelle 8.1: Anteile verschiedener Verbraucher am Gesamtstromverbrauch des Krankenhauses

Verbraucher	Anteil am Stromverbrauch in %	Verbraucher	Anteil am Stromverbrauch in %
Pflegestationen	15,4 ²	RLT-Ventilatoren	20,6 ²
Behandlungsbereiche	15,3 ¹⁺²	Kälteerzeugung	4,7 ²
Küche + Cafeteria	8,3 ¹	Aufzüge	3,5 ¹
Zentralsterilisation	7,9 ¹	Drucklufterzeugung	1,4 ¹
OP-Stationen	4,3 ¹	Weitere Verbraucher	8,6
Bürobereiche	2,0 ²		
Intensivstation	0,6 ¹		
Sonstige Räume	7,3 ²		

¹ gemessen ² simuliert

dert aufgeführt. Eine direkte Zuordnung des Stromverbrauchs für die Raumlufttechnik zu den einzelnen Stationen ist nicht für alle Bereiche möglich, da zum Teil unterschiedliche Bereiche von gemeinsamen, zentralen Anlagen versorgt werden. Insgesamt macht der elektrische Verbrauch von Beleuchtung und Geräten etwa 60 % des gesamten Stromverbrauchs aus. Der übrige Teil des Verbrauchs wird durch technische Anlagen, Aufzüge sowie die Luftförderung und -konditionierung der raumlufttechnischen Anlagen hervorgerufen. Insbesondere die Luftverteilung durch die raumlufttechnischen Anlagen ist ein relevanter Verbraucher.

Der Energieverbrauch der Bürobereiche umfasst nur diejenigen Bereiche, die reine Büroräume sind. Auch die Pflegestationen und Behandlungsbereiche enthalten einzelne Büroräume, die jedoch zum Verbrauch der jeweiligen Stationen gezählt wurden. Sowohl Pflegestationen, als auch Behandlungsbereiche machen einen hohen Anteil des Energieverbrauches aus. Pflegestationen nehmen eine weitaus größere Fläche im Krankenhaus ein, jedoch enthalten die Behandlungsbereiche mehr energieintensive Geräte als die Pflegestationen. Beispielsweise verbraucht allein das MRT 2,1 % des gesamten Strombedarfs des Krankenhauses. PET/CT und CT verbrauchen gemeinsam ein weiteres Prozent.

Analyse des Strombedarfs der Pflegestationen

Pflegestationen haben mit knapp 40 % einen hohen Anteil an der gesamten Raumfläche im Krankenhaus und sind sehr spezifisch für den Gebäudetyp Krankenhaus. Daher wird im Folgenden der elektrische Energieverbrauch in den Pflegestationen analysiert. Diese Bestimmung der Energieverbräuche basiert auf den Raumprofilen, über die die Anteile der verschiedenen Verbraucher auf den Stationen ermittelt werden können. Es wird somit nur der verbraucherseitige Strombedarf ermittelt, keine Simulation durchgeführt und keine Wechselwirkungen mit anderen Energieformen berechnet. Auf Basis der berechneten Verbrauchsanteile werden Energieeinsparpotenziale ermittelt und Zielwerte für den En-

ergieverbrauch von Pflegestationen generiert. Tabelle 8.2 gibt einen Überblick über die Eckdaten der Pflegestationen im Krankenhaus.

Tabelle 8.2: Charakteristika der Pflegestationen des Krankenhauses

Größe	Median	Min	Max	Standard- abweichung
Bettenzahl	21	14	44	10
Fläche in m ²	514	332	1447	334
Fläche in m ² /Bett	26	20	48	7
el. Energieverbrauch in kWh/m ²	55	50	65	5
el. Energieverbrauch in MWh/Bett	1,4	1,1	2,4	0,3
Anteil Beleuchtung am Stromverbrauch in %	63	55	71	5

Insgesamt hat das Krankenhaus 17 Pflegestationen, von denen drei einen identischen Aufbau aufweisen. Die Bettenzahl der größten Station ist doppelt so groß wie die der kleinsten. Die Station mit der größten Fläche weist eine dreimal so große Fläche wie die kleinste Station auf. Der Energieverbrauch pro Fläche ist dennoch recht einheitlich. Der Energieverbrauch pro Bett hingegen zeigt größere Unterschiede, da auch die Fläche pro Bett in den einzelnen Stationen stärker variiert. In Abbildung 8.1 sind die Anteile der einzelnen Raumtypen am Gesamtverbrauch der jeweiligen Station dargestellt.

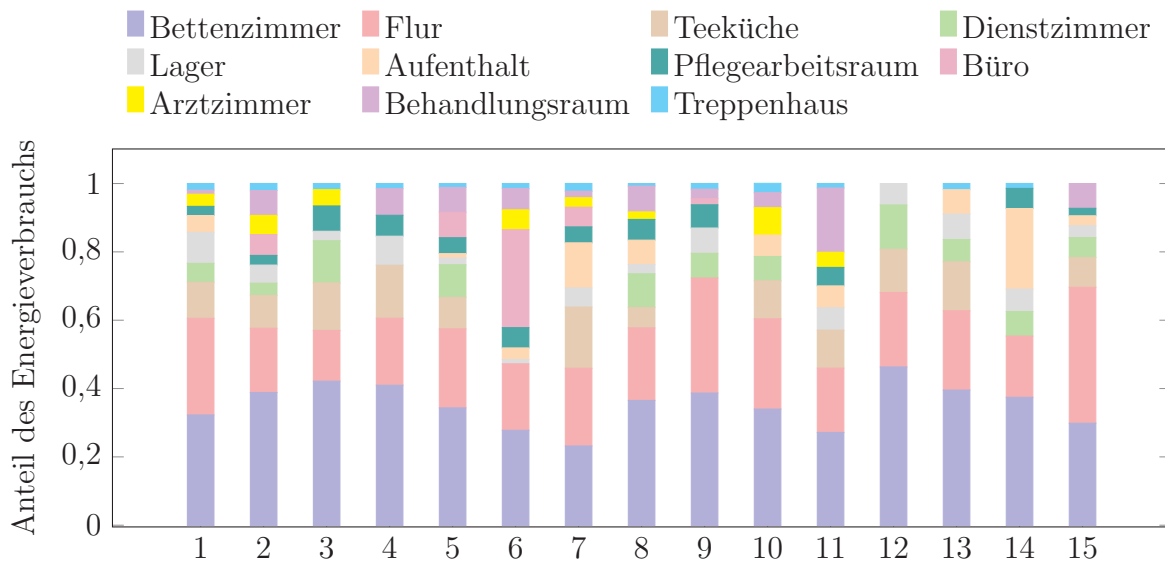


Abbildung 8.1: Anteile der verschiedenen Raumtypen am Gesamtverbrauch der jeweiligen Station

Die Bettenzimmer, die mit durchschnittlich 45 % der Fläche der Pflegestationen den größten Flächenanteil ausmachen, tragen am stärksten zum Energieverbrauch der einzelnen Stationen bei. Der Anteil am Energieverbrauch liegt zwischen 23 und 46 %. Gefolgt sind diese von den Fluren, die zu 15 bis 38 % am Energieverbrauch beteiligt sind. Die übrigen Raumtypen haben variierende Anteile am Energieverbrauch der Stationen, wobei

Teeküchen, Dienstzimmer und Behandlungsräume die relevantesten der übrigen Räume sind.

Auf Basis der Analyse der Zusammensetzung der Lasten können Einsparpotenziale identifiziert werden. Dazu werden zwei verschiedene Arten der Einsparpotenziale unterschieden: zum einen kann die Leistung der Beleuchtung und der Geräte reduziert werden. Bei der Beleuchtung kann dies über die Verwendung von effizienteren Lampen oder durch die Verringerung der Beleuchtungsstärke erzielt werden. Bei den Geräten können energieeffizientere Geräte eingesetzt werden. Zum anderen können die Nutzer zu energiesparenderem Verhalten motiviert und somit die Zeit, in der die Geräte und die Beleuchtung eingeschaltet sind, obwohl diese nicht genutzt werden, bzw. obwohl ausreichend Tageslicht zur Verfügung steht, reduziert wird. Auch eine Automatisierung der Beleuchtungssteuerung über Anwesenheits- und Helligkeitssensoren und das automatische Abschalten der Geräte bei Nichtnutzung führt zu demselben Effekt. Da 63 % der Energie auf den Pflegestationen für die Beleuchtung benötigt wird, haben Einsparungen in diesem Bereich einen hohen Effekt.

Einsparungen durch Leistungsreduktion

Beleuchtung Die installierte Beleuchtungsleistung liegt, abgesehen von Bettzimmern und Fluren, zwischen 10 und 15 W/m² (siehe Tabelle 5.7). Hier besteht ein Potenzial zur Verringerung dieser Leistung. Laut US National Renewable Energy Laboratory soll in Nichtwohngebäuden eine mittlere installierte Beleuchtungsleistung von 8,1 W/m² angestrebt werden, wobei für Büroräume 8,6 W/m² und für Flure 5,4 W/m² empfohlen werden (NREL, 2011). Dementsprechend wurde für die Strategie der Leistungsreduktion die installierte Beleuchtungsleistung in Fluren auf 6 W/m² und in den übrigen Räumen auf 9 W/m² gesetzt. Dies entspricht einer durchschnittlichen Reduktion von 30 % der Leistung.

Geräte Für die Geräte wird ein Einsparpotenzial vor allem bei den Fernsehern gesehen, die zurzeit einen ungewöhnlich hohen Energieverbrauch während des Standbybetriebes aufweisen. Statt der bisherigen Standbyleistung von 17 W und der Betriebsleistung von 50 W werden Fernseher mit einer Standbyleistung von 1 W und einer Betriebsleistung von 40 W angenommen. Weiterhin wird der Verbrauch der Kühlschränke auf eine mittlere Leistung von 20 W statt bisher 30 W reduziert.

Einsparungen durch Abschalten bei Nichtnutzung

Beleuchtung Die Ergebnisse der Erhebung der Beleuchtungsnutzung zeigten, dass in vielen Raumtypen die Beleuchtung tagsüber ausgeschaltet bleibt (vgl. Tabelle 5.8). Lediglich in Fluren, Treppenhäusern, Dienstzimmern, Lager- und Aufenthaltsräumen ist während des Tages zu mehr als 50 % der Zeit die volle Beleuchtung eingeschaltet. Da Flure zumeist innenliegend sind, ist hier ein Ausschalten der Beleuchtung in der Regel nicht möglich. Eine Reduktion wird vor allem für Dienstzimmer, Lagerräume, Arztzimmer und Teeküchen als möglich erachtet, wenn hier die Beleuchtung bei Verlassen des Raumes oder einem ausreichenden Tageslichtangebot ausgeschaltet würde. In diesen Räumen wird eine Reduktion des Anteils der während des Tages eingeschalteten Beleuchtung um jeweils 10

Prozentpunkte angenommen.

Geräte Insgesamt wird ein Viertel des gesamten Energieverbrauchs der Geräte auf den Pflegestationen verursacht, während die Geräte nicht in Nutzung sind. Eine vollständige Reduktion dieses Verbrauches ist aus organisatorischen Gründen nicht immer möglich, beispielsweise wenn Geräte lange Startzeiten aufweisen. Eine moderate Einsparung wird dennoch für möglich gehalten, indem einerseits das Personal geschult und andererseits die Energiemanagementprogramme der Geräte entsprechend eingestellt werden.

Ein Einsparpotenzial wird beispielsweise für die Fernseher in den Bettzimmern gesehen. So sind bisher auch Fernseher in leer stehenden Bettzimmern im Standby-Betrieb. Insgesamt wurden an 30 % der vermessenen Tage die Fernseher nicht genutzt. Hier wird angenommen, dass ein vollständiges Ausschalten der Fernseher an der Hälfte dieser Tage möglich ist. Auch bei den Computern in den verschiedenen Raumtypen wird durch Aktivierung des Energiesparmodus eine Reduktion um 40 bis 50 % der eingeschalteten Computer während der Nachtstunden angenommen. Einen hohen Standbyverbrauch weisen vor allem die Ultraschallgeräte auf. Hierbei wird eine mögliche Reduktion der nachts eingeschalteten Geräte von 60 % auf 40 % angenommen.

Ergebnisse

In Tabelle 8.3 sind die Ergebnisse des Einflusses auf die Energiemenge für die Beleuchtung, für die Gerätenutzung und den gesamten Energiebedarf aufgeführt. Die Einsparpotenziale der Maßnahmen durch Nutzerverhaltensänderungen sind sowohl im Bereich der Beleuchtung als auch der Geräte gering und liegen insgesamt bei 3%. Der große Vorteil dieser Maßnahmen liegt jedoch darin, dass diese ohne zusätzliche Kosten durchgeführt werden können. Es wurde in diesem Fall lediglich eine moderate Änderung des Nutzerverhaltens angenommen, deren Umsetzung realistisch erscheint. Potenziale zu einer noch darüber hinausgehenden Einsparung sind vorhanden. Die Motivation der Nutzer über einen langen Zeitraum hinweg ist jedoch häufig eine schwierige Aufgabe.

Tabelle 8.3: Einsparpotenziale durch die untersuchten Strategien

Strategie	Einsparpotenzial Beleuchtung in %	Einsparpotenzial Geräte in %	Einsparpotenzial Gesamt in %
Abschalten bei Nichtnutzung	2,9	3,8	3,2
Leistungsreduktion	24,9	26,0	25,7
Abschalten+Leistungsreduktion	25,5	27,7	26,9

Für die Leistungsreduktion zeigt sich eine deutlich höhere Einsparung. Sowohl für die Geräte als auch für die Beleuchtung kann hiermit eine Reduktion des Energiebedarfes um ein Viertel erreicht werden. Ein Austausch der installierten Beleuchtung ist eine Maßnahme, die in vielen Fällen wirtschaftlich sinnvoll ist und somit häufig durchgeführt wird (vgl. Abschnitt 2.3.4). Ein Austausch der Vielzahl der vorhandenen Geräte ist hingegen in der Regel nicht rentabel. Die Ergebnisse zeigen jedoch, wie wichtig es ist, bereits im Einkauf

darauf zu achten, dass energiesparende Geräte angeschafft werden.

In der Kombination der beiden Strategien ist die Einsparung geringer als die der Summe der beiden Einzelmaßnahmen. Dies liegt daran, dass der Effekt der Einsparung durch das Nutzerverhalten reduziert wird, wenn die Geräte weniger Energieverbrauch aufweisen.

Der Standbyverbrauch beträgt in den Pflegestationen dieses Krankenhauses etwa ein Viertel des gesamten Verbrauches. In anderen Stationen kann der Standbyverbrauch weitaus höher sein. Jensen und Petersen (2011) ermittelten einen Anteil des Standbyverbrauchs am Gesamtverbrauch von 70 bis 90 % bei medizinischen Geräten. Hierbei ist demnach das Einsparpotenzial durch eine Änderung des Nutzerverhaltens oder der Verwendung von Geräten mit geringerem Verbrauch während ungenutzter Zeiten höher.

In dieser Analyse wurden lediglich die Raumprofile verändert, um die beiden Strategien zu untersuchen. Eine Reduktion der elektrischen Lasten führt jedoch auch zu einer Beeinflussung der thermischen Energie, indem der Kühlbedarf verringert und der Heizwärmebedarf erhöht wird. Dieser Einfluss muss simulativ untersucht werden.

8.2.2 Simulation von Einsparmaßnahmen

Im Folgenden werden anhand von zwei beispielhaften, kalibrierten Modellen zweier Gebäude des Krankenhauses Einsparmaßnahmen untersucht, indem Sollwerte für die Temperaturen der Belüftung bestimmt werden. Für das Wahlleistungsgebäude wird der beste Wert für die Zulufttemperatur identifiziert, indem die Energieeinsparung im Vergleich zum Ist-Zustand für verschiedene Temperaturwerte bestimmt wird. Der Untersuchungs- und Behandlungstrakt 3 wird über mehrere raumlufttechnische Anlagen versorgt und die Sollwerte der Temperaturen beeinflussen sich gegenseitig. Hier werden die Betriebsparameter, die zu einem reduzierten Energieverbrauch des Gebäudes führen, daher aus einer Vielzahl von Simulationsrechnungen identifiziert.

Zulufttemperatur des Wahlleistungsgebäudes

Im folgenden Abschnitt wird der Wert der Zulufttemperatur des Wahlleistungsgebäudes bestimmt, der zu einem effizienten Betrieb führt. Da die Wahl dieser Temperatur sowohl den Wärme-, als auch den Kältebedarf beeinflusst und gegenläufige Einflüsse auf die Energieformen hat, ist die Wahl der Temperatur nicht trivial. Zudem können zu unterschiedlichen Jahreszeiten andere Temperaturen zu einem geringen Energieverbrauch führen. Zurzeit ist eine Zulufttemperatur von 15,3 °C gewählt.

Um die Zulufttemperatur zu identifizieren, die zum geringsten Energieverbrauch führt, werden Simulationen bei verschiedenen Werten der Zulufttemperatur durchgeführt und der Wärme- und Kältebedarf für verschiedene Jahreszeiten ausgewertet. Die Simulationen wurden jeweils für einen Zeitraum von 30 Tagen durchgeführt.

Abbildung 8.2 stellt die Ergebnisse dieser Simulationen dar, indem für jede Temperatur die Einsparung bzw. der Mehrverbrauch im Vergleich zum Ist-Zustand aufgetragen ist. Die Wärmeenergie enthält sowohl den Wärmebedarf der raumlufttechnischen Anlage als auch den Wärmebedarf der statischen Heizung, die Kälteenergie sowohl den Kältebedarf

der raumlufthechnischen Anlage als auch der Kühldecken. Der größte Einspareffekt zeigt sich im Sommer. Im Winter und in der Übergangszeit kann bei ungünstiger Wahl der Zulufttemperatur ein deutlicher Mehrverbrauch eintreten.

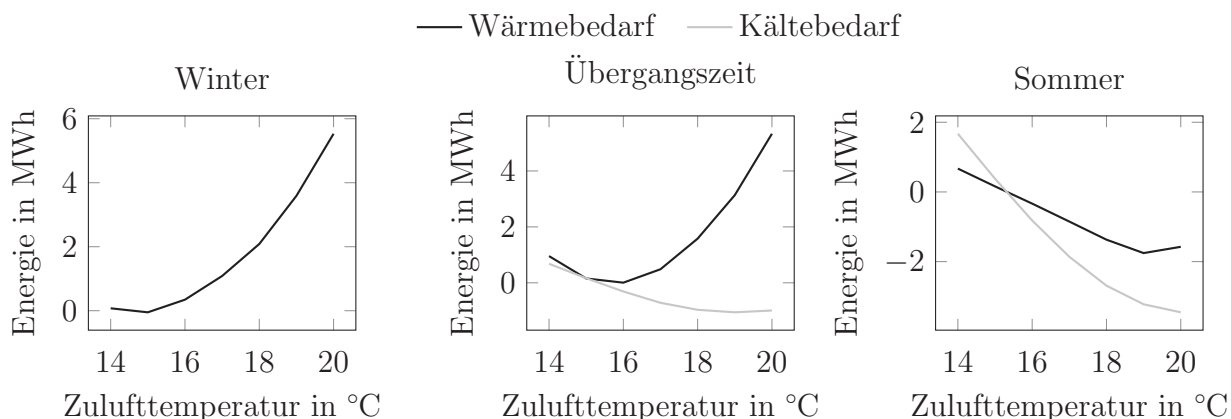


Abbildung 8.2: Minimale und maximale Differenzen des monatlichen Wärme- und Kältebedarfes zum Ist-Zustand durch Änderung der Zulufttemperatur

Die gewählte Zulufttemperatur von $15,3^{\circ}\text{C}$ ist im Winter bereits optimal. Sowohl durch eine Erhöhung als auch eine Absenkung der Zulufttemperatur würde der Wärmebedarf steigen. Zwar führt die Erhöhung der Zulufttemperatur zu einem verminderten Wärmebedarf der statischen Heizung, dieser wird jedoch durch den erhöhten Wärmebedarf der raumlufthechnischen Anlage mehr als kompensiert. Bei einer Absenkung der Zulufttemperatur tritt der umgekehrte Fall auf.

In der Übergangszeit führt die Erhöhung der Zulufttemperatur zu einem verminderten Kältebedarf. Für den Wärmebedarf tritt ein Minimum bei 16°C auf. Es wird vorgeschlagen, eine Temperatur von $17,5^{\circ}\text{C}$ zu wählen, da hierbei eine Einsparung an Kälteenergie von $0,8\text{MWh}$ auftritt und nur ein geringer Mehrverbrauch an Wärmeenergie. Bei einer weiteren Erhöhung der Zulufttemperatur würde zwar mehr Kälteenergie eingespart, jedoch mehr Wärme verbraucht werden. Letztendlich müsste jedoch eine wirtschaftliche Betrachtung zeigen, ob eine erhöhte Einsparung an Wärmeenergie oder eine verstärkte Einsparung an Kälteenergie, auch wenn dies zu einem Mehrverbrauch an Wärmeenergie führt, die wirtschaftlichere Entscheidung ist.

In der Kühlperiode zeigt der Wärmebedarf ein Minimum bei einer Zulufttemperatur von 19°C . Der Kältebedarf wird umso geringer, je höher die Zulufttemperatur gewählt wird. Für weitere Simulationen wird daher eine Zulufttemperatur von $19,5^{\circ}\text{C}$ gewählt, was zu einer Einsparung an Kälteenergie von $3,3\text{MWh}$ und einer Einsparung an Wärmeenergie von $1,7\text{MWh}$ führt.

Erfolgt der Wechsel der Solltemperaturen jeweils zum April, Juni, September und November, so ergibt sich für den Ganzjahresverbrauch eine Einsparung an Wärme von $3,4\text{MWh}$ (6%) und eine Einsparung an Kälteenergie von $15,6\text{MWh}$ (16%).

Untersuchungs- und Behandlungstrakt 3

Das zweite Gebäude, für das Einsparmaßnahmen untersucht wurden, ist das Gebäude Untersuchungs- und Behandlungstrakt 3 (UB3). Dieses Gebäude wird von mehreren raumlufttechnischen Anlagen versorgt (siehe Kapitel 3.2.2). Die Anlagen sind abluftgeregelt. Da sich die unterschiedlichen Sollwerte der Temperaturen gegenseitig beeinflussen, ist die Wahl der Temperatur über intuitives Ermessen schwer zu bestimmen. Für dieses Gebäude werden daher durch eine Vielzahl an Variantenrechnungen Wertebereiche für die Betriebsparameter festgelegt.

Die Betriebsparameter, die im Folgenden betrachtet werden, sind die Zulufttemperatur der zentralen Anlage $T_{Zu,Z}$, die Ablufttemperatur der Radiologie $T_{Ab,Rad}$ und die Ablufttemperatur der innenliegenden Räume $T_{Ab,IR}$. Diese Parameter wurden ausgewählt, da sie einen relevanten Einfluss auf den Energiebedarf aufweisen und zudem im Betrieb häufig angepasst werden. Somit ist es wichtig, dass für diese Parameter Werte gewählt werden, die zu einem effizienten Betrieb führen.

Über die Gebäudeleittechnik konnte ermittelt werden, dass für die Zulufttemperatur im Laufe der Zeit Werte zwischen 15 und 18 °C eingestellt wurden. Für die Ablufttemperatur der innenliegenden Räume wurden Werte zwischen 22,8 und 23,7 °C und für die Ablufttemperatur der Radiologie zwischen 21,9 und 23,5 °C gewählt. Für die übrigen Parameter wurde das Spektrum der Werte, die in der letzten Iteration der Kalibrierung festgelegt wurden, gewählt. So werden die Werte der ausgewählten Betriebsparameter vor dem Hintergrund der Unsicherheit der übrigen Parameter bewertet und diese Unsicherheit mit einbezogen. Mit diesen Verteilungen der Eingangsparameter wurden ein Satz von 100 Eingangsparameterkombinationen über die Latin Hypercube Methode bestimmt und 100 Simulationsrechnungen durchgeführt.

Es werden die Ergebnisgrößen Wärme- und Kältebedarf betrachtet. Die geringsten Energiebedarfe werden als beste Ergebnisse gewertet, die größten als schlechteste Ergebnisse. Nun soll bestimmt werden, welche Werte der drei ausgewählten Betriebsparameter zu den jeweils zehn besten und zehn schlechtesten Ergebnissen führen. Dies ist in Abbildung 8.3 grafisch in Form von Histogrammen dargestellt. Es sind sowohl die besten und schlechtesten Ergebnisse für die Wärmeenergie als auch die Kälteenergie dargestellt.

Sowohl für die Wärme- als auch die Kälteenergie zeigen sich dieselben Tendenzen: Energetisch vorteilhaft ist eine höhere Zulufttemperatur der zentralen Anlage und eine geringere Ablufttemperatur der Radiologie und der innenliegenden Räume.

8.2.3 Fazit

Mit Hilfe des kalibrierten Modells können verschiedene gebäudespezifische Auswertungen vorgenommen werden. So können beispielsweise Kenntnisse über die Energiebilanz des Krankenhauses gewonnen und Einsparmaßnahmen berechnet werden. Dies wurde in diesem Kapitel anhand jeweils eines Beispiels gezeigt. Über das Modell konnten Erkenntnisse über die Zusammensetzung der Energieverbräuche des Krankenhauses gewonnen und daraus Einsparpotenziale abgeleitet werden. Weiterhin wurden Sollwerte der Temperatu-

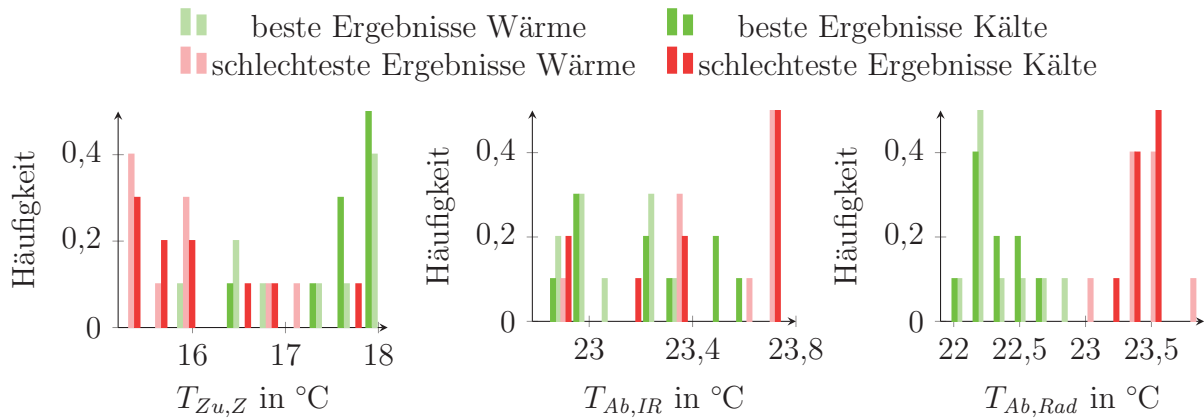


Abbildung 8.3: Werte für die Betriebsparameter der besten und schlechtesten zehn Parameter

ren der raumlufttechnischen Anlagen identifiziert, die im Vergleich zum Ist-Zustand der Betriebsführung zu einer Einsparung führen. Da die Wahl der Temperatur einen gegenläufigen Einfluss auf den Wärme- und Kältebedarf hat, ist die Wahl der Temperatur über eine Handrechnung schwer möglich.

Im Gebäude UB3, in dem mehrere hintereinandergeschaltete Anlagen das Gebäude versorgen und die Sollwerte der Temperaturen sich gegenseitig beeinflussen, ist es zudem sinnvoll, ähnlich wie in der Kalibrierung, eine Vielzahl von Variantenrechnungen durchzuführen und aus den Ergebnissen die besten Temperaturwerte abzuleiten. Auf diese Weise kann auch die Unsicherheit der übrigen Eingangsdaten mit in das Ergebnis einbezogen werden. Indem ein breiterer Wertebereich der Eingangsparameter gemäß ihrer Unsicherheit simuliert und die Einsparung für jede Variante der Eingangsparameter bestimmt wurde, kann die Robustheit der Einsparung unter der Randbedingung der Unsicherheit bestimmt werden.

Somit konnte beispielhaft gezeigt werden, welche Auswertungen mit Hilfe eines kalibrierten Modells möglich sind.

Kapitel 9

Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Kapitel werden die durchgeführten Arbeiten und Ergebnisse übersichtlich zusammengefasst und Forschungsfragen für weiterführende Arbeiten abgeleitet.

9.1 Zusammenfassung

Das Ziel der Arbeit war es, zu untersuchen, ob bisherige Methoden und vorhandene Daten zur Gebäudesimulation auf die Simulation von Krankenhäusern anwendbar sind und offene Forschungslücken zu identifizieren und zu schließen. Dazu wurden die einzelnen Arbeitsschritte einer Gebäudesimulation betrachtet, anhand einer Fallstudie die Besonderheiten der Simulation eines Krankenhauses untersucht und Vorgehensweisen abgeleitet.

Hintergrund Krankenhäuser haben einen hohen Energiebedarf und häufig ein hohes Energieeinsparpotential. Viele Veränderungen führen zu einem ständigen Umbaubebedarf, an die die Energieversorgung nicht immer angepasst wird. Die schwierige finanzielle Lage vieler Häuser führt zudem dazu, dass notwendige Investitionen in der Energieversorgung nicht durchgeführt werden. Weiterhin ist in Krankenhäusern häufig wenig Wissen über die Zusammensetzung der Energieverbräuche vorhanden, sodass Einsparpotentiale unter Umständen nicht genutzt werden können. Wissenschaftliche Untersuchungen von Krankenhäusern wurden bisher kaum durchgeführt.

Eine Möglichkeit, Kenntnisse über die Energieströme eines Gebäudes zu erlangen und Einsparmaßnahmen zu untersuchen, ist die Durchführung einer energetischen Gebäudesimulation. Da die Gebäudesimulation immer eine Vereinfachung der Realität darstellt, kann es zu Abweichungen zum realen Gebäude kommen. Dies ist insbesondere durch die Eingangsdaten gegeben. Oftmals können diese nicht genau erhoben werden. Durch die hohe Anzahl der nötigen Daten ist eine erhöhte Fehleranfälligkeit gegeben. Somit ist eine Kalibrierung des Modells mit Messdaten unabdingbar. Dabei muss beachtet werden, dass die Messdaten alle Fehler des Betriebs (beispielsweise ungünstig gewählte Betriebsparameter) und das nicht vorhersehbare Nutzerverhalten enthalten.

Gebäudesimulationen sind ein breites Forschungsthema, zu dem eine große Zahl an Studien durchgeführt wurde. Die Mehrheit dieser Studien konzentriert sich jedoch auf Bürogebäude. Zu Krankenhäusern gibt es nur wenige simulative Untersuchungen und diese betrachten in der Regel Teilaspekte, wie die Simulation einzelner Bereiche oder die Beantwortung sehr spezifischer Fragestellungen. Die vorliegende Arbeit soll diese Forschungs-

lücke schließen und die Grundlagen für die Simulation von Krankenhäusern erarbeiten und anhand einer Fallstudie untersuchen. Im Folgenden werden die durchgeführten Arbeiten und gewonnenen Erkenntnisse für die einzelnen Schritte der Simulation aufgeführt.

Zonierung Aus der Literatur zum Thema Zonierung von Gebäudemodellen lassen sich unterschiedliche und zum Teil widersprüchliche Angaben zum erforderlichen Detaillierungsgrad der Zonierung ableiten. In der vorliegenden Arbeit wurden daher der Heiz- und Kühlenergiebedarf für einzelne Bereiche des Krankenhauses in verschiedenen Zonierungsvarianten simuliert, um eine optimale Zonierungsstrategie für die unterschiedlichen Bereiche des Krankenhauses zu bestimmen. Aus den Simulationsrechnungen lässt sich schlussfolgern, dass der Heizwärmebedarf bei der Zusammenfassung von Flächen im Regelfall sinkt. Es treten jedoch unterschiedliche Effekte auf, die sich teilweise gegenseitig aufheben, sodass die Auswirkung der Zusammenfassung von Flächen somit von der Konfiguration der Räume abhängt. Grundsätzlich führt ein höherer Heizwärmebedarf des Gebäudes zu einem geringeren Fehler bei der Zonierung. Weiterhin gilt, dass bei einer gleichförmigen Verteilung der inneren Lasten auf die Zonen der Unterschied im Energiebedarf für die einzelnen Zonierungsvarianten geringer ist.

Aus den Ergebnissen kann abgeleitet werden, dass für die meisten Gebäudeteile, in denen die Wärmeverluste über die Außenwände die Wärmebilanz des Gebäudes dominieren, eine Zonierung nach der Himmelsrichtung der Flächen ausreicht. In Bereichen mit geringen thermischen Lasten und in Bereichen mit einer mechanischen Belüftung und Abluftregelung ist eine höhere Detaillierung der Zonierung ratsam. Durch die geringen Wärmeverluste machen sich in diesen Bereichen die Unterschiede zwischen inneren Lasten stärker bemerkbar. Daher sollten Zonen, die sich stark über innere und solare Lasten aufheizen, nicht mit Zonen zusammengefasst werden, bei denen dies nicht der Fall ist.

Eingangsdaten Die Verwendung von Eingangsdaten, die die Realität möglichst genau wiedergeben, ist Voraussetzung für die Verlässlichkeit der Simulationsergebnisse. Da nutzungsabhängige Daten schwer zu bestimmen sind und nur wenige Vergleichsdaten für Krankenhäuser vorliegen, wurden Verbrauchsmessungen durchgeführt und ausgewertet. Die Flächen im Krankenhaus wurden einzelnen Raumtypen zugeordnet. Auf dieser Grundlage konnten Profile für die Beleuchtung für die jeweiligen Raumtypen erstellt werden. Weiterhin wurden für die einzelnen Raumtypen Geräteausstattungen erfasst und verschiedene Geräte vermessen. Aus den Messungen wurden Nutzungsprofile der Geräte abgeleitet. Über die Normierung der Profile mit Hilfe der installierten Leistung der Beleuchtung bzw. der Standby- und Betriebsleistung der Geräte sind eine Skalierung der Profile und damit eine Übertragbarkeit auf andere Krankenhäuser möglich.

Durch einen Vergleich der Messung der elektrischen Leistung einer gesamten Station mit dem über die aggregierten Raumprofile generierten Lastprofil derselben Station konnte gezeigt werden, dass der Fehler des verwendeten Verfahrens bei -5 bis -6% liegt. Tendenziell tritt also eine leichte Unterschätzung des Stromverbrauches mit der verwendeten Methode auf. Weiterhin wurde das Lüftungsverhalten der Nutzer untersucht, um außen-temperaturabhängige Lüftungsprofile erstellen zu können.

Sensitivität und Unsicherheit der Eingangsdaten Im Rahmen der Sensitivitätsanalyse wurde untersucht, welche Parameter einen hohen Einfluss auf das Simulationsergebnis haben, um bei der Datenerhebung einen besonderen Fokus auf diese Parameter legen zu können. Dazu wurden zunächst die Ergebnisse verschiedener Sensitivitätsanalysen in der Literatur zusammengestellt und anschließend eigene Untersuchungen für verschiedene Bereiche des Krankenhauses durchgeführt. Für die Sensitivitätsanalyse wurde das Screening-Verfahren nach Morris gewählt, bei dem in jedem Durchlauf ein anderer Eingangsparameter des Modells um einen festgesetzten Wert verändert wird. Dieses stellt einen geeigneten Kompromiss zwischen Aufwand und Genauigkeit dar. Das Ergebnis ist eine Rangfolge der Eingangsparameter nach ihrer Wichtigkeit.

Die Ergebnisse zeigen sich konsistent mit den Ergebnissen aus der Literatur: einen hohen Einfluss auf das Ergebnis haben vor allem Sollwerte der Raumtemperaturen, Infiltration, innere Lasten, U-Werte von Fenstern und Außenwänden sowie Fensterflächen. Abweichend zur Literatur sind zudem in mechanisch belüfteten Bereichen Luftmengen und Zulufttemperatur wichtige Parameter. Somit sollten die Eingangswerte in die Simulation für diese Parameter mit großer Genauigkeit bestimmt werden. Diese Parameter sind zudem diejenigen, die verändert werden sollten, um den Energieverbrauch des Gebäudes zu senken.

Da das Screening keine Angabe zur Höhe der Ergebnis-Unsicherheit erlaubt, wurde dieses um eine Unsicherheitsanalyse ergänzt. 300 Simulationsrechnungen erwiesen sich als ausreichend, um die Unsicherheit der Ergebnisse einzuschätzen. Die Standardabweichung der Gesamtenergie bewegt sich mit der gewählten Unsicherheit der jeweiligen Parameter im Rahmen von 10 bis 15 %, kann für einzelne Energieformen, beispielsweise die Wärmeenergie der raumlufttechnischen Anlage, jedoch bis zu 100 % des Mittelwertes betragen. Dies zeigt, dass es wichtig ist, die Unsicherheit der einflussreichsten Parameter durch weitere Datenrecherche zu senken, um die Unsicherheit der Ergebnisse zu reduzieren.

Kalibrierung Die Kalibrierung wurde anhand des Beispiels des Wahlleistungsgebäudes vorgestellt. Als Vergleichsdaten dienen Kurzzeitmessungen der thermischen Energiebedarfe in der Heiz- und Kühlperiode. Es wurde zunächst ein initiales Modell erstellt, in das alle vorhandenen Informationen über die Gebäudedaten eingehen. Zudem wurden die gemessenen und simulierten Lastverläufe verglichen. Es zeigte sich, dass bei vielen der Eingangsdaten eine Restunsicherheit verbleibt und somit die Ergebnisse der initialen Simulationen zu hohe Abweichungen zu den Messwerten im Vergleich zu den Grenzwerten nach ASHRAE aufwiesen.

Um die Kombination der Eingangsdaten zu identifizieren, die eine gute Übereinstimmung mit den Messwerten hervorruft, wurden den Eingangswerten Wahrscheinlichkeitsverteilungen zugeordnet und eine Monte-Carlo-Simulation durchgeführt. Durch die zuvor durchgeführte Sensitivitätsanalyse konnte die Anzahl der zu variierenden Parameter auf die Parameter mit hohem Einfluss auf die Ergebnisse beschränkt werden. Nach der ersten Durchführung ließen sich bereits Eingangsparameterkombinationen finden, die zu guten Übereinstimmungen mit den Messwerten führten. Um die Ergebnisse weiter zu verbessern, wurden die Verteilungen der Eingangswerte angepasst, sodass deren Werte denen der besten Ergebnisse entsprachen. Nach mehreren Iterationsschritten konnten für alle Simulationsergebnisse die Grenzwerte für die Übereinstimmung von Mess- und Simulati-

onswerten eingehalten werden.

Indem das Gebäudemodell mit Hilfe mehrerer gemessener Energiemengen (Wärme-/Kältebedarfe von Heizung, Kühldecken und RLT-Anlage) kalibriert wurde, konnte die Unterbestimmtheit der Problemstellung durch die Vielzahl der Parameter reduziert werden. Indem nicht nur nach der Gesamtenergiemenge des Gebäudes sondern nach höher aufgelösten Messwerten kalibriert wurde, wurde das Risiko vermindert, dass die Zusammensetzung der Energiemengen trotz guter Gesamtergebnisse der Kalibrierung fehlerhaft ist. Würde nur die Gesamtenergiemenge betrachtet, könnten sich Fehler in den einzelnen Energiemengen aufheben und so zu dem korrekten Wert, jedoch falschen Anteilen der verschiedenen Verbrauchsbereiche führen.

Auswertung der Simulationsergebnisse Die Simulationsergebnisse dienen zum einen dazu, ein besseres Verständnis der Zusammensetzung der Energiebilanz des Krankenhauses zu erlangen. Die Energiebilanz des Krankenhauses wurde aufgeschlüsselt und für die Pflegestationen im Krankenhaus im Detail untersucht. So konnten Einsparpotentiale ermittelt werden. Zum anderen können mit Hilfe des Modells Einsparmaßnahmen untersucht werden. Für das Wahlleistungsgebäude wurde die Wahl der Zulufttemperatur untersucht. Da die Zulufttemperatur einen gegenläufigen Einfluss auf den Wärme- und Kältebedarf hat, kann ohne die Simulation nur schwer der optimale Betriebspunkt ermittelt werden. Für den Untersuchungs- und Behandlungstrakt 3 wurden über eine Monte-Carlo-Simulation diejenigen Kombinationen der Betriebsparameter, die zu einem geringen Energieverbrauch führen, bestimmt. So konnte exemplarisch gezeigt werden, auf welche Weise das in den vorherigen Schritten erstellte Modell genutzt werden kann, um den Energiebedarf des Gebäudes zu verstehen und zu senken.

Fazit Mit Hilfe der in dieser Arbeit gewonnenen Erkenntnisse werden zukünftige simulative Untersuchungen von Krankenhäusern erleichtert, da weniger Vorarbeiten nötig sind, um die Simulation durchzuführen. Unter anderem wurden Vorgaben zur Methodik gemacht, die den Aufwand minimieren, ohne die Rechengenauigkeit einzuschränken. Zum einen wurde gezeigt, dass in vielen Gebäudeteilen eine weniger kleinteilige Zonierung ausreicht. Zum anderen wurden die relevanten Eingangsparameter für die verschiedenen Gebäudeteile bestimmt, sodass ein besonderer Fokus bei der Datengewinnung und -zusammenstellung auf die Bestimmung der relevanten Eingangsparameter gelegt werden kann, während die weniger wichtigen Parameter anhand von Standardwerten abgeschätzt werden können.

Zudem wurde eine Vielzahl von Eingangsdaten erhoben, für die bisher keine Daten vorliegen. Inwieweit diese auf andere Krankenhäuser übertragbar sind, muss in nachfolgenden Untersuchungen geklärt werden. Diese Daten können mindestens als Vergleichswerte genutzt werden, von denen bisher nur wenige zur Verfügung stehen.

Die Zusammensetzung der Energiebilanz des Krankenhauses wurde untersucht und zwei unterschiedliche Methoden zur Simulation von Energieeinsparmaßnahmen wurden beispielhaft vorgestellt. Somit konnte gezeigt werden, in welcher Form das erstellte Modell genutzt werden kann, um die Energiebilanz des Gebäudes zu verstehen und den Energieverbrauch zu senken.

9.2 Ausblick

Das Nutzerverhalten im Krankenhaus wurde über die Raumprofile für Geräte, Beleuchtung und Fensteröffnung modelliert. Die in die Bildung der Profile einfließenden Eingangsdaten waren jedoch auf eine geringe Gerätezahl, bzw. eine geringe Anzahl an Datenpunkten für die Fensteröffnung und den Beleuchtungszustand beschränkt. Hierbei könnte eine weitergehende Untersuchung mit der Berücksichtigung einer größeren Zahl von Datenpunkten eine höhere Sicherheit der Ergebnisse schaffen. Eine Erhebung der Daten in weiteren Krankenhäusern sollte durchgeführt werden, um die Übertragbarkeit der generierten Profile zu untersuchen.

Es zeigte sich, dass die Verbrauchsdaten von Geräten einen hohen Einfluss auf den Energieverbrauch des Krankenhauses haben und zwischen einzelnen Geräten hohe Unterschiede auftreten. Jedoch sind hierzu nur wenige Daten bekannt. Der Energieverbrauch, speziell von medizinischen Geräten, ist oftmals nur schwer zu ermitteln und kein wichtiges Anschaffungskriterium. Somit sind weitergehende Untersuchungen zum Energieverbrauch medizinischer Geräte nötig. Zudem sollte eine Datenbank mit Vergleichsdaten der Energieverbräuche von einzelnen Geräten und Stationen aus verschiedenen Krankenhäusern erstellt werden, die bisherige Daten zusammenfasst. Weitere Untersuchungen zu noch fehlenden Daten sollten durchgeführt werden. Diese Daten können anschließend für Benchmarks verwendet werden. Da es nur wenige Daten für den elektrischen Verbrauch medizinischer Geräte gibt, können diese Daten weiterhin dazu verwendet werden, effiziente Geräte zu identifizieren und mögliche Zielwerte festzulegen.

Die Simulation der Einsparmaßnahmen sollte um eine wirtschaftliche Betrachtung ergänzt werden, da die Wirtschaftlichkeit das hauptsächliche Entscheidungskriterium für eine Maßnahme darstellt.

Indem die Zusammensetzung der Energiebilanz mit Hilfe der Simulation einschätzbar ist und ein Werkzeug zur Berechnung dieser Energiebilanz vorliegt, kann dieses genutzt werden, um Flexibilisierungsoptionen der elektrischen und thermischen Energieverbraucher und -erzeuger zu untersuchen. Dies wird in einem zukünftigen Energiesystem mit einem zunehmenden Anteil der fluktuierenden erneuerbaren Erzeugung zunehmend wichtig werden, um Verbraucher vor allem in Zeiten des Stromüberangebotes einzusetzen und die Stromerzeugung auf Zeiträume eines Unterangebotes zu verschieben. Dies wird bereits für die technischen Anlagen in Wohngebieten untersucht, wobei hier eine große Zahl kleinerer Anlagen gemeinsam gesteuert werden muss, um einen Effekt zu erzielen. Das gleiche Ergebnis kann auch mit Krankenhäusern erreicht werden, die durch ihre Größe und die Vielzahl der unterschiedlichen Verbraucher und Versorger besonders geeignet sind, in einem zukünftigen Energiesystem einen Beitrag zum Ausgleich zwischen Stark- und Schwachlastzeiten zu leisten.

Literaturverzeichnis

- [Ackermann 2012] ACKERMANN, Martina: Feierliche Einsegnung und Tag der offenen Tür in der Wäscherei des Bräuderkrankenhauses. In: *BKT Hörrohr* 39 (2012), Nr. 4 (Zitiert auf Seite 8.)
- [Adamu et al. 2012] ADAMU, Z.A. ; PRICE, A.D.F. ; COOK, M.J.: Performance evaluation of natural ventilation strategies for hospital wards – A case study of Great Ormond Street Hospital. In: *Building and Environment* 56 (2012), S. 211–222 (Zitiert auf Seite 17.)
- [Ages 2001] AGES GMBH: *Verbrauchskennwerte 1999: Energie- und Wasserverbrauchskennwerte von Gebäuden in der Bundesrepublik Deutschland*. 2001 (Zitiert auf Seite 9.)
- [Ahmad und Culp 2006] AHMAD, Mushtaq ; CULP, Charles: Uncalibrated Building Energy Simulation Modeling Results. In: *HVAC&R Research* 12 (2006), Nr. 4, S. 1141–1155 (Zitiert auf den Seiten 14 und 100.)
- [Alzubaidi und Soori 2012] ALZUBAIDI, Safaa ; SOORI, Prashant K.: Energy Efficient Lighting System Design for Hospitals Diagnostic and Treatment Room: A Case Study. In: *Light and Visual Environment* 36 (2012), Nr. 1, S. 23–31 (Zitiert auf Seite 7.)
- [Arqum 2009] ARQUM: *Abschlussbericht zum durchgeführten Projekt "Energieeffizienz" für Krankenhäuser in Rheinland-Pfalz*. Arqum Gesellschaft für Arbeitssicherheits-, Qualitäts- und Umweltmanagement mBH. 2009 (Zitiert auf Seite 9.)
- [Ascione et al. 2013] ASCIONE, Fabrizio ; BIANCO, Nicola ; DE MASI, ROSA FRANCESCA ; VANOLI, Giuseppe P.: Rehabilitation of the building envelope of hospitals: Achievable energy savings and microclimatic control on varying the HVAC systems in Mediterranean climates. In: *Energy and Buildings* 60 (2013), S. 125–138 (Zitiert auf den Seiten 18 und 34.)
- [ASHRAE 1997] ASHRAE: *1997 ASHRAE handbook: Fundamentals*. I-P (inch-pound) ed. Atlanta, GA : ASHRAE, 1997. – ISBN 978-1883413446 (Zitiert auf Seite 206.)
- [ASHRAE 14-2002] ASHRAE Guideline 14-2002. *Measurement of Energy and Demand Savings*. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers ASHRAE. Atlanta, USA: 2002 (Zitiert auf den Seiten 102 und 111.)
- [Aspinall 2004] ASPINALL, Philip: Benchmarking and Best Practice: Energy Management for Healthcare in the UK. In: *Business Briefing: Hospital Engineering & Facilities Management*. 2004 (Zitiert auf Seite 7.)

- [Babu 2010] BABU, Suresh: *Energy Efficiency in Hospitals: A Case Study*. 2010. – Ottotraction (Zitiert auf Seite 7.)
- [Becker et al. 2003] BECKER, Jörg (Hrsg.) ; KUGELER, Martin (Hrsg.) ; ROSEMANN, Michael (Hrsg.): *Prozessmanagement. Ein Leitfadens zur prozessorientierten Organisationsgestaltung*. 4. Auflage. Berlin, Heidelberg : Springer, 2003. – ISBN 978-3-662-09534-8 (Zitiert auf Seite 82.)
- [Beier 2009] BEIER, Carsten: *Abschlussbericht: Analyse des Energieverbrauchs und exemplarische Best-practice-Lösungen für relevante Verbrauchssektoren in Krankenhäusern*. 2009. – Fraunhofer UMSICHT (Zitiert auf den Seiten 7, 10, 48, 49, und 196.)
- [Bertagnolio 2012] BERTAGNOLIO, Stéphane: *Evidence-based model calibration for efficient building energy services*, Universität Lüttich, Dissertation, 2012 (Zitiert auf den Seiten 79 und 85.)
- [Bertagnolio et al. 2010] BERTAGNOLIO, Stephane ; LEMORT, Vincent ; ANDRE, Philippe: *Simulation assisted audit & Evidence based calibration methodology: IEA-ECBCS Annex 53: Total Energy Use in Buildings - Analysis and evaluation methods*. 2010 (Zitiert auf Seite 14.)
- [Beuster und Herbig 2013] BEUSTER, Helmut ; HERBIG, Sebastian: Erzeugung und Qualitätssicherung medizinischer Druckluft im Krankenhaus. In: *Krankenhauspharmazie* 34 (2013), Nr. 10, S. 463–468. ISBN 0173-7597 (Zitiert auf Seite 8.)
- [Blum und Lehmann 2014] BLUM, Karl ; LEHMANN, Ekkehart: Trends in der Krankenhausküche. In: *das Krankenhaus* (2014), Nr. 4 (Zitiert auf Seite 8.)
- [Blum et al. 2014] BLUM, Karl ; LÖFFERT, Sabine ; OFFERMANS, Matthias ; STEFFEN, Petra: *Krankenhaus Barometer 2014*. 2014 (Zitiert auf den Seiten 6, 7, 8, 9, und 11.)
- [Borderstep 2009] BORDERSTEP INSTITUT FÜR INNOVATION UND NACHHALTIGKEIT GEMEINNÜTZIGE GMBH: *Energieeffiziente Rechenzentren. Best-Practice-Beispiele aus Europa, USA und Asien*. 2009 (Zitiert auf Seite 201.)
- [Borgeson und Brager 2008] BORGESON, Sam ; BRAGER, Gail: Occupant Control of Windows: Accounting for Human Behaviour in Building Simulation / Center for the Built Environment. 2008. – Forschungsbericht. CBE Internal Report (Zitiert auf den Seiten 52, 53, und 54.)
- [Börner-Kleindienst 2006] BÖRNER-KLEINDIENST, Michael: Vom Pavillon zu modularen Strukturen. In: *Zukunft Krankenhaus - Überleben durch Innovation*. Debatin, Jörg F. and Goyen, Mathias and Schmitz, Christoph, 2006 (Zitiert auf den Seiten 4 und 5.)
- [Bourgeois et al. 2006] BOURGEOIS, Denis ; REINHART, Christoph ; MACDONALD, Iain: Adding advanced behavioural models in whole building energy simulation: A study on the total energy impact of manual and automated lighting control. In: *Energy and Buildings* 38 (2006), Nr. 7, S. 814–823 (Zitiert auf Seite 54.)

- [Brohus et al. 2009] BROHUS, H. ; HEISELBERG, P. ; HESSEHOLT, A. ; RASMUSSEN, H.: Application of Partial Safety Factors in Building Energy Performance Assessment. In: INTERNATIONAL BUILDING PERFORMANCE SIMULATION ASSOCIATION (Hrsg.): *Proceedings of Building Simulation 2009*. Glasgow, 27.-30. Juli 2009 (Zitiert auf den Seiten 82 und 85.)
- [Bujak 2010] BUJAK, Janusz: Heat consumption for preparing domestic hot water in hospitals. In: *Energy and Buildings* 42 (2010), Nr. 7, S. 1047–1055 (Zitiert auf den Seiten 48 und 49.)
- [BUND] BUND BERLIN E.V.: *Energiesparendes Krankenhaus*. – URL www.energiesparendes-krankenhaus.de. – Zugriff am 12.11.2014 (Zitiert auf den Seiten 12 und 13.)
- [Buonomano et al. 2014] BUONOMANO, Annamaria ; CALISE, Francesco ; FERRUZZI, Gabriele ; PALOMBO, Adolfo: Dynamic energy performance analysis: Case study for energy efficiency retrofits of hospital buildings. In: *Energy* 78 (2014), S. 555–572 (Zitiert auf Seite 18.)
- [Burhenne et al. 2010a] BURHENNE, Sebastian ; ELCI, Mehmet ; JACOB, Dirk ; NEUMANN, Christian ; HERKEL, Sebastian: Sensitivity Analysis with Building Simulations to Support the Commissioning Process. In: *Proceedings of the Tenth International Conference for Enhanced Building Operations ICEBO*. Kuwait, 26.-28. Oktober 2010 (Zitiert auf den Seiten 34 und 116.)
- [Burhenne und Herkel 2012] BURHENNE, Sebastian ; HERKEL, Sebastian: Methodik zur Unsicherheitsbewertung und Sensitivitätsanalyse für thermische Gebäudesimulationen. In: *Tagungsband BauSIM 2012*. Berlin, 26.-28. September 2012, S. 439–444 (Zitiert auf den Seiten 80 und 116.)
- [Burhenne et al. 2010b] BURHENNE, Sebastian ; JACOB, Dirk ; HENZE, Gregor P.: Uncertainty Analysis in Building Simulation with Monte Carlo Techniques. In: *SimBuild 2010 - Fourth National Conference of IBPSA-USA*. New York, USA, 11.-13. August 2010 (Zitiert auf Seite 14.)
- [Burhenne et al. 2013] BURHENNE, Sebastian ; WYSTREIL, Dominik ; ELCI, Mehmet ; NARMSARA, Sattaya ; HERKEL, Sebastian: Building Performance Simulation Using Modelica: Analysis of the current state and application areas. In: *Proceedings of BS2013*. Chambery, Frankreich, 25.-28. August 2013, S. 3259–3266 (Zitiert auf Seite 21.)
- [Campolongo et al. 2007] CAMPOLONGO, Francesca ; CARIBONI, Jessica ; SALTELLI, Andrea: An effective screening design for sensitivity analysis of large models. In: *Environmental Modelling & Software* 22 (2007), Nr. 10, S. 1509–1518 (Zitiert auf den Seiten 78 und 79.)
- [Capozzoli et al. 2009] CAPOZZOLI, Alfonso ; MECHRI, Houcem E. ; CORRADO, Vincenzo: Impacts of architectural design choices on building energy performance. Applications of uncertainty and sensitivity techniques. In: *Proceedings of Building Simulation 2009*. Glasgow, 27.-30. Juli 2009 (Zitiert auf den Seiten 82 und 85.)

- [CBC 2011] COMMERCIAL BUILDING CONSORTIUM CBC: *Next Generation Technologies: Barriers & Industry Recommendations for Commercial Buildings: Final Report*. 2011 (Zitiert auf Seite 15.)
- [CEUS 2006] ITRON, INC.: *California Commercial End-Use Survey CEUS*. 2006. – CEC-400-2006-005 (Zitiert auf Seite 7.)
- [Chantrasrisalai und Fisher 2007] CHANTRASRISALAI, Chanvit ; FISHER, Daniel: Lighting Heat Gain Parameters: Experimental Method (RP-1282). In: *HVAC&R Res.* 13 (2007), Nr. 2, S. 283–303 (Zitiert auf Seite 206.)
- [Chidiac et al. 2011] CHIDIAC, S.E. ; CATANIA, E.J.C. ; MOROFSKY, E. ; FOO, S.: Effectiveness of single and multiple energy retrofit measures on the energy consumption of office buildings. In: *Energy* 36 (2011), Nr. 8, S. 5037–5052 (Zitiert auf Seite 115.)
- [Christiansen et al. 2015] CHRISTIANSEN, Nils ; KALTSCHMITT, Martin ; DZUKOWSKI, Frank ; ISENSEE, Friedrich: Electricity consumption of medical plug loads in hospital laboratories: Identification, evaluation, prediction and verification. In: *Energy and Buildings* 107 (2015), S. 392–406 (Zitiert auf den Seiten 50 und 51.)
- [Clarke 2001] CLARKE, Joseph: *Energy Simulation in Building Design* -. 2. Auflage. New York : Routledge, 2001. – ISBN 978-0-750-65082-3 (Zitiert auf Seite 204.)
- [Clevenger und Haymaker 2006] CLEVINGER, Caroline M. ; HAYMAKER, John: The impact of the building occupant on energy modeling simulations. In: *Joint International Conference on Computing and Decision Making in Civil and Building Engineering*, 14.-16. Juni 2006, S. 3637–3646 (Zitiert auf den Seiten 52 und 85.)
- [Coakley et al. 2014] COAKLEY, Daniel ; RAFTERY, Paul ; KEANE, Marcus: A review of methods to match building energy simulation models to measured data. In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 37 (2014), S. 123–141 (Zitiert auf den Seiten 101 und 102.)
- [Čongradac et al. 2012] ČONGRADAC, Velimir ; PREBIRAČEVIĆ, Bogdan ; JORGOVANOVIĆ, Nikola ; STANIŠIĆ, Darko: Assessing the energy consumption for heating and cooling in hospitals. In: *Energy and Buildings* 48 (2012), S. 146–154 (Zitiert auf Seite 17.)
- [Corrado und Mechri 2009] CORRADO, V. ; MECHRI, H. E.: Uncertainty and Sensitivity Analysis for Building Energy Rating. In: *Journal of Building Physics* 33 (2009), Nr. 2, S. 125–156 (Zitiert auf den Seiten 83 und 85.)
- [Correia da Silva et al. 2013] CORREIA DA SILVA, Pedro ; LEAL, Vítor ; ANDERSEN, Marilyne: Occupants interaction with electric lighting and shading systems in real single-occupied offices: Results from a monitoring campaign. In: *Building and Environment* 64 (2013), S. 152–168 (Zitiert auf Seite 54.)

- [Costa et al. 2009] COSTA, Andrea ; KEANE, Marcus ; RAFTERY, Paul ; O'DONNELL, James: Key Factors-Methodology for Enhancement and Support of Building Energy Performance. In: *Proceedings of the 11th International IBPSA Conference*. Glasgow, Schottland, 27.-30. Juli 2009 (Zitiert auf den Seiten 100, 114, und 115.)
- [Daly et al. 2014] DALY, Daniel ; COOPER, Paul ; MA, Zhenjun: Understanding the Risks and Uncertainties Introduced by Common Assumptions in Energy Simulations for Australian Commercial Buildings. In: *Energy and Buildings* (2014), Nr. 75 (Zitiert auf Seite 15.)
- [Dawson-Haggerty et al. 2012] DAWSON-HAGGERTY, Stephen ; LANZISERA, Steven ; TANEJA, Jay ; BROWN, Richard ; CULLER, David: @scale: Insights from a Large, Long-Lived Appliance Energy WSN. In: *Proceedings of the 11th international conference on Information Processing in Sensor Networks IPSN*. Beijing, China, 16.-19. April 2012 (Zitiert auf Seite 55.)
- [De Souza und Alsaadani 2012] DE SOUZA, Clarice Bleil ; ALSAADANI, Sara: Thermal Zoning in speculative Office Buildings: Discussing the Connections between Space Layout and inside Temperature Control. In: *First Building Simulation and Optimization Conference*. Loughborough, UK, 10.-11. September 2012 (Zitiert auf Seite 33.)
- [DeBaillie 2012] DEBAILLIE, Lee: Teaching Commercial Buildings Energy Dynamics through Simplified Energy Modeling Tools. In: *2012 ACEEE Summer Study on Energy Efficiency in Buildings: Fueling Our Future with Efficiency*. Pacific Grove, Kalifornien, 12.-17. August 2012 (Zitiert auf Seite 14.)
- [Deru et al. 2011] DERU, Michael ; FIELD, Kristin ; STUDER, Daniel ; BENNE, Kyle ; GRIFFITH, Brent ; TORCELLINI, Paul ; LIU, Bing ; HALVERSON, Mark ; WINIARSKI, Dave ; ROSENBERG, Michael ; YAZDANIAN, Mehry ; HUANG, Joe ; CRAWLEY, Drury: *U.S. Department of Energy commercial reference building models of the national building stock*. 2011 (Zitiert auf Seite 17.)
- [Destatis 2012] STATISTISCHES BUNDESAMT (Hrsg.): *20 Jahre Krankenhausstatistik*. 2012. – Wiesbaden (Zitiert auf Seite 4.)
- [Destatis 2015] STATISTISCHES BUNDESAMT: *Kostennachweis der Krankenhäuser 2014. Fachserie 12. Reihe 6.3*. 2015 (Zitiert auf Seite 11.)
- [Destatis 2016] STATISTISCHES BUNDESAMT: *Grunddaten der Krankenhäuser 2015. Fachserie 12. Reihe 6.1.1*. 2016 (Zitiert auf Seite 3.)
- [Diakaki et al. 2008] DIAKAKI, Christina ; GRIGOROUDIS, Evangelos ; KOLOKOTSA, Dionyssia: Towards a multi-objective optimization approach for improving energy efficiency in buildings. In: *Energy and Buildings* 40 (2008), Nr. 9, S. 1747–1754 (Zitiert auf den Seiten 114 und 115.)
- [DIN 13080:2003-07] DIN 13080:2003-07, *Gliederung des Krankenhauses in Funktionsbereiche und Funktionsstellen* (Zitiert auf Seite 57.)

- [DIN 13370:2008-08] DIN 13370:2008-08, *Wärmetechnische Verhalten von Gebäuden - Wärmeübertragung über das Erdreich - Berechnungsverfahren* (Zitiert auf den Seiten 24 und 205.)
- [DIN 18599-10:2011-12] DIN 18599:2011-12, *Energetische Bewertung von Gebäuden - Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung - Teil 10: Nutzungsrandbedingungen, Klimadaten* (Zitiert auf Seite 57.)
- [DIN 18599-1:2011-12] DIN 18599:2011-12, *Energetische Bewertung von Gebäuden - Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung - Teil 1: Allgemeine Bilanzierungsverfahren, Begriffe, Zonierung und Bewertung der Energieträger* (Zitiert auf den Seiten 33 und 34.)
- [DIN 18599-2:2011-12] DIN 18599:2011-12, *Energetische Bewertung von Gebäuden - Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung - Teil 2: Nutzenergiebedarf für Heizen und Kühlen von Gebäudezonen* (Zitiert auf Seite 24.)
- [DIN 18599-5:2011-12] DIN 18599:2011-12, *Energetische Bewertung von Gebäuden - Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung - Teil 5: Endenergiebedarf von Heizsystemen* (Zitiert auf Seite 25.)
- [DIN 1946-4:2005-04] DIN 1946-4:2005-04, *Raumlufttechnik -Teil 4: Raumlufttechnische Anlagen in Krankenhäusern* (Zitiert auf Seite 6.)
- [DIN 1988-200] DIN1988-200:2012-05, *Technische Regeln für Trinkwasser-Installationen - Teil 200: Installation Typ A (geschlossenes System) - Planung, Bauteile, Apparate, Werkstoffe; Technische Regel des DVGW* (Zitiert auf Seite 48.)
- [DOE 2012] US DEPARTMENT OF ENERGY DOE: *2011 Buildings Energy Data Book*. 2012 (Zitiert auf Seite 55.)
- [DOE 2013] U.S. DEPARTMENT OF ENERGY DOE: *Getting Started with EnergyPlus. Basic Concepts Manual – Essential Information You Need about Running Energy Plus (and start a building simulation)*. 2013 (Zitiert auf Seite 32.)
- [Domínguez-Muñoz et al. 2010] DOMÍNGUEZ-MUÑOZ, Fernando ; CEJUDO-LÓPEZ, José M. ; CARRILLO-ANDRÉS, Antonio: Uncertainty in peak cooling load calculations. In: *Energy and Buildings* 42 (2010), Nr. 7, S. 1010–1018 (Zitiert auf den Seiten 80, 82, und 85.)
- [Dymola] DASSAULT SYSTEMES: *Multi-Engineering Modeling and Simulation - Dymola - CATIA*. <http://www.3ds.com/products-services/catia/products/dymola>. – Zugriff am 31.08.2016 (Zitiert auf Seite 21.)
- [ECG 2012] ENERGIE CONSULTING GMBH: *Deutsche Kliniken können 200 Mio. Euro Energiekosten sparen: Durch Modernisierung Einsparpotential von bis zu 10 Prozent*. 2012 (Zitiert auf Seite 9.)

- [Eisenhower et al. 2012a] EISENHOWER, Bryan ; O’NEILL, Zheng ; FONOBEROV, Vladimir A. ; MEZIĆ, Igor: Uncertainty and sensitivity decomposition of building energy models. In: *Journal of Building Performance Simulation* 5 (2012), Nr. 3, S. 171–184 (Zitiert auf den Seiten 34 und 77.)
- [Eisenhower et al. 2012b] EISENHOWER, Bryan ; O’NEILL, Zheng ; NARAYANAN, Sathish ; FONOBEROV, Vladimir A. ; MEZIĆ, Igor: A methodology for meta-model based optimization in building energy models. In: *Energy and Buildings* 47 (2012), S. 292–301 (Zitiert auf Seite 14.)
- [EnCO2de 2006] DEPARTMENT OF HEALTH ESTATES AND FACILITIES DIVISION: *Health technical memorandum*. Bd. 07-02: *EnCO2de - making energy work in healthcare : environment and sustainability*. London : The Stationery Office, 2006. – ISBN 978-0-11-322731-0 (Zitiert auf Seite 7.)
- [Esmaeili et al. 2011] ESMAEILI, Mohammad A. ; JAHROMI, Ashkan S. ; TWOMEY, Janet ; YILDIRIM, Bayram ; OVERCASH, Michael ; DOMINQUEZ, Fernando ; THOMAS, Nicholas ; MCADAM, Ashlee: Hospital radiology department overhead energy estimation. In: *2011 IEEE International Symposium on Sustainable Systems and Technology (ISSST)*. Chicago, USA, 16.-18. Mai 2011, S. 1–6 (Zitiert auf den Seiten 17 und 50.)
- [Fabi et al. 2012] FABI, Valentina ; ANDERSEN, Rune V. ; CORGNATI, Stefano ; OLESEN, Bjarne W.: Occupants’ window opening behaviour: A literature review of factors influencing occupant behaviour and models. In: *Building and Environment* 58 (2012), S. 188–198 (Zitiert auf Seite 52.)
- [Feist 1994] FEIST, Wolfgang: *Thermische Gebäudesimulation: Kritische Prüfung unterschiedlicher Modellansätze*. 1. Auflage. Heidelberg : Müller, Jur. Verl., 1994. – ISBN 3788074868 (Zitiert auf Seite 23.)
- [Foord und Lidwell 1975] FOORD, N. ; LIDWELL, O. M.: Airborne infection in a fully air-conditioned hospital: I. Air transfer between rooms. In: *Journal of Hygiene* 75 (1975), Nr. 01, S. 15 (Zitiert auf den Seiten 32 und 206.)
- [Fuertes und Schiavon 2014] FUERTES, Gwen ; SCHIAVON, Stefano: Plug load energy analysis: The role of plug loads in LEED certification and energy modeling. In: *Energy and Buildings* 76 (2014), S. 328–335 (Zitiert auf Seite 55.)
- [Garcia Sanchez et al. 2014] GARCIA SANCHEZ, D. ; LACARRIÈRE, B. ; MUSY, M. ; BOURGES, B.: Application of sensitivity analysis in building energy simulations: Combining first- and second-order elementary effects methods. In: *Energy and Buildings* 68 (2014), S. 741–750 (Zitiert auf den Seiten 78, 79, und 85.)
- [Georgescu et al. 2012] GEORGESCU, Michael ; EISENHOWER, Bryan ; MEZIĆ, Igor: Creating Zoning Approximations to Building Energy Models Using The Koopman Operator. In: *SimBuild 2012*. Madison, USA, 1.-3. August 2012 (Zitiert auf Seite 35.)

- [GERTEC 2007] GERTEC GMBH: *Gebäudetypologie. Die energiegerechte Modernisierung von Wohngebäuden*. 2007. – Beiträge zum Umweltschutz 26. Umweltamt der Stadt Essen (Zitiert auf Seite 205.)
- [Gierga und Staniszewski 2014] GIERGA, Michael ; STANISZEWSKI, André: *ENEV 2014 Energieeinsparverordnung. Leitfaden für Wohngebäude*. 2014 (Zitiert auf Seite 205.)
- [Giridharan et al. 2013] GIRIDHARAN, R. ; LOMAS, K. J. ; SHORT, C. A. ; FAIR, A. J.: Performance of hospital spaces in summer: A case study of a ‘Nucleus’-type hospital in the UK Midlands. In: *Energy and Buildings* 66 (2013), S. 315–328 (Zitiert auf Seite 17.)
- [Gordo et al. 2011] GORDO, E. ; CAMPOS, A. ; COELHO, D.: Energy Efficiency in a Hospital Building Case Study: Hospitais da Universidade de Coimbra. In: *3rd International Youth Conference on Energetics (IYCE)*. Leiria, 7.-9. Juli 2011. – ISBN 978-1-4577-1494-8 (Zitiert auf den Seiten 12 und 13.)
- [Goullet 2008] GOULLET, Dominique: Kosteneinsparungen in der Sterilisation: Wasser oder Elektrizität? In: *SGSV forum* (2008), Nr. 4 (Zitiert auf Seite 8.)
- [Güçyeter und Günaydin 2012] GÜÇYETER, Başak ; GÜNAYDIN, H. M.: Optimization of an envelope retrofit strategy for an existing office building. In: *Energy and Buildings* 55 (2012), S. 647–659 (Zitiert auf Seite 115.)
- [Gulde 2013] GULDE, Johannes: Ökobilanz einer ZSVA. In: *SGSV forum* (2013), Nr. 1 (Zitiert auf Seite 8.)
- [Gunay et al. 2013] GUNAY, H. B. ; O’BRIEN, William ; BEAUSOLEIL-MORRISON, Ian: A critical review of observation studies, modeling, and simulation of adaptive occupant behaviors in offices. In: *Building and Environment* 70 (2013), S. 31–47 (Zitiert auf Seite 53.)
- [Guyon 1997] GUYON, Gilles: Role of the Model User in Results Obtained from Simulation Software Program. In: *Building Simulation 97 - Fifth International IBPSA Conference*. Prag, 8.-10. September 1997 (Zitiert auf Seite 15.)
- [Haldi und Robinson 2009] HALDI, Frédéric ; ROBINSON, Darren: A comprehensive stochastic model of window usage: Theory and validation. In: *Building Simulation 09 - 11th International IBPSA Conference*. Glasgow, Schottland, 27.-30. Juli 2009, S. 545–552 (Zitiert auf Seite 53.)
- [Hampton 2011] HAMPTON, Ania: Energy simulation of existing buildings and refurbishment. In: *Ecolibrium* (2011), S. 42–48 (Zitiert auf den Seiten 14, 15, und 16.)
- [Harsem 2011] HARSEM, Trond T.: Stricter specification of the energy performance of healthcare equipment can reduce hospital energy consumption. In: *4th European Conference on Healthcare Engineering*. Paris, 30. Mai-1. Juni 2011 (Zitiert auf Seite 50.)

- [Hebgen und Heck 2013] HEBGEN, Friedrich ; HECK, Friedrich: *Außenwandkonstruktionen mit optimalem Wärmeschutz - Grundlagen u. Richtwerte, Stoffwerttab., 58 Außenwände in je 5 Varianten*. Berlin Heidelberg New York : Springer-Verlag, 2013. – ISBN 978-3-322-84166-7 (Zitiert auf Seite 204.)
- [Heiselberg et al. 2007] HEISELBERG, Per K. ; BROHUS, Henrik ; HESSELHOLT, Allan T. ; RASMUSSEN, Henrik Erreboe S. ; SEINRE, Erkki ; THOMAS, Sara: Application of Sensitivity Analysis in Design of Sustainable Buildings. In: *SDBE 2007: Sustainable Development of Building and Environment*. Chongqing, China, 2007 (Zitiert auf Seite 85.)
- [Heo et al. 2012] HEO, Y. ; CHOUDHARY, R. ; AUGENBROE, G.A: Calibration of building energy models for retrofit analysis under uncertainty. In: *Energy and Buildings* 47 (2012), S. 550–560 (Zitiert auf Seite 11.)
- [Herkel et al. 2008] HERKEL, Sebastian ; KNAPP, Ulla ; PFAFFEROTT, Jens: Towards a model of user behaviour regarding the manual control of windows in office buildings. In: *Building and Environment* 43 (2008), Nr. 4, S. 588–600 (Zitiert auf den Seiten 53 und 54.)
- [Hestermann und Rongen 2015] HESTERMANN, Ulf ; RONGEN, Ludwig: *Frick/Knöll Baukonstruktionslehre 1 -* 36. vollst. überarb. und akt. Auflage. Wiesbaden : Springer Fachmedien, 2015. – ISBN 978-3-834-82564-3 (Zitiert auf Seite 204.)
- [van Heur 2008] HEUR, Rob van: *Power Quality Utilization Guide: Hospitals Energy Efficiency*. 2008. – Leonardo Energy (Zitiert auf den Seiten 8 und 50.)
- [Hintemann und Fichter 2010] HINTEMANN, Ralph ; FICHTER, Klaus: *Materialbestand der Rechenzentren in Deutschland. Eine Bestandsaufnahme zur Ermittlung von Ressourcen- und Energieeinsatz*. 2010 (Zitiert auf Seite 201.)
- [Hinze 2004] HINZE, Annette: *Ein segensreiches Geschenk. 150 Jahre HuysSENS-Stiftung*. Essen : Klartext Verlag, 2004. – ISBN 3-89861-340-2 (Zitiert auf Seite 26.)
- [HKI 2011] *Klima schützen und Kosten senken. Ein Leitfaden zur Energieeffizienz in Großküchen*. 2011. – HKI Industrieverband Haus-, Heiz- und Kühltechnik e.V. (Zitiert auf Seite 8.)
- [Holeck 2007] HOLECK, Stefan: *Energieoptimierung in Krankenhäusern: Qualität und Quantität des Energiebedarfs von Krankenhäusern unter besonderer Berücksichtigung des Einflusses des architektonischen und baukonstruktiven Entwurfes*. Weimar, Bauhaus-Universität Weimar, Dissertation, 2007 (Zitiert auf den Seiten 5 und 51.)
- [Hong et al. 2000] HONG, Tianzhen ; CHOU, S. K. ; BONG, T. Y.: Building simulation: an overview of developments and information sources. In: *Building and Environment* 35 (2000), S. 347–361 (Zitiert auf den Seiten 14 und 15.)
- [Hong und Lin 2013] HONG, Tianzhen ; LIN, Hung-Wen: *Occupant Behavior: Impact on Energy Use of Private Offices*. 2013. – Lawrence Berkeley National Laboratory. LBNL-6128E (Zitiert auf den Seiten 52 und 82.)

- [Hopfe et al. 2007] HOPFE, Christina ; HENSEN, Jan ; PLOKKER, Wim: Uncertainty and Sensitivity Analysis for detailed Design Support. In: *Proceedings of the 10th IBPSA Building Simulation Conference, 2007*, S. 1799–1804 (Zitiert auf Seite 85.)
- [Hosni et al. 1999] HOSNI, Mohammad H. ; JONES, Byron W. ; XU, Hanming: Experimental Results for Heat Gain and Radiant/Convective Split from Equipment in Buildings. In: *ASHRAE Transactions* 105 (1999), Nr. 2 (Zitiert auf Seite 206.)
- [Hu et al. 2004] HU, S. C. ; CHEN, J. D. ; CHUAH, Y. K.: Energy Cost and Consumption in a Large Acute Hospital. In: *International Journal on Architectural Science* 5 (2004), Nr. 1, S. 11–19 (Zitiert auf den Seiten 5 und 7.)
- [Hygh et al. 2012] HYGH, Janelle S. ; DECAROLIS, Joseph F. ; HILL, David B. ; RANJI RANJITHAN, S.: Multivariate regression as an energy assessment tool in early building design. In: *Building and Environment* 57 (2012), S. 165–175 (Zitiert auf den Seiten 78 und 85.)
- [Hyun et al. 2007] HYUN, Se-Hoon ; PARK, Cheol-Soo ; AUGENBROE, Godfried: Uncertainty and Sensitivity Analysis of Natural Ventilation in High-Rise Apartment Buildings. In: *Proceedings of Building Simulation 2007, 2007*, S. 1013–1020 (Zitiert auf den Seiten 53 und 79.)
- [IEEE 602:2007] *IEEE 602:2007. IEEE Recommended Practice for Electric Systems in Health Care Facilities. 2007. The IEEE White Book* (Zitiert auf Seite 3.)
- [Iqbal und Al-Homoud 2007] IQBAL, Imran ; AL-HOMOUD, Mohammad S.: Parametric analysis of alternative energy conservation measures in an office building in hot and humid climate. In: *Building and Environment* 42 (2007), Nr. 5, S. 2166–2177 (Zitiert auf Seite 115.)
- [Iwashita und Akasaka 1997] IWASHITA, Go ; AKASAKA, Hiroshi: The effects of human behavior on natural ventilation rate and indoor air environment in summer — a field study in southern Japan. In: *Energy and Buildings* 25 (1997), Nr. 3, S. 195–205 (Zitiert auf Seite 53.)
- [Jakob et al. 2008] JAKOB, M. ; AIULFI, D. ; MASCHIO, I. ; PRIMAS, A. ; HAGEL, M. ; KARLSTRÖM, P.: Stromverbrauch in Bürogebäuden: Erhebung und Analyse von Kennzahlen. In: *15. Schweizerisches Status-Seminar "Energie- und Umweltforschung im Bauwesen"*. Zürich, 11.-12. September 2008, S. 105–114 (Zitiert auf Seite 201.)
- [Jensen und Petersen 2011] JENSEN, Anders H. ; PETERSEN, Peter M.: Energy efficiency in hospitals and laboratories. In: *Energy efficiency first: the foundation of a low-carbon society: ECEEE 2011 Summer Study : conference proceedings*. Belambra Presquile de Giens, Frankreich, 6.-11. Juni 2011, S. 1513–1520. – ISBN 978-91-633-4455-8 (Zitiert auf den Seiten 7, 49, 50, 51, und 122.)
- [Judkoff und Neymark 1995] JUDKOFF, R. ; NEYMARK, J.: *International Energy Agency Building Energy Simulation Test (BESTEST) and Diagnostic Method*. 1995 (Zitiert auf Seite 21.)

- [Judkoff et al. 2008] JUDKOFF, R. ; WORTMAN, D. ; O'DOHERTY, B. ; BURCH, J.: *A Methodology for Validationg Building Energy Analysis Simulations*. 2008 (NREL/TP). – National Renewable Energy Laboratory. NREL/TP 550-42059 (Zitiert auf Seite 14.)
- [Kah et al. 2013] KAH, Oliver ; BÄUNLICH, Kristin ; SCHULZ, Tanja ; GRILL, Andreas ; OTTINGER, Oliver ; SCHUMACHER, Roland: *Umsetzung des Passivhaus-Konzepts in Krankenhäusern*. 2013. – Passivhaus Institut. Studie im Auftrag des Hessischen Ministeriums für Wirtschaft, Verkehr und Landesentwicklung (Zitiert auf den Seiten 7, 8, 9, 48, 51, und 54.)
- [Karlsson et al. 2001] KARLSSON, J. ; RUBIN, M. ; ROOS, A.: Evaluation of predictive models for the angle-dependent total solar energy transmittance of glazing materials. In: *Solar Energy* 71 (2001), Nr. 1, S. 23–31 (Zitiert auf Seite 24.)
- [Katsanis und Tsarabaris 2010] KATSANIS, John S. ; TSARABARIS, Panayotis T.: New Method for Calculating Energy Consumption in Hospital Laundries. In: *Fifth International Conference on Interdisciplinarity in Education ICIE*, 17.-19. Juni 2010 (Zitiert auf Seite 8.)
- [Kennedy und O'Hagan 2001] KENNEDY, Marc C. ; O'HAGAN, Anthony: Bayesian calibration of computer models. In: *Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Statistical Methodology)* 63 (2001), Nr. 3, S. 425–464 (Zitiert auf Seite 101.)
- [Khodakarami et al. 2009] KHODAKARAMI, Jamal ; KNIGHT, Ian ; NASROLLAHI, Nazarin: Reducing the demands of heating and cooling in Iranian hospitals. In: *Renewable Energy* 34 (2009), Nr. 4, S. 1162–1168 (Zitiert auf Seite 18.)
- [Kim et al. 2013] KIM, Young-Jin ; YOON, Seong-Hwan ; PARK, Cheol-Soo: Stochastic comparison between simplified energy calculation and dynamic simulation. In: *Energy and Buildings* 64 (2013), S. 332–342 (Zitiert auf den Seiten 79 und 85.)
- [Kluge 2013] KLUGE, Steffen: Abschalten: Raumlufttechnik im OP. In: *kma Krankenhaustechnik* 7 (2013) (Zitiert auf Seite 11.)
- [Knight et al. 2007] KNIGHT, I. ; STRAVORAVDIS, S. ; LASVAUX, S.: Assessing the Operational Energy Profiles of UK educational buildings: Findings from detailed surveys and modelling compared to measured consumption. In: *2nd PALENC Conference and 28th AIVD Conference on Building Low Energy Cooling and Advanced Technologies in the 21st Century*. Kreta, Griechenland, 27.-29. September 2007 (Zitiert auf Seite 34.)
- [KRINKO 2012] *Anforderungen an die Hygiene bei der Aufbereitung von Medizinprodukten. Empfehlung der Kommission für Krankenhaushygiene und Infektionsprävention (KRINKO) beim Robert Koch-Institut (RKI) und des Bundesinstitutes für Arzneimittel und Medizinprodukte (BfArM)*. 2012. – Bundesgesundheitsblatt 2012, 55: 12400-1310 (Zitiert auf Seite 8.)
- [Kugler 2013] KUGLER, Wilfried: *Einführung eines wasser- und energieeffizienten Dampfsterilisators*. 2013. – Fluoron GmbH. Abschlussbericht (Zitiert auf Seite 8.)

- [Lam und Hui 1996] LAM, Joseph C. ; HUI, Sam C.: Sensitivity analysis of energy performance of office buildings. In: *Building and Environment* 31 (1996), Nr. 1, S. 27–39 (Zitiert auf den Seiten 77, 78, 82, und 85.)
- [Lam et al. 2008] LAM, Joseph C. ; WAN, Kevin K. ; YANG, Liu: Sensitivity analysis and energy conservation measures implications. In: *Energy Conversion and Management* 49 (2008), Nr. 11, S. 3170–3177 (Zitiert auf Seite 77.)
- [Lanzisera et al. 2013] LANZISERA, Steven ; DAWSON-HAGGERTY, Stephen ; CHEUNG, H. I. ; TANEJA, Jay ; CULLER, David ; BROWN, Richard: Methods for detailed energy data collection of miscellaneous and electronic loads in a commercial office building. In: *Building and Environment* 65 (2013), S. 170–177 (Zitiert auf den Seiten 55 und 56.)
- [Leittretter 2005] LEITTRETTER, Siegfried (Hrsg.): *Energieeffizientes Krankenhaus: Für Klimaschutz und Kostensenkung*. 2005 (Edition der Hans-Böckler-Stiftung). – Workshop am 15. September 2004 im Hotel Inter City Düsseldorf im Rahmen des Hans-Böckler-Projektes „Arbeits- und Umweltschutz in Krankenhäusern“ (Zitiert auf den Seiten 4, 11, 12, 13, und 52.)
- [Li et al. 2015] LI, Nan ; YANG, Zheng ; BECERIK-GERBER, Burcin ; TANG, Chao ; CHEN, Nanlin: Why is the reliability of building simulation limited as a tool for evaluating energy conservation measures? In: *Applied Energy* 159 (2015), S. 196–205 (Zitiert auf Seite 116.)
- [Lomas und Giridharan 2012] LOMAS, K. J. ; GIRIDHARAN, R.: Thermal comfort standards, measured internal temperatures and thermal resilience to climate change of free-running buildings: A case-study of hospital wards. In: *Building and Environment* 55 (2012), S. 57–72 (Zitiert auf Seite 17.)
- [Lomas und Eppel 1992] LOMAS, Kevin J. ; EPPPEL, Herbert: Sensitivity analysis techniques for building thermal simulation programs. In: *Energy and Buildings* 19 (1992), Nr. 1, S. 21–43 (Zitiert auf den Seiten 76, 80, 81, und 82.)
- [Loucks und Beeck 2005] LOUCKS, Daniel P. ; BEECK, Eelco v.: *Water Resources Systems Planning and Management: An Introduction to Methods, Models and Applications*. Delft : United Nations Educational, 2005 (Zitiert auf den Seiten 76, 80, und 81.)
- [Ma et al. 2012] MA, Zhenjun ; COOPER, Paul ; DALY, Daniel ; LEDO, Laia: Existing building retrofits: Methodology and state-of-the-art. In: *Energy and Buildings* 55 (2012), S. 889–902 (Zitiert auf Seite 114.)
- [Macdonald 2009] MACDONALD, Ian A.: Comparison of Sampling Techniques on the Performance of Monte-Carlo based Sensitivity Analysis. In: *Proceedings of the 11th International IBPSA Conference*. Glasgow, Schottland, 27.-30. Juli 2009, S. 992–999 (Zitiert auf Seite 80.)
- [Macdonald 2002] MACDONALD, Ian A.: *Quantifying the Effects of Uncertainty in Building Simulation*, University of Strathclyde, Dissertation, 2002 (Zitiert auf den Seiten 82, 83, und 116.)

- [Maderspacher et al. 2012] MADERSPACHER, Johannes ; ZWEIFEL, Gerhard ; MOOSBERGER, Sven: Vergleich eines deterministischen mit einem stochastischen Ansatz für die Personenbelegung in Nichtwohngebäuden. In: *Proceedings of BauSIM, Fourth German Austrian IBPSA Conference. Gebäudesimulation auf den Größenskalen Bauteil, Raum, Gebäude, Stadtquartier*. Berlin, 2012, S. 92–97 (Zitiert auf Seite 52.)
- [Madsen 2012] MADSEN, Per P.: Flexible Energy Consumption in Smart Houses. In: *8th IFAC Symposium on Power Plant and Power System Control*. Toulouse, 2.-5. September 2012 (Zitiert auf Seite 206.)
- [Mahdavi und Pröglhöf 2009] MAHDAVI, Ardeshir ; PRÖGLHÖF, Claus: User Behavior and Energy Performance in Buildings. In: *6. Internationale Energiewirtschaftstagung an der TU Wien*. Wien, 11. - 13. Februar 2009 (Zitiert auf Seite 52.)
- [Maile 2010] MAILE, Tobias: *Comparing measured and simulated building energy performance data*, Stanford University, Dissertation, 2010 (Zitiert auf den Seiten 34, 81, und 101.)
- [Maile et al. 2007] MAILE, Tobias ; FISCHER, Martin ; BAZJANAC, Vladimir: *Building Energy Performance Simulation Tools: A Life-Cycle and Interoperable Perspective*. 2007. – Working Paper WP107. Stanford University (Zitiert auf den Seiten 14, 15, 16, und 33.)
- [Manfren et al. 2013] MANFREN, Massimiliano ; ASTE, Niccolò ; MOSHKARSAR, Reza: Calibration and uncertainty analysis for computer models – A meta-model based approach for integrated building energy simulation. In: *Applied Energy* 103 (2013), S. 627–641 (Zitiert auf Seite 101.)
- [Martini et al. 2007] MARTINI, Irene ; DISCOLI, Carlos ; ROSENFELD, Elías: Methodology developed for the energy-productive diagnosis and evaluation in health buildings. In: *Energy and Buildings* 39 (2007), Nr. 6, S. 727–735 (Zitiert auf Seite 17.)
- [McKenney et al. 2010] MCKENNEY, Kurtis ; GUERNSEY, Matthew ; PONOUM, Ratcharit ; ROSENFELD, Jeff: *Commercial Miscellaneous Electric Loads: Energy Consumption Characterization and Savings Potential in 2008 by Building Type*. 2010. – TIAX LLC (Zitiert auf Seite 50.)
- [Menezes et al. 2014] MENEZES, A. C. ; CRIPPS, A. ; BUSWELL, R. A. ; WRIGHT, J. ; BOUCLAGHEM, D.: Estimating the energy consumption and power demand of small power equipment in office buildings. In: *Energy and Buildings* 75 (2014), S. 199–209 (Zitiert auf Seite 55.)
- [Modelica] MODELICA ASSOCIATION: *Modelica and the Modelica Association*. <https://www.modelica.org/>. – Zugriff am 31.08.2016 (Zitiert auf Seite 20.)
- [Morgenstern et al. 2016] MORGENSTERN, Paula ; LI, Maria ; RASLAN, Rokia ; RUYSSEVELT, Paul ; WRIGHT, Andrew: Benchmarking acute hospitals: Composite electricity targets based on departmental consumption intensities? In: *Energy and Buildings* 118 (2016), S. 277–290 (Zitiert auf Seite 51.)

- [Morris 1991] MORRIS, Max D.: Factorial Sampling Plans for Preliminary Computational Experiments. In: *Technometrics* 33 (1991), Nr. 2, S. 161–174 (Zitiert auf Seite 78.)
- [Murken 2011] MURKEN, Axel H.: Vom Hospital zum Krankenhaus. In: STOLLBER, Gunnar (Hrsg.) ; VANJA, Christina (Hrsg.) ; KRAAS, Ernst (Hrsg.): *Krankenhaushgeschichte heute - Was heißt und zu welchem Ende studiert man Hospital- und Krankenhaushgeschichte?* Lit Verlag, 2011 (Zitiert auf Seite 5.)
- [Nagel 2007] NAGEL, Eckhard (Hrsg.): *Das Gesundheitswesen in Deutschland: Struktur, Leistungen, Weiterentwicklung.* Deutscher Ärzteverlag, 2007. – ISBN 978-3-7691-3220-5 (Zitiert auf Seite 3.)
- [Ng et al. 2013] NG, Lisa ; MUSSER, Amy ; PERSILY, Andrew ; EMMERICH, Steven J.: Multizone Airflow Models for Calculating Infiltration Rates in Commercial Reference Buildings. In: *Energy and Buildings* 58 (2013), S. 11–18 (Zitiert auf Seite 18.)
- [Nicol 2001] NICOL, J. F.: Characterising occupant behaviour in buildings: Towards a stochastic model of occupant use of windows, lights, blinds, heaters and fans. In: *Building Simulation 2001: Seventh International IBPSA Conference.* Rio de Janeiro, Brasilien, 13.-15. August 2001, S. 1073–1078 (Zitiert auf den Seiten 53 und 54.)
- [NREL 2011] *Saving Energy in Commercial Buildings. Lighting System Assessment Guidelines.* 2011. – NREL/BR 7A20-50125 (Zitiert auf Seite 120.)
- [Nytsch-Geusen und Bartsch 2001] NYTSCH-GEUSEN, Christoph ; BARTSCH, Gerhard: An Object Oriented Multizone Thermal Building Modell Based on the Simulation Environment Smile. In: *Building Simulation 2001: Seventh International IBPSA Conference.* Rio de Janeiro, Brasilien, 13.-15. August 2001 (Zitiert auf Seite 21.)
- [O'Brien et al. 2011] O'BRIEN, William ; ATHIENITIS, Andreas ; KESIK, Ted: Thermal zoning and interzonal airflow in the design and simulation of solar houses: a sensitivity analysis. In: *Journal of Building Performance Simulation* 4 (2011), Nr. 3, S. 239–256 (Zitiert auf den Seiten 32, 33, und 35.)
- [ODYSEE-MURE 2015] GYNTHNER, Lea ; LAPILLONNE, Bruno ; POLLIER, Karine: *Energy Efficiency Trends and Policies in the Household and Tertiary Sectors. An Analysis Based on the ODYSSEE and MURE Databases.* 2015 (Zitiert auf Seite 1.)
- [ÖPP Deutschland AG 2012] ÖPP DEUTSCHLAND AG: *Lebenszyklusorientierte Betriebskostenkennzahlen für ein Benchmarking bei ÖPP-Projekten im Krankenhausbereich.* 2012. – ÖPP-Schriftenreihe (Zitiert auf den Seiten 4, 5, und 16.)
- [Orth und Martenka 2005] ORTH, Detlef ; MARTENKA, Michael: Tagesgänge des Trinkwarmwasserbedarfs. Messergebnisse für Hotels, Krankenhäuser und Wohnheime aus einem Forschungsvorhaben. In: *tab* (2005), Nr. 1 (Zitiert auf den Seiten 48 und 49.)

- [Ozyogurtcu et al. 2011] OZYOGURTCU, Gamze ; MOBEDI, Moghtada ; OZERDEM, Baris: Economical assessment of different HVAC systems for an operating room: Case study for different Turkish climate regions. In: *Energy and Buildings* 43 (2011), Nr. 7, S. 1536–1543 (Zitiert auf Seite 17.)
- [Pagliarini et al. 2012] PAGLIARINI, G. ; CORRADI, C. ; RAINIERI, S.: Hospital CHCP system optimization assisted by TRNSYS building energy simulation tool. In: *Applied Thermal Engineering* 44 (2012), S. 150–158 (Zitiert auf Seite 18.)
- [Peng et al. 2012] PENG, Chen ; YAN, Da ; WU, Ruhong ; WANG, Chuang ; ZHOU, Xin ; JIANG, Yi: Quantitative description and simulation of human behavior in residential buildings. In: *Building Simulation* 5 (2012), Nr. 2, S. 85–94 (Zitiert auf Seite 52.)
- [Raftery 2011] RAFTERY, Paul: *Calibrated whole building energy simulation: An evidence-based methodology*, NUI Galway, Dissertation, 2011 (Zitiert auf den Seiten 33, 100, 102, 103, und 105.)
- [Raftery et al. 2011a] RAFTERY, Paul ; KEANE, Marcus ; COSTA, Andrea: Calibrating whole building energy models: Detailed case study using hourly measured data. In: *Energy and Buildings* 43 (2011), Nr. 12, S. 3666–3679 (Zitiert auf den Seiten 34 und 35.)
- [Raftery et al. 2011b] RAFTERY, Paul ; KEANE, Marcus ; O’DONNELL, James: Calibrating whole building energy models: An evidence-based methodology. In: *Energy and Buildings* 43 (2011), Nr. 9, S. 2356–2364 (Zitiert auf Seite 33.)
- [Raftery et al. 2014] RAFTERY, Paul ; LEE, Edwin ; WEBSTER, Tom ; HOYT, Tyler ; BAUMAN, Fred: Effects of furniture and contents on peak cooling load. In: *Energy and Buildings* 85 (2014), S. 445–457 (Zitiert auf Seite 206.)
- [Reddy 2006] REDDY, T. A.: Literature Review on Calibration of Building Energy Simulation Programs: Uses, Problems, Procedures, Uncertainty and Tools. In: *ASHRAE Transactions* 112 (2006), Nr. 1, S. 226–240 (Zitiert auf den Seiten 100 und 114.)
- [Reddy et al. 2007a] REDDY, T. A. ; MAOR, Itzhak ; PANJAPORNPON, Chanin: Calibrating Detailed Building Energy Simulation Programs with Measured Data—Part I: General Methodology (RP-1051). In: *HVAC&R Research* 13 (2007), Nr. 2, S. 221–241 (Zitiert auf Seite 101.)
- [Reddy et al. 2007b] REDDY, T. A. ; MAOR, Itzhak ; PANJAPORNPON, Chanin: Calibrating Detailed Building Energy Simulation Programs with Measured Data—Part II: Application to Three Case Study Office Buildings (RP-1051). In: *HVAC&R Research* 13 (2007), Nr. 2, S. 243–265 (Zitiert auf den Seiten 34, 101, und 102.)
- [Reinhart und Voss 2002] REINHART, Christoph F. ; VOSS, Karsten: Monitoring manual control of electric lighting and blinds. In: *Lighting Research Technology* 35 (2002), Nr. 3, S. 243–260 (Zitiert auf Seite 54.)

- [Rijal et al. 2007] RIJAL, H.B. ; TUOHY, P. ; HUMPHREYS, M.A. ; NICOL, J.F. ; SAMUEL, A. ; CLARKE, J.: Using results from field surveys to predict the effect of open windows on thermal comfort and energy use in buildings. In: *Energy and Buildings* 39 (2007), Nr. 7, S. 823–836 (Zitiert auf den Seiten 53 und 54.)
- [Rivalin et al. 2014] RIVALIN, Lisa ; MARCHIO, Dominique ; CACIOLO, Marcello ; COGNE, Benoit: Influence of building zoning on annual energy demand. In: *3rd International High Performance Buildings Conference at Purdue*. West Lafayette, Indiana, 14.-17. Juli 2014 (Zitiert auf Seite 34.)
- [Robinson 2006] ROBINSON, Darren: Some trends and research needs in energy and comfort prediction. In: *Proceedings of comfort and energy use in buildings - Getting them right*. Windsor, 27.-30. April 2006 (Zitiert auf Seite 52.)
- [Roeder und Hensen 2009] ROEDER, Norbert (Hrsg.) ; HENSEN, Peter (Hrsg.): *Gesundheitsökonomie, Gesundheitssystem und öffentliche Gesundheitspflege*. Deutscher Ärzteverlag, 2009. – ISBN 978-3769134094 (Zitiert auf Seite 3.)
- [Rohde und Martinez 2015] ROHDE, Tarald ; MARTINEZ, Robert: Equipment and Energy Usage in a Large Teaching Hospital in Norway. In: *Journal of Healthcare Engineering* 6 (2015), Nr. 3, S. 419–434 (Zitiert auf Seite 51.)
- [Rohde et al. 2014] ROHDE, Tarald ; MARTINEZ, Robert ; MYSEN, Mads: Activity modeling for energy-efficient design of new hospitals. In: *International Journal of Facility Management* 5 (2014), Nr. 1 (Zitiert auf Seite 51.)
- [Ruiz et al. 2012] RUIZ, Roberto ; BERTAGNOLIO, Stéphane ; LEMORT, Vincent: Global Sensitivity Analysis applied to Total Energy Use in Buildings. In: *International High Performance Buildings Conference*. Lafayette, USA, 16.-19. Juli 2012 (Zitiert auf Seite 85.)
- [Sachs 2005] SACHS, Harvey M.: *Opportunities for Elevator Energy Efficiency Improvements*. 2005. – American Council for an Energy-Efficient Economy. ACEEE White Paper (Zitiert auf Seite 8.)
- [Saltelli et al. 2008] SALTELLI, A. ; RATTO, M. ; ANDRES, T. ; F., Campolongo ; CARIBONI, J. ; GATELLI, D. ; SAISANA, M. ; TARANTOLA, S.: *Global Sensitivity Analysis. The Primer*. Chichester, England : John Wiley and Sons Ltd, 2008. – ISBN 978-0-470-05997-5 (Zitiert auf den Seiten 76, 78, und 80.)
- [Saltelli und Annoni 2010] SALTELLI, Andrea ; ANNONI, Paola: How to avoid a perfunctory sensitivity analysis. In: *Environmental Modelling & Software* 25 (2010), Nr. 12, S. 1508–1517 (Zitiert auf Seite 77.)
- [Saltelli et al. 2006] SALTELLI, Andrea ; RATTO, Marco ; TARANTOLA, Stefano ; CAMPOLONGO, Francesca: Sensitivity analysis practices: Strategies for model-based inference. In: *Reliability Engineering & System Safety* 91 (2006), Nr. 10-11, S. 1109–1125 (Zitiert auf Seite 78.)

- [Salvalai et al. 2010] SALVALAI, Graziano ; PFAFFEROTT, Jens ; JACOB, Dirk: Validation of a low-energy whole building simulation model. In: *SimBuild 2010 - Fourth National Conference of IBPSA-USA*. New York, USA, 11.-13. August 2010 (Zitiert auf Seite 13.)
- [Samuelson et al. 2012] SAMUELSON, Holly W. ; LANTZ, Andrew ; REINHART, Christoph F.: Non-technical barriers to energy model sharing and reuse. In: *Building and Environment* 54 (2012), S. 71–76 (Zitiert auf Seite 13.)
- [Schmid et al. 2013] SCHMID, Christoph ; NIPKOW, Jürg ; VOGT, Christian: *Heizung, Lüftung, Elektrizität - Energietechnik im Gebäude*. Berlin Heidelberg New York : Springer-Verlag, 2013. – ISBN 978-3-322-89125-9 (Zitiert auf Seite 207.)
- [Schmitt et al. 2008] SCHMITT, Wolfgang ; HETZEL, Georg ; HECKER, Thomas ; FISCHHABER, Daniel: Klimatechnik im Krankenhaus: Systemkompetenz in der Raumluftechnik. In: *IHK FachJournal* 2008 (2008), S. 76–83 (Zitiert auf Seite 11.)
- [SimLab] JRC, European Commission Joint Research C.: *Simlab 2.2 Reference Manual*. – URL https://ec.europa.eu/jrc/sites/jrcsh/files/SimLab_Manual_Ver2.2.zip (Zitiert auf Seite 80.)
- [Singer 2009] SINGER, Brett C.: *Hospital energy benchmarking Guidance: Version 1.0*. 2009 (Zitiert auf Seite 10.)
- [Singer et al. 2009] SINGER, Brett C. ; COUGHLIN, Jennifer L. ; MATHEW, Paul: *Summary of Information and Resources Related to Energy Use in Hospitals: Version 1.0*. 2009 (Zitiert auf den Seiten 5 und 7.)
- [Singer und Tschudi 2009] SINGER, Brett C. ; TSCHUDI, William F.: *High Performance Healthcare Buildings: A Roadmap to Improved Energy Efficiency*. 2009 (Zitiert auf den Seiten 3, 6, 9, 10, 11, und 56.)
- [Spiegel 1961] Krankenhausbau - Aus der grünen Bibel. In: *Der Spiegel* (1961), Nr. 13 (Zitiert auf Seite 5.)
- [Spitz et al. 2012] SPITZ, Clara ; MORA, Laurent ; WURTZ, Etienne ; JAY, Arnaud: Practical application of uncertainty analysis and sensitivity analysis on an experimental house. In: *Energy and Buildings* 55 (2012), S. 459–470 (Zitiert auf Seite 80.)
- [Stymiest 2010] STYMIEST, David: Health Care Energy Management Benchmarking. In: *ASHRE's 47th Annual Conference*. Tampa, Florida, 11.-14. Juli 2010 (Zitiert auf Seite 10.)
- [Taboga 2014] TABOGA, Robert: *Krankenhaus Controlling: Konzepte, Ziele und Herausforderungen in der Krankenhauspraxis*. Hamburg : Diplomica Verlag, 2014. – ISBN 978-3958505032 (Zitiert auf Seite 4.)
- [Tahsildoost und Zomorodian 2015] TAHSILDOOST, Mohammad ; ZOMORODIAN, Zahra S.: Energy retrofit techniques: An experimental study of two typical school buildings in Tehran. In: *Energy and Buildings* 104 (2015), S. 65–72 (Zitiert auf den Seiten 115 und 117.)

- [Tian 2013] TIAN, Wei: A review of sensitivity analysis methods in building energy analysis. In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 20 (2013), S. 411–419 (Zitiert auf den Seiten 77, 78, und 82.)
- [Tippkötter et al. 2009] TIPPKÖTTER, Rainer ; SCHÜWER, Dietmar ; WALLSCHLAG, Benedikt: *Leitfaden Energieeffizienz für Krankenhäuser*. Energieagentur NRW, 2009 (Zitiert auf den Seiten 6, 9, 10, und 48.)
- [Toshiba 2014] TOSHIBA: *Strom sparen bedeutet Geld sparen. TÜV bestätigt niedrige Verbrauchswerte des Aquilion Prime*. 2014. – VIPPost 20. Das Toshiba Kundenmagazin (Zitiert auf Seite 50.)
- [Trčka und Hensen] TRČKA, Marija ; HENSEN, Jan L. M.: Towards a guideline for selecting the appropriate abstraction level for building systems simulation. In: *Proceedings of the 17th Int. Air-conditioning and Ventilation Conference*. Prag (Zitiert auf Seite 14.)
- [Tupper et al. 2011] TUPPER, Kendra ; FRANCONI, Ellen ; CHAN, Coreina ; FLUHRER, Caroline ; JENKINS, Merritt ; HODGIN, Stephanie: *Building Energy Modeling Innovation Summit - Pre-Read for BEM Innovation Summit*. 2011. – Rocky Mountain Institute (Zitiert auf Seite 101.)
- [TWL 2012] TWL-TECHNOLOGIE GMBH: *Speicher sind unser Element. 2012 Gesamtkatalog*. 2012. – URL <http://nrdc.de/twl-technologie.de/epaper/page6.html#/0>. – Zugriffsdatum: 2015-11-19 (Zitiert auf Seite 207.)
- [UMSICHT 2017] FRAUNHOFER UMSICHT: *Hospital Engineering - Teilprojekt Energieeffizienz. Energetische Modellierung von Krankenhäusern für Transparenz und Energieeinsparung*. 2017. – Abschlussbericht des Projektes Hospital Engineering (Zitiert auf Seite 21.)
- [USAID 2010] USAID INDIA: *Energy Conservation Building Code Tip Sheet: Energy Simulation*. 2010 (Zitiert auf Seite 101.)
- [VDE 2011] VDE: *VDE-Studie: Krankenhäuser können 600 Millionen Euro an Energiekosten sparen*. 2011. – Pressemitteilung (Zitiert auf Seite 10.)
- [VDI 2078] VDI 2078:2012-03, *Raumlufttechnik -Teil 4: Raumlufttechnische Anlagen in Krankenhäusern* (Zitiert auf Seite 205.)
- [VDI 6007-1] VDI 6007 Blatt 1:2012-03, *Berechnung des instationären thermischen Verhaltens von Räumen und Gebäuden. Raummodell* (Zitiert auf Seite 205.)
- [Viamedica 2009] STIFTUNG VIAMEDICA: *Erneuerbare Energien und Energieeffizienz in deutschen Kliniken: Klinergie 2020*. 2009 (Zitiert auf den Seiten 6 und 10.)
- [Viering und Söhnle 2010] VIERING, Stefan ; SÖHNLE, Nils: *Krankenhauslandschaft im Umbruch: Wirtschaftskrise, Wettbewerb und neue Kundenwünsche*. 2010 (Zitiert auf Seite 4.)

- [Vogler und Hassenpflug 1951] VÖGLER, Paul ; HASSENPFUG, Gustav: *Handbuch für den Neuen Krankenhausbau*. München Urban & Schwarzenberg, 1951 (Zitiert auf Seite 5.)
- [Wallace et al. 2002] WALLACE, L.A. ; EMMERICH, S. J. ; HOWARD-REED, C.: Continuous measurements of air change rates in an occupied house for 1 year: The effect of temperature, wind, fans and windows. In: *Journal of Exposure Analysis and Environmental Epidemiology* (2002), Nr. 12, S. 296–306 (Zitiert auf Seite 53.)
- [Waltz 2000] WALTZ, James P.: *Computerized Building Energy Simulation Handbook*. Lilburn, GA : The Fairmount Press, 2000. – ISBN 0-88173-259-1 (Zitiert auf den Seiten 100 und 102.)
- [Wang et al. 2013] WANG, Liping ; GREENBERG, Steve ; FIEGEL, John ; RUBALCAVA, Alma ; EARNI, Shankar ; PANG, Xiufeng ; YIN, Rongxin ; WOODWORTH, Spencer ; HERNANDEZ-MALDONADO, Jorge: Monitoring-based HVAC commissioning of an existing office building for energy efficiency. In: *Applied Energy* 102 (2013), S. 1382–1390 (Zitiert auf den Seiten 115 und 117.)
- [Warren und Parkins 1984] WARREN, P. R. ; PARKINS, L. M.: Window-opening behaviour in office buildings. In: *Building Services Engineering Research and Technology* 5 (1984), Nr. 3, S. 89–101 (Zitiert auf den Seiten 53 und 54.)
- [Wetter 2011] WETTER, Michael: A View on Future Building system Modeling and Simulation. In: HENSEN, JAN L. M. (Hrsg.) ; LAMBERTS, Roberto (Hrsg.): *Building Performance Simulation for Design and Operation*. Spon Press, 2011 (Zitiert auf Seite 20.)
- [Wikora 2015] *Kaltwasserpufferspeicher. Die flexible Lösung vom Spezialisten*. 2015. – URL http://www.wikora.de/fileadmin/Verkaufsunterlagen/Kaeltespeicher_DE.pdf. – Zugriffsdatum: 2015-11-19. – Produktdatenblatt (Zitiert auf Seite 207.)
- [Wilde und Tian 2010] WILDE, Pieter d. ; TIAN, Wei: Predicting the performance of an office under climate change: A study of metrics, sensitivity and zonal resolution. In: *Energy and Buildings* 42 (2010), Nr. 10, S. 1674–1684 (Zitiert auf den Seiten 33, 34, und 85.)
- [Wilkins und Hosni 2011] WILKINS, Christopher K. ; HOSNI, Mohammad H.: Plug Load Design Factors. In: *ASHRAE Journal* (2011) (Zitiert auf den Seiten viii und 55.)
- [Wit 1997] WIT, Sten D.: Identification of the important parameters in thermal building simulation models. In: *Journal of Statistical Computation and Simulation* 57 (1997), Nr. 1-4, S. 305–320 (Zitiert auf den Seiten 78 und 79.)
- [Wit und Augenbroe 2002] WIT, Sten d. ; AUGENBROE, Godfried: Analysis of uncertainty in building design evaluations and its implications. In: *Energy and Buildings* 34 (2002), Nr. 9, S. 951–958 (Zitiert auf den Seiten 79 und 81.)

- [Witte et al. 2001] WITTE, Michael J. ; HENNINGER, Robert H. ; GLAZER, Jason ; CRAWLEY, Drury B.: Testing and validation of a new building energy simulation program. In: *Building Simulation 2001: Seventh International IBPSA Conference*. Rio de Janeiro, Brasilien, 13.-15. August 2001, S. 353–359 (Zitiert auf Seite 15.)
- [Xing et al. 2015] XING, Jincheng ; REN, Peng ; LING, Jihong: Analysis of energy efficiency retrofit scheme for hotel buildings using eQuest software: A case study from Tianjin, China. In: *Energy and Buildings* 87 (2015), S. 14–24 (Zitiert auf den Seiten 115 und 117.)
- [Zhang et al. 2004] ZHANG, Ling ; ZHANG, Nan ; ZHAO, Fuyun ; CHEN, Youming: A genetic-algorithm-based experimental technique for determining heat transfer coefficient of exterior wall surface. In: *Applied Thermal Engineering* 24 (2004), Nr. 2-3, S. 339–349 (Zitiert auf Seite 204.)
- [Zhu 2006] ZHU, Yimin: Applying computer-based simulation to energy auditing: A case study. In: *Energy and Buildings* 38 (2006), Nr. 5, S. 421–428 (Zitiert auf den Seiten 32 und 115.)
- [Zygmund 2015] ZYGMUND, Gustav: *Stromverbrauchsinfo.de*. 2015. – URL <http://www.stromverbrauchinfo.de/stromverbrauch-tv-geraete.php>. – Zugriffsdatum: 08.05.2015 (Zitiert auf Seite 64.)

Anhang

Anhang A

Beleuchtungs-, Geräte- und Raumprofile

A.1 Beleuchtung

Tabelle A.1: Anteile eingeschalteter Beleuchtung während der Nachtstunden für die verschiedenen Raumtypen, P: Pflegebereich, A:Ambulanter/Bürobereich

Uhrzeit	16:00	18:00	21:00	21:30	23:15	0:45	1:45	2:15	5:15	6:00	8:00
Raumtyp	Anteil der Räume mit eingeschalteter Beleuchtung										
Alle Räume	0,50	0,45	0,38	0,32	0,37	0,33	0,25	0,28	0,31	0,49	0,62
Bettzimmer	0,38	0,57	0,51	0,48	0,27	0,19	0,19	0,12	0,17	0,48	0,63
Büro	0,54	0,20	0,10	0,07	0,12	0,15	0,08	0,07	0,13	0,25	0,56
Dienstzimmer	0,53	0,56	0,39	0,42	0,45	0,58	0,36	0,35	0,47	0,47	0,76
Teeküche P	0,40	0,71	0,67	0,69	0,80	0,55	0,50	0,58	0,73	0,73	0,82
Teeküche A	0,45	0,22	0,08	0,09	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,20	0,86
Lager P	0,34	0,28	0,44	0,18	0,44	0,32	0,27	0,33	0,56	0,52	0,47
Lager A	0,55	0,21	0,09	0,00	0,25	0,16	0,00	0,25	0,19	0,48	0,62
Treppenhaus	0,69	0,95	0,85	0,81	0,87	0,94	0,74	1,00	0,95	0,90	0,91
Flur P	0,92	0,83	0,89	0,90	1,00	1,00	0,94	0,86	0,80	0,93	0,86
Flur A	0,84	0,75	0,53	0,40	0,82	0,71	0,33	0,47	0,71	0,83	0,94
Arztzimmer	0,37	0,22	0,13	0,09	0,15	0,09	0,05	0,02	0,23	0,26	0,39
Arbeitsraum	0,25	0,33	0,13	0,40	0,00	0,13	0,17	0,00	0,75	0,80	0,60
Behandlung	0,45	0,19	0,07	0,06	0,05	0,05	0,04	0,00	0,04	0,32	0,28
Warteraum	0,72	0,67	0,45	0,41	0,41	0,53	0,33	0,34	0,75	0,56	0,73

A.2 Messergebnisse der Kleingeräte

Die Ergebnisse werden in tabellarischer Form zusammengefasst, die die folgenden Punkte enthält:

- $N_{\text{Geräte}}$: Gesamtanzahl der vermessenen Geräte dieses Typs im untersuchten Krankenhaus/im Vergleichskrankenhaus
- $p_{\text{Gesamtgeräte}}$: Anteil der vermessenen Geräte im untersuchten Krankenhaus an der Gesamtzahl dieser Geräte in diesem Krankenhaus. Die Gesamtzahl der Geräte wird mit Hilfe von Gerätelisten und den über die Raumbeggehungen ermittelten mittleren Gerätezahlen pro Raumtyp bestimmt, ist jedoch dennoch nur ein Schätzwert.
- N_{Tage} : Anzahl der einzelnen Tagesmessungen, die vorliegen. Angabe der Gesamtzahl und in Klammern die Zusammensetzung aus Wochentagen und Wochenendtagen. Eine Unterscheidung zwischen Samstag und Sonntag oder der einzelnen Wochentage untereinander erfolgt nicht.
- P_{Betrieb} : Mittlere Betriebsleistung der Geräte sowie deren Standardabweichung.

$$P_{\text{Betrieb}} = \frac{1}{N_{\text{Geräte}}} \sum_{i=1}^{N_{\text{Geräte}}} P_{\text{Betrieb, Gerät } i} \quad (\text{A.1})$$

- P_{max} : Mittlere maximale Leistung der Geräte sowie deren Standardabweichung.

$$P_{\text{max}} = \frac{1}{N_{\text{Geräte}}} \sum_{i=1}^{N_{\text{Geräte}}} P_{\text{max, Gerät } i} \quad (\text{A.2})$$

- P_{Standby} : Mittlere Leistung im Standbybetrieb sowie deren Standardabweichung

$$P_{\text{Standby}} = \frac{1}{N_{\text{Geräte}}} \sum_{i=1}^{N_{\text{Geräte}}} P_{\text{Standby, Gerät } i} \quad (\text{A.3})$$

- E : Mittlerer Energieverbrauch des Geräts pro Tag. Hier erfolgt die Mittelung nicht über die einzelnen Geräte, sondern, da diese Größe nutzungsabhängig ist, über alle einzelnen vermessenen Tage der verschiedenen Geräte.

$$E = \frac{1}{N_{\text{Tage}}} \sum_{i=1}^{N_{\text{Geräte}}} \sum_{j=1}^{N_{\text{Tage}}} E_{\text{Tag } i, \text{ Gerät } j} \quad (\text{A.4})$$

- p_{Standby} : Anteil des Energieverbrauches, während das Gerät im Standby-Betrieb ist, am Gesamtenergieverbrauch des Gerätes

- n_{Zyklen} : Anzahl der Zyklen (z.B. ein Kaffeekochvorgang oder ein Waschgang in einer Steckbeckenspüle), die pro Tag durchgeführt werden. Diese Kennzahl ist nur für diejenigen Geräte sinnvoll, die klar definierte Nutzungszyklen haben. Es wird der Median aller Tagesmessungen gebildet.
- E_{Zyklus} : Mittlerer Energiebedarf pro Nutzungszyklus.

$$E_{\text{Zyklus}} = \frac{1}{N_{\text{Gerät}}} \sum_{i=1}^{N_{\text{Gerät}}} \frac{E_{\text{Gerät } i}}{n_{\text{Zyklus, Gerät } i}} \quad (\text{A.5})$$

- t_{Nutzung} : Mittlere Nutzungsdauer pro Tag. Diese Kennzahl wird für Geräte berechnet, die keinen definierten Nutzungszyklus aufweisen, sondern stattdessen nutzergesteuert gestartet und beendet werden, wie dies beispielsweise bei Fernsehern der Fall ist.

$$t_{\text{Nutzung}} = \frac{1}{N_{\text{Tage}}} \sum_{j=1}^{N_{\text{Tage}}} t_{\text{Nutzung, Tag } j} \quad (\text{A.6})$$

- E_{Jahr} : Hochrechnung des Energieverbrauchs dieses Gerätetyps für das gesamte Krankenhaus über die Anzahl der Geräte dieses Typs und den mittleren Verbrauch an Wochentagen und Wochenenden.

Wasserkocher Die Wasserkocher befinden sich in den Teeküchen und werden dort hauptsächlich zum Zubereiten von Tee verwendet. Die Leistungsdaten der einzelnen vermessenen Geräte sind untereinander recht ähnlich. Es gibt keinen Standby-Betrieb, die Geräte sind entweder eingeschaltet und laufen mit annähernder maximaler Leistung oder weisen keinen Verbrauch auf. Die Nutzung der einzelnen Geräte zeigt deutliche Abweichungen, wobei ein einzelnes Gerät an den unterschiedlichen Tagen ähnlich häufig und zu ähnlichen Zeiten genutzt wird. Eine geringfügig seltenere Nutzung am Wochenende ist feststellbar. Der Energieverbrauch pro Wasserkochvorgang ist uneinheitlich bei den verschiedenen Geräten, da die Dauer des Vorgangs mit der erhitzten Wassermenge variiert.

Tabelle A.2: Messergebnisse Wasserkocher

$N_{\text{Geräte}}$	5/1
$p_{\text{Gesamtgeräte}}$	0,1
N_{Tage}	48 (36+12)
P_{Betrieb}	$1663 \pm 105 \text{ W}$
P_{max}	$1780 \pm 76 \text{ W}$
P_{Standby}	-
$E_{\text{Mo-Fr}}$	$1,23 \pm 0,91 \text{ kWh}$
$E_{\text{Sa-So}}$	$1,03 \pm 0,71 \text{ kWh}$
p_{Standby}	0 %
$n_{\text{Zyklen, Mo-Fr}}$	8 Zyklen/d
$n_{\text{Zyklen, Sa-So}}$	7 Zyklen/d
E_{Zyklus}	$170 \pm 108 \text{ Wh}$
E_{Jahr}	21 MWh

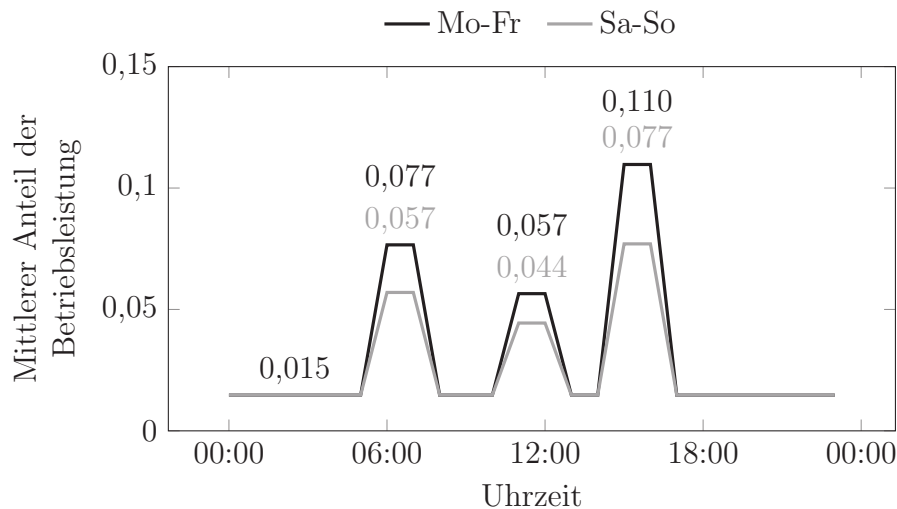


Abbildung A.1: Normiertes Profil der Wasserkocher

Kaffeemaschine Die Kaffeemaschinen befinden sich in den Teeküchen. Die Leistungsdaten der einzelnen vermessenen Geräte sind untereinander recht ähnlich. Es gibt keinen Standby-Betrieb, die Geräte sind entweder eingeschaltet und laufen mit annähernd maximaler Leistung oder weisen keinen Verbrauch auf. Einzelne Kaffeemaschinen werden jeden Tag zu ähnlichen Zeiten benutzt. Insgesamt sind zwischen 3 und 15 Kaffeekochvorgänge pro Tag zu beobachten, wobei der Median bei 7 liegt. Der Energieverbrauch pro Wasserkochvorgang ist uneinheitlich bei den verschiedenen Geräten, da die Dauer des Vorgangs mit der erhitzten Wassermenge variiert.

Tabelle A.3: Messergebnisse Kaffeemaschine

$N_{\text{Geräte}}$	5/1
$P_{\text{Gesamtgeräte}}$	0,06
N_{Tage}	40 (30+10)
P_{Betrieb}	1355 ± 316 W
P_{max}	1981 ± 855 W
P_{Standby}	-
$E_{\text{Mo-Fr}}$	$0,78 \pm 0,55$ kWh
$E_{\text{Sa-So}}$	$0,64 \pm 0,46$ kWh
P_{Standby}	0 %
$n_{\text{Zyklen, Mo-Fr}}$	7 Zyklen/d
$n_{\text{Zyklen, Sa-So}}$	7 Zyklen/d
E_{Zyklus}	129 ± 96 Wh
E_{Jahr}	22 MWh

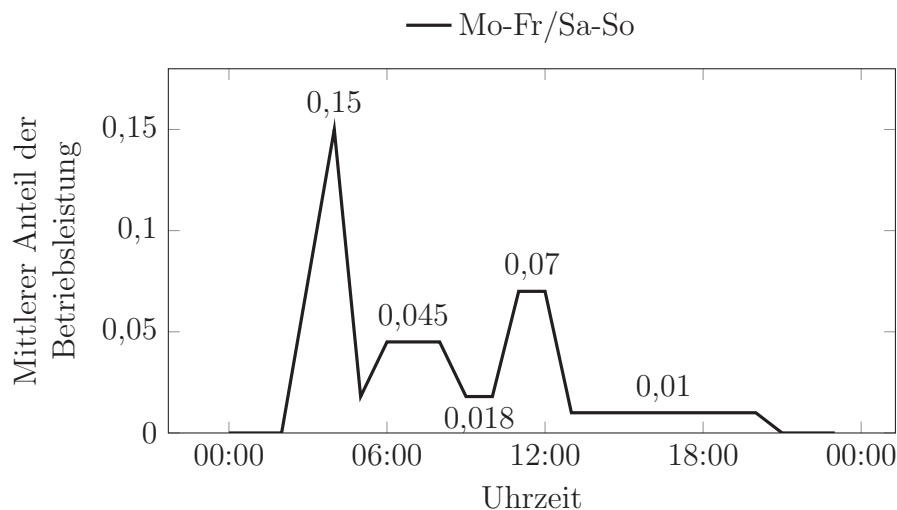


Abbildung A.2: Normiertes Profil der Kaffeemaschinen

Mikrowellen Die Mikrowellen wurden etwas weniger häufig genutzt als die bisher betrachteten Küchengeräte, zudem war die Nutzungszeit, die häufig nur ein oder zwei Minuten betrug, geringer. Somit hat der Energieverbrauch der Mikrowellen im Vergleich zu den anderen Küchengeräten nur einen untergeordneten Anteil am Gesamtverbrauch der Küchen. Auch auf den gesamten Lastverlauf der Küchengeräte ist der Einfluss der Mikrowellen gering. Die einzelnen Geräte werden jeden Tag zu ähnlichen Zeiten eingesetzt, die jedoch von Gerät zu Gerät variieren, ebenso wie die Nutzungshäufigkeiten. Da der Gesamtverbrauch jedoch gering ist, wird eine Fehlerauswirkung auf das gesamte Profil der Teeküchen als gering angesehen.

Tabelle A.4: Messergebnisse Mikrowellen

$N_{\text{Geräte}}$	4/1
$p_{\text{Gesamtgeräte}}$	0,1
N_{Tage}	39 (29+10)
P_{Betrieb}	$1180 \pm 88 \text{ W}$
P_{max}	$1221 \pm 100 \text{ W}$
P_{Standby}	-
$E_{\text{Mo-Fr}}$	$0,09 \pm 0,07 \text{ kWh}$
$E_{\text{Sa-So}}$	$0,04 \pm 0,04 \text{ kWh}$
p_{Standby}	0 %
$n_{\text{Zyklen, Mo-Fr}}$	4 Zyklen/d
$n_{\text{Zyklen, Sa-So}}$	1,5 Zyklen/d
E_{Zyklus}	$22 \pm 14 \text{ Wh}$
E_{Jahr}	1 MWh

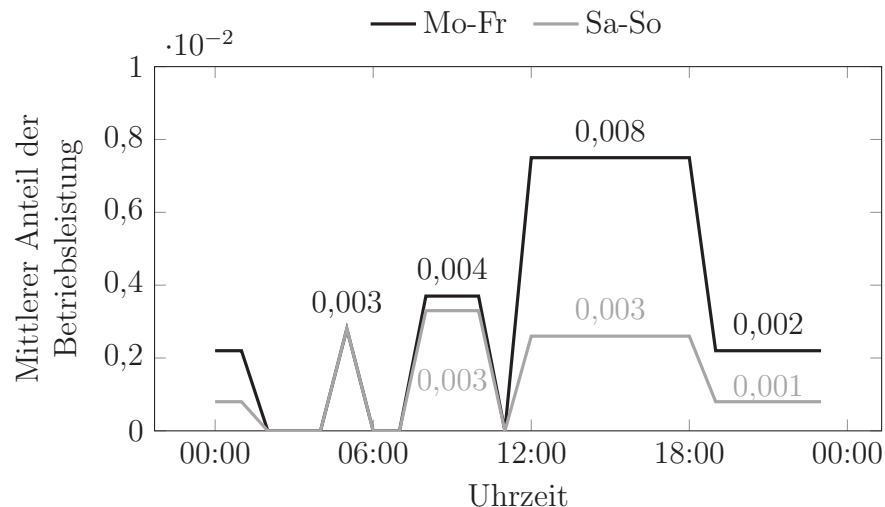


Abbildung A.3: Normiertes Profil der Mikrowellen

Computer Dienstzimmer Beide Messungen eines Computers im Dienstzimmer weisen sehr unterschiedliche Leistungsdaten auf, sodass diese in der nachfolgenden Tabelle nicht im Mittel, sondern einzeln aufgeführt werden. Die Nutzung ist jedoch sehr ähnlich, da beide Computer fast rund um die Uhr im Betrieb waren. Ein Ausschalten erfolgte bei beiden Computern nur an wenigen Tagen und dann auch nur für wenige Stunden, sodass eine Betriebszeit von durchschnittlich 23,2 h pro Tag resultiert.

Tabelle A.5: Messergebnisse Computer Dienstzimmer

$N_{\text{Geräte}}$	1/1
$P_{\text{Gesamtgeräte}}$	0,07
N_{Tage}	17 (13+4)
P_{Betrieb}	29 W/12 W
P_{max}	51 W/13 W
P_{Standby}	-
$E_{\text{Mo-Fr}}$	0,69 kWh/0,27 kWh
$E_{\text{Sa-So}}$	0,63 kWh/0,27 kWh
p_{Standby}	0 %
$t_{\text{Nutzung, Mo-Fr}}$	23,7 h/d
$t_{\text{Nutzung, Sa-So}}$	22,7 h/d
E_{Jahr}	7,4 MWh

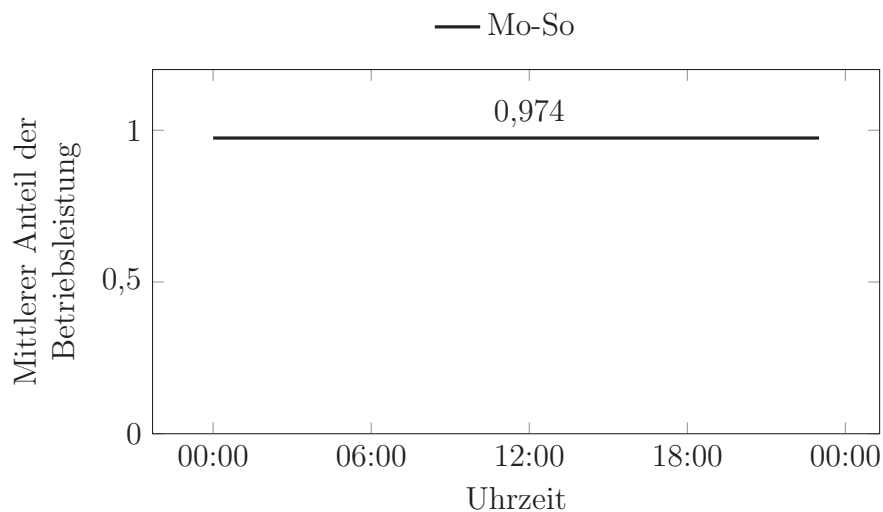


Abbildung A.4: Normiertes Profil der Computer im Dienstzimmer

Monitor Dienstzimmer Während die Computer im Dienstzimmer rund um die Uhr eingeschaltet sind, schalten die Monitore bei Nichtnutzung von selbst in den Standby-Zustand. Somit lässt sich hier die Gerätenutzung deutlicher ablesen als bei den Computern. Im Vergleichskrankenhaus fand dieses automatische Abschalten nicht statt, sodass der Verbrauch hier mit 0,45 kWh pro Tag deutlich höher ist, als bei den Messungen in dem anderen Krankenhaus. Insgesamt sind die Monitore 13,2 h pro Tag im Standby-Zustand. Da die Standby-Leistung jedoch sehr gering ist, ist der Anteil des Verbrauches, der während des Standbybetriebs anfällt mit 13 % ebenfalls recht gering. Die Leistungswerte der Monitore sind vergleichbar und liegen bei 21,3 W. Die Betriebsleistung ist recht konstant und die maximale Leistung ist kaum höher als die durchschnittliche Betriebsleistung.

Tabelle A.6: Messergebnisse Monitor Dienstzimmer

$N_{\text{Geräte}}$	3/1
$P_{\text{Gesamtgeräte}}$	0,2
N_{Tage}	26(18+8)
P_{Betrieb}	$21,3 \pm 1,5 \text{ W}$
P_{max}	$22,5 \pm 1,9 \text{ W}$
P_{Standby}	$0,59 \pm 0,12 \text{ W}$
$E_{\text{Mo-Fr}}$	$0,28 \pm 0,11 \text{ kWh}$
$E_{\text{Sa-So}}$	$0,17 \pm 0,18 \text{ kWh}$
P_{Standby}	3 %
$t_{\text{Nutzung, Mo-Fr}}$	13,6 h/d
$t_{\text{Nutzung, Sa-So}}$	8,0 h/d
E_{Jahr}	1,6 MWh

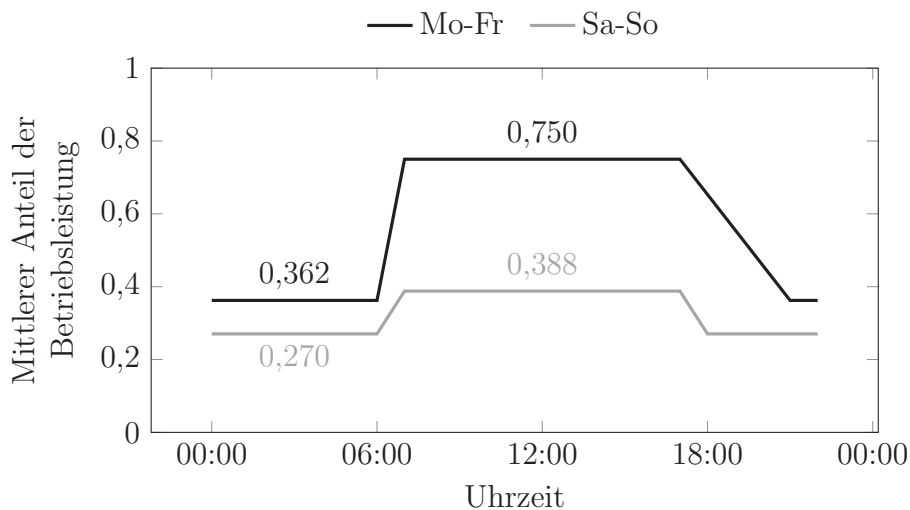


Abbildung A.5: Normiertes Profil der Monitore im Dienstzimmer

Drucker Dienstzimmer Bei den in den Schwesternzimmern verwendeten Druckern handelt es sich um Multifunktions-Laserdrucker. Die Hauptnutzungszeit der Drucker liegt zwischen 8:00 und 16:00 Uhr, aber auch nachts und am Wochenende sind die Drucker in Betrieb. Pro Tag werden zwischen 20 und 30 Druckvorgänge durchgeführt. Die einzelnen Drucker haben vergleichbare Standby-Leistungen von 7 bis 30 W. Bei zwei der Drucker ist zu erkennen, dass diese nach Benutzung zunächst in einem betriebsbereiten Zustand bei 40 W verbleiben, bevor sie nach einiger Zeit ohne Nutzung auf eine geringere Leistung umschalten. Dementsprechend hoch ist der Anteil der Energie, die im Standby-Zustand verbraucht wird.

Tabelle A.7: Messergebnisse Drucker Dienstzimmer

$N_{\text{Geräte}}$	3/1
$p_{\text{Gesamtgeräte}}$	0,15
N_{Tage}	28(21+7)
P_{Betrieb}	$137 \pm 40 \text{ W}$
P_{max}	$521 \pm 91 \text{ W}$
P_{Standby}	$14,6 \pm 6,9 \text{ W}$
$E_{\text{Mo-Fr}}$	$0,57 \pm 0,29 \text{ kWh}$
$E_{\text{Sa-So}}$	$0,42 \pm 0,08 \text{ kWh}$
p_{Standby}	64 %
$t_{\text{Nutzung, Mo-Fr}}$	2 h/d
$t_{\text{Nutzung, Sa-So}}$	1 h/d
$n_{\text{Zyklen, Mo-Fr}}$	62 Zyklen/d
$n_{\text{Zyklen, Sa-So}}$	27 Zyklen/d
E_{Jahr}	3,8 MWh

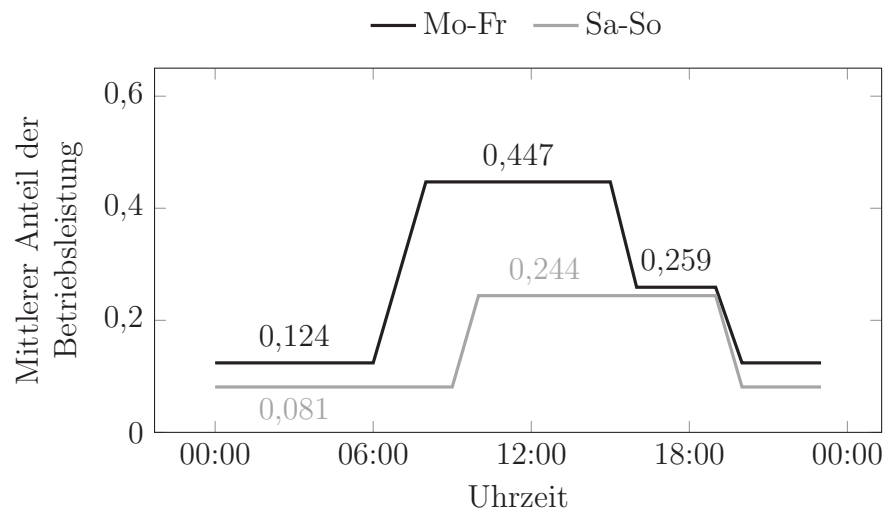


Abbildung A.6: Normiertes Profil der Drucker im Dienstzimmer

Computer Büro Der Raumtyp Büro zeichnet sich dadurch aus, dass feste Arbeitszeiten vorherrschen und am Wochenende und während der Nacht in der Regel nicht gearbeitet wird. Dennoch wurden nur drei der vermessenen sechs Computer unter der Woche nach Arbeitsende ausgeschaltet. Somit resultiert eine mittlere Betriebszeit von 13 h pro Tag. Am Freitagabend wurden jedoch alle Computer ausnahmslos heruntergefahren und verblieben am Wochenende vollständig ausgeschaltet. Lediglich ein Computer zeigte eine Nutzung am Samstag für eine bzw. vier Stunden, anschließend wurde der Computer jedoch wieder heruntergefahren. Die mittlere Betriebsleistung der Computer schwankte zwischen 20 und 40 W. Ein geringer Verbrauch von etwa 1 W ist auch im ausgeschalteten Zustand noch zu verzeichnen.

Tabelle A.8: Messergebnisse Computer Büro

$N_{\text{Geräte}}$	6/0
$P_{\text{Gesamtgeräte}}$	0,022
N_{Tage}	62 (40+22)
P_{Betrieb}	$27 \pm 6 \text{ W}$
P_{max}	$46 \pm 4 \text{ W}$
P_{Standby}	$1,09 \pm 0,20 \text{ W}$
$E_{\text{Mo-Fr}}$	$0,38 \pm 0,26 \text{ kWh}$
$E_{\text{Sa-So}}$	$0,03 \pm 0,08 \text{ kWh}$
P_{Standby}	6 %
$t_{\text{Nutzung, Mo-Fr}}$	13 h/d
$t_{\text{Nutzung, Sa-So}}$	0,2 h/d
E_{Jahr}	27 MWh

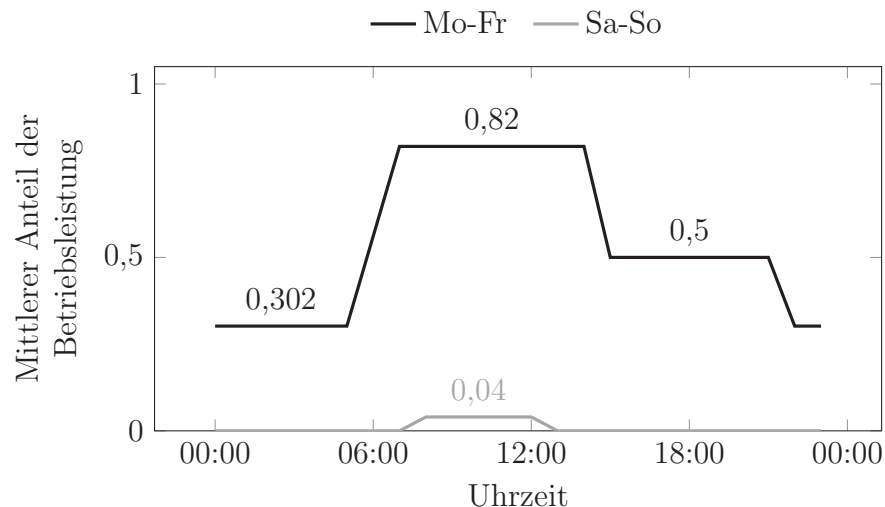


Abbildung A.7: Normiertes Profil der Computer im Büro

Monitor Büro Analog zum Schwesternzimmer lässt sich bei den Monitoren die Nutzungszeit deutlicher ablesen, als bei den Computern, da die Monitore bei Nicht-Nutzung in einen Standby-Betrieb schalten. Der Arbeitszeitbeginn liegt in den betrachteten Büroräumen zwischen 6:00 und 7:00 Uhr und das Arbeitsende zwischen 15:30 und 18:00 Uhr. In drei der betrachteten Büroräume blieb der Monitor während des Großteils der gesamten Arbeitszeit eingeschaltet, während in den anderen Räumen Perioden zu erkennen sind, während derer der Monitor ausgeschaltet war.

Tabelle A.9: Messergebnisse Monitor Büro

$N_{\text{Geräte}}$	5/0
$p_{\text{Gesamtgeräte}}$	0,01
N_{Tage}	44 (28+16)
P_{Betrieb}	$21,0 \pm 1,4 \text{ W}$
P_{max}	$22,8 \pm 0,5 \text{ W}$
P_{Standby}	$0,41 \pm 0,35 \text{ W}$
$E_{\text{Mo-Fr}}$	$0,13 \pm 0,05 \text{ kWh}$
$E_{\text{Sa-So}}$	$0,01 \pm 0,01 \text{ kWh}$
p_{Standby}	7 %
$t_{\text{Nutzung, Mo-Fr}}$	5,9 h/d
$t_{\text{Nutzung, Sa-So}}$	0,15 h/d
E_{Jahr}	10 MWh

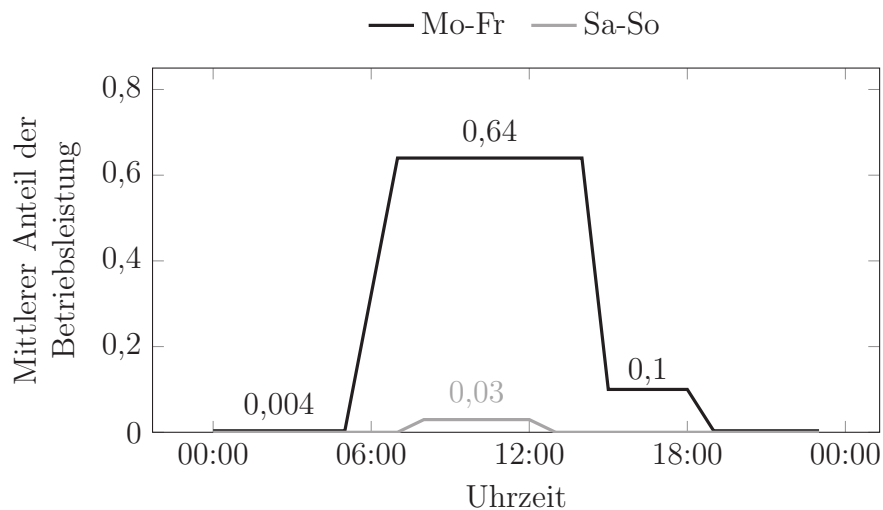


Abbildung A.8: Normiertes Profil der Monitore in Büroräumen

Drucker Büro Im Gegensatz zu den Druckern in den Schwesternzimmern wird in den Büros nachts und am Wochenende nicht gedruckt. Da die Anzahl der Druckvorgänge pro Tag von der im jeweiligen Büro ausgeübten Tätigkeit abhängt, variiert diese Zahl zwischen den Büros. In zwei Büros wurden zwischen 8 und 15 Druckvorgänge pro Tag ausgeführt, im dritten zwischen 30 und 50. Die Nutzungszeit variiert leicht mit den Büroarbeitszeiten und liegt zwischen 5:00 und 18:00 Uhr. Die Leistungsdaten der Drucker sind vergleichbar mit denen in den Dienstzimmern.

Tabelle A.10: Messergebnisse Drucker Büro

$N_{\text{Geräte}}$	3/0
$p_{\text{Gesamtgeräte}}$	0,029
N_{Tage}	22(14+8)
P_{Betrieb}	$147 \pm 41 \text{ W}$
P_{max}	$433 \pm 421 \text{ W}$
P_{Standby}	$13,7 \pm 3,2 \text{ W}$
$E_{\text{Mo-Fr}}$	$0,47 \pm 0,14 \text{ kWh}$
$E_{\text{Sa-So}}$	$0,39 \pm 0,18 \text{ kWh}$
$n_{\text{Zyklen, Mo-Fr}}$	21 Zyklen/d
$n_{\text{Zyklen, Sa-So}}$	0 Zyklen/d
p_{Standby}	77 %
$t_{\text{Nutzung, Mo-Fr}}$	1 h/d
$t_{\text{Nutzung, Sa-So}}$	0 h/d
E_{Jahr}	16 MWh

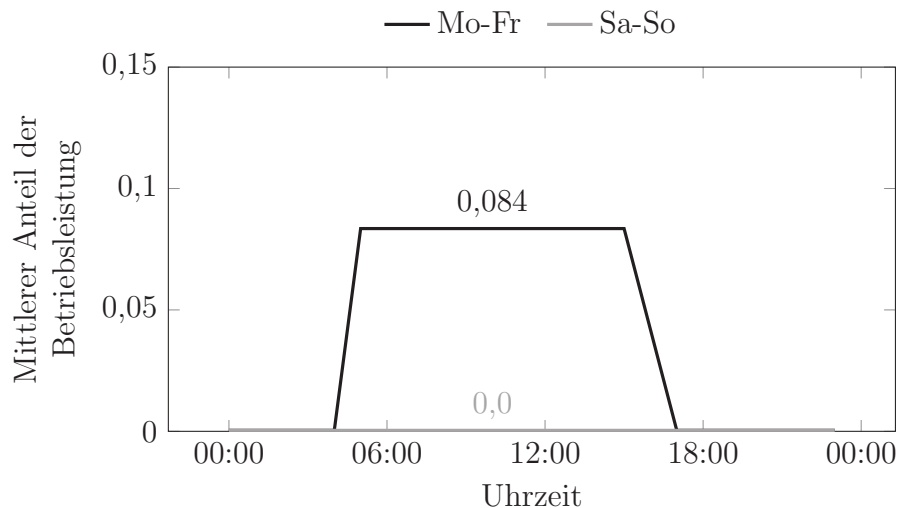


Abbildung A.9: Normiertes Profil der Drucker in Büroräumen

Kaffeemaschine Büro In vielen Büroräumen stehen Kaffeemaschinen, mit denen die Nutzer sich einen Kaffee direkt im Büro zubereiten. Die Anzahl der zubereiteten Getränke pro Tag variiert mit den Gewohnheiten der Nutzer und reicht in den betrachteten drei Büroräumen von einem bis drei Nutzungszyklen pro Tag. Der Energieverbrauch pro Kochvorgang variiert zwischen 70 und 100 Wh.

Tabelle A.11: Messergebnisse Kaffeemaschine Büro

$N_{\text{Geräte}}$	3/0
$p_{\text{Gesamtgeräte}}$	0,09
N_{Tage}	27(17+10)
P_{Betrieb}	$676 \pm 371 \text{ W}$
P_{max}	$1053 \pm 532 \text{ W}$
P_{Standby}	$1,2 \pm 1,0 \text{ W}$
$E_{\text{Mo-Fr}}$	$0,28 \pm 0,17 \text{ kWh}$
$E_{\text{Sa-So}}$	$0,01 \pm 0,00 \text{ kWh}$
p_{Standby}	8 %
$n_{\text{Zyklen, Mo-Fr}}$	21 Zyklen/d
$n_{\text{Zyklen, Sa-So}}$	0 Zyklen/d
E_{Zyklus}	$83,00 \pm 1,40 \text{ Wh}$
E_{Jahr}	2 MWh

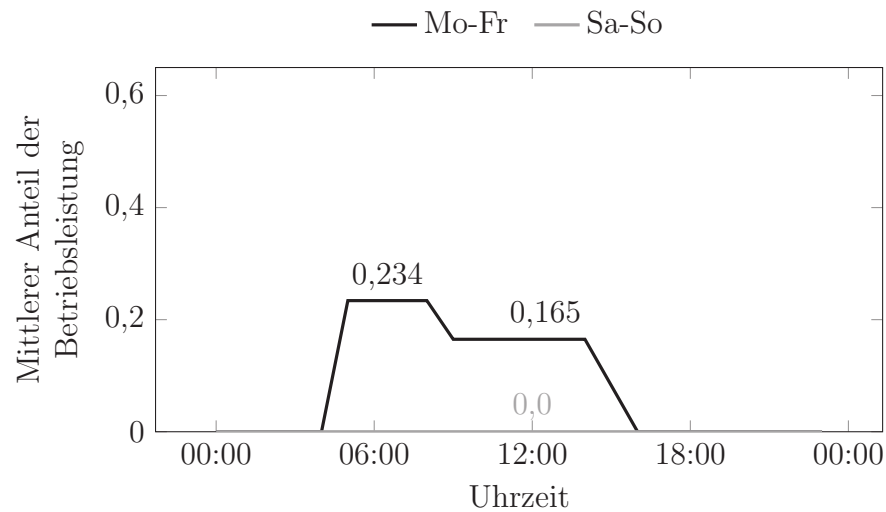


Abbildung A.10: Normiertes Profil der Kaffeemaschinen in Büroräumen

Computer Arztzimmer Ein Arztzimmer wird jeweils von mehreren Ärzten zu unregelmäßigen Zeiten zum Schreiben von Berichten und Briefen genutzt. Damit unterscheiden sich die Arztzimmer von den Büroräumen, die von einer einzelnen Person mehr oder weniger durchgängig genutzt werden, über die Anzahl der Computerarbeitsplätze und die Arbeitszeiten. Zwei der drei untersuchten Computer waren unter der Woche rund um die Uhr eingeschaltet, der dritte jeweils nur vormittags. Einer der drei Computer wurde auch am Wochenende nicht ausgeschaltet. Die Leistungsdaten sind vergleichbar mit den Computern in den Büroräumen.

Tabelle A.12: Messergebnisse Computer Arztzimmer

$N_{\text{Geräte}}$	3/0
$P_{\text{Gesamtgeräte}}$	0,03
N_{Tage}	29 (19+10)
P_{Betrieb}	$29 \pm 3 \text{ W}$
P_{max}	$52 \pm 6 \text{ W}$
P_{Standby}	$1,00 \pm 0,95 \text{ W}$
$E_{\text{Mo-Fr}}$	$0,48 \pm 0,31 \text{ kWh}$
$E_{\text{Sa-So}}$	$0,09 \pm 0,18 \text{ kWh}$
P_{Standby}	3 %
$t_{\text{Nutzung, Mo-Fr}}$	16 h/d
$t_{\text{Nutzung, Sa-So}}$	3 h/d
E_{Jahr}	13 MWh

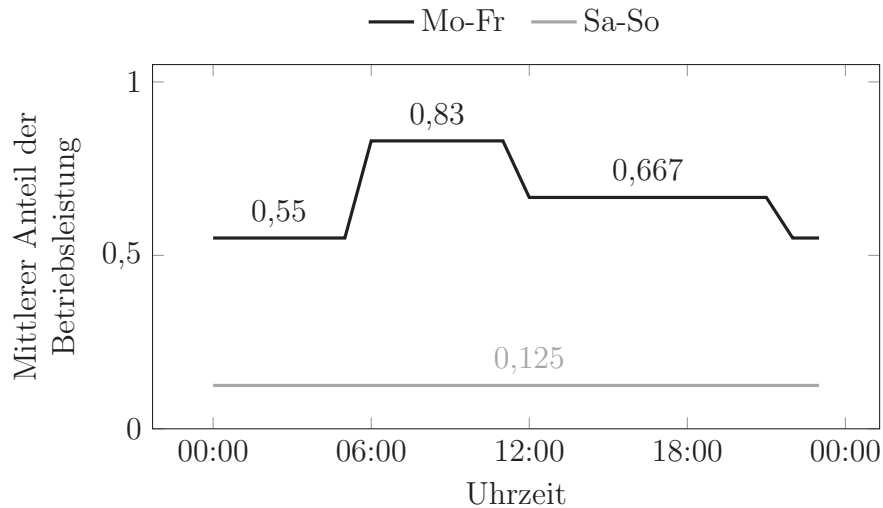


Abbildung A.11: Normiertes Profil der Computer in Arztzimmern

Monitor Arztzimmer Die Leistungsdaten und auch der Energieverbrauch pro Tag sind vergleichbar mit dem Monitor im Büro. Jedoch weicht die Form des Lastprofils von dem des Büroraums ab, da sich die Arbeitszeiten unterscheiden.

Tabelle A.13: Messergebnisse Monitor Arztzimmer

$N_{\text{Geräte}}$	3/0
$P_{\text{Gesamtgeräte}}$	0,03
N_{Tage}	29 (19+10)
P_{Betrieb}	$23,4 \pm 0,8 \text{ W}$
P_{max}	$24,4 \pm 0,7 \text{ W}$
P_{Standby}	$0,5 \pm 0,1 \text{ W}$
$E_{\text{Mo-Fr}}$	$0,10 \pm 0,07 \text{ kWh}$
$E_{\text{Sa-So}}$	$0,01 \pm 0,01 \text{ kWh}$
P_{Standby}	13 %
$t_{\text{Nutzung, Mo-Fr}}$	4 h/d
$t_{\text{Nutzung, Sa-So}}$	0,2 h/d
E_{Jahr}	3 MWh

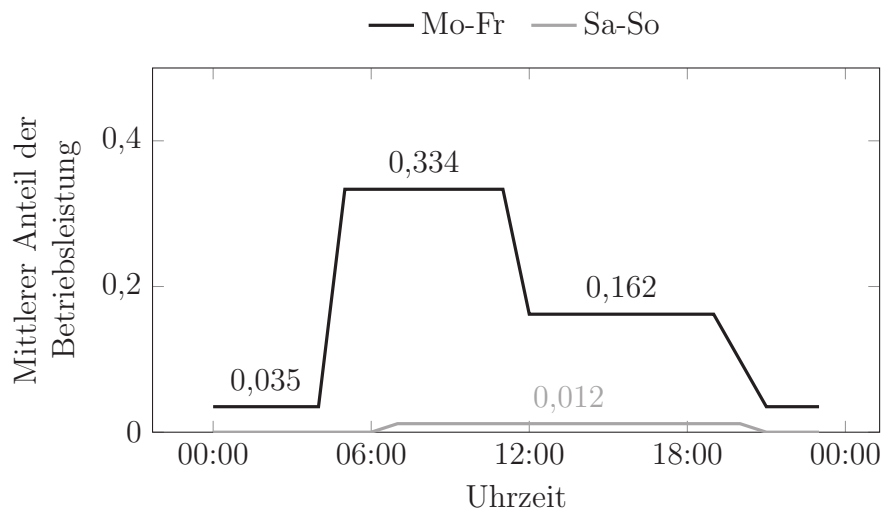


Abbildung A.12: Normiertes Profil der Monitore in Arztzimmern

Monitor Behandlungsraum In beiden Behandlungsräumen, in denen die Monitore vermessen wurden, waren diese mehrmals während des Tages jeweils nur für einige Minuten eingeschaltet. Da der Monitor bei Nicht-Nutzung wieder in den Standby-Zustand zurückschaltet, resultieren eine geringe Betriebszeit und ein insgesamt niedriger Energieverbrauch.

Tabelle A.14: Messergebnisse Monitor Behandlungsraum

$N_{\text{Geräte}}$	1/1
$P_{\text{Gesamtgeräte}}$	0,02
N_{Tage}	16 (10+6)
P_{Betrieb}	$25 \pm 3 \text{ W}$
P_{max}	$34 \pm 11 \text{ W}$
P_{Standby}	$0,50 \pm 0,07 \text{ W}$
$E_{\text{Mo-Fr}}$	$0,04 \pm 0,02 \text{ kWh}$
$E_{\text{Sa-So}}$	$0,01 \pm 0,00 \text{ kWh}$
p_{Standby}	37 %
$t_{\text{Nutzung, Mo-Fr}}$	1,1 h/d
$t_{\text{Nutzung, Sa-So}}$	0,07 h/d
E_{Jahr}	0,5 MWh

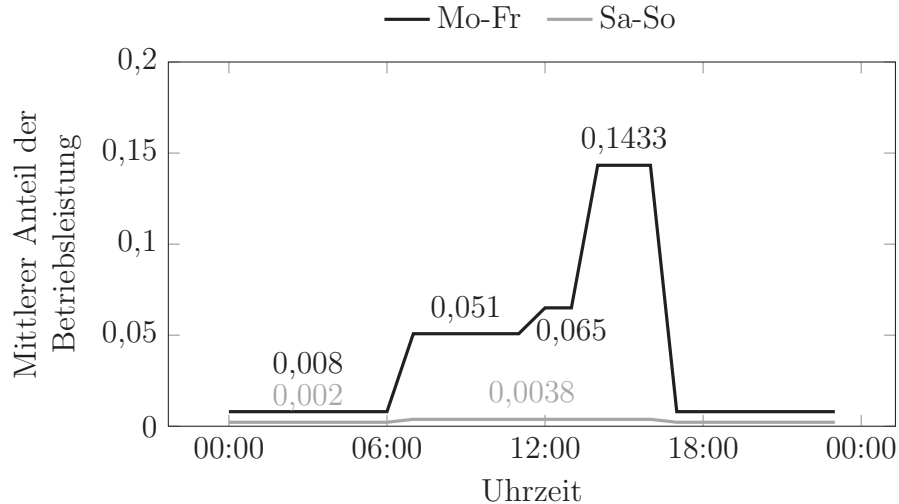


Abbildung A.13: Normiertes Profil der Monitore in Behandlungsräumen

Kopierer Die Kopierer werden, im Gegensatz zu den kleineren Druckern in den Büroräumen, nicht nur von den Nutzern eines einzelnen Büros, sondern von einem größeren Personenkreis genutzt und stehen in einem eigenen Kopierraum. Pro Tag wurden 20 bis 70 Druckvorgänge durchgeführt. Die Betriebsleistung lag im Schnitt bei 250 W, es wurden jedoch Lastspitzen bis 900 W erreicht. Die Standbyleistung trägt mit 30 W bzw. 80 W ebenfalls erheblich zum Energieverbrauch des Kopierers bei. Am Wochenende wurden die Kopierer mit einer Ausnahme nicht benutzt, verblieben aber dennoch eingeschaltet.

Tabelle A.15: Messergebnisse Kopierer

$N_{\text{Geräte}}$	2/0
$p_{\text{Gesamtgeräte}}$	0,4
N_{Tage}	16 (12+4)
P_{Betrieb}	$220 \pm 47 \text{ W}$
P_{max}	$817 \pm 229 \text{ W}$
P_{Standby}	$57 \pm 31 \text{ W}$
$E_{\text{Mo-Fr}}$	$1,97 \pm 0,61 \text{ kWh}$
$E_{\text{Sa-So}}$	$1,42 \pm 0,79 \text{ kWh}$
p_{Standby}	65 %
$n_{\text{Zyklen, Mo-Fr}}$	38 Zyklen/d
$n_{\text{Zyklen, Sa-So}}$	0,5 Zyklen/d
E_{Zyklus}	$29,0 \pm 1,2 \text{ Wh}$
E_{Jahr}	3 MWh

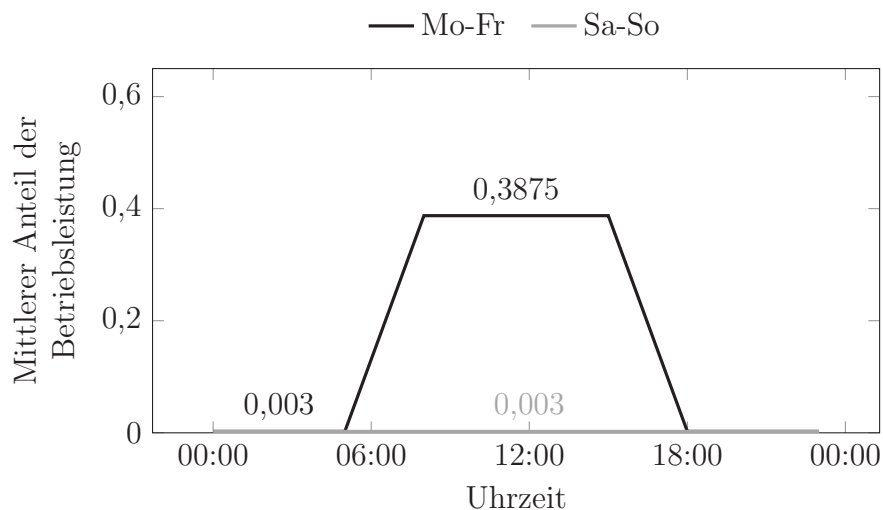


Abbildung A.14: Normiertes Profil der Kopierer

Steckbeckenspüle Die Steckbeckenspülen stehen in den unreinen Arbeitsräumen. Mit ihnen werden Utensilien wie Steckbecken (Bettpfannen), Urinflaschen, Nierenschalen und Waschschüsseln gereinigt und desinfiziert. Dazu sind sie je nach Station bis zu 30 Mal am Tag im Einsatz.

Tabelle A.16: Messergebnisse Steckbeckenspüle

$N_{\text{Geräte}}$	2/1
$P_{\text{Gesamtgeräte}}$	0,09
N_{Tage}	22 (16+6)
P_{Betrieb}	$1461 \pm 744 \text{ W}$
P_{max}	$2363 \pm 839 \text{ W}$
P_{Standby}	$6 \pm 1 \text{ W}$
$E_{\text{Mo-Fr}}$	$3,2 \pm 2,4 \text{ kWh}$
$E_{\text{Sa-So}}$	$3,4 \pm 4,8 \text{ kWh}$
P_{Standby}	4 %
$t_{\text{Betrieb, Mo-Fr}}$	21 h/d
$t_{\text{Betrieb, Sa-So}}$	21 h/d
E_{Jahr}	26 MWh

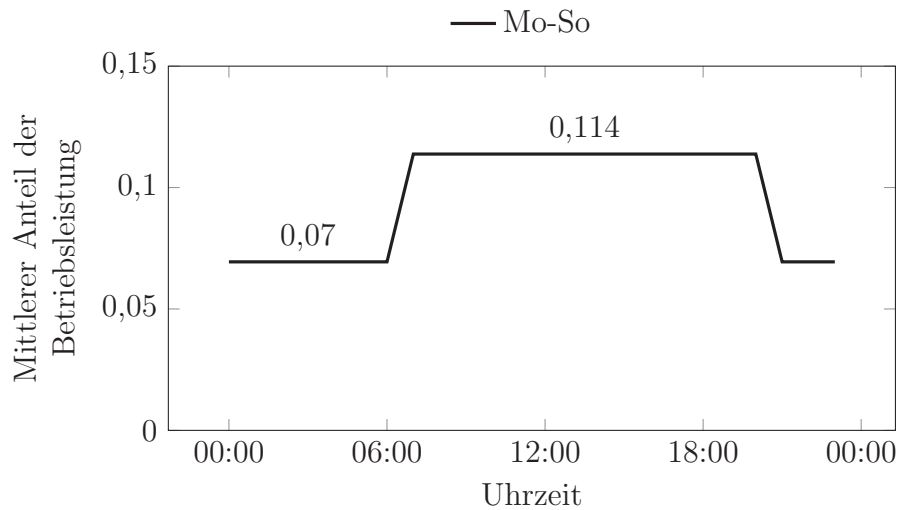


Abbildung A.15: Normiertes Profil der Steckbeckenspülen

Ultraschallgerät Zwischen den Ultraschallgeräten in beiden Krankenhäusern zeigen sich große Unterschiede. Die beiden im Krankenhaus vermessenen Ultraschallgeräte zeigten keinerlei Absenkung der Leistungsaufnahme, wenn das Gerät nicht genutzt wurde, sondern verblieben auch nachts und am Wochenende konstant in Betriebsleistung. Bei einer Nachfrage im Krankenhaus wurde erläutert, dass ein Hochfahren des Gerätes zu lange dauert, sodass es nicht ausgeschaltet wird. Jedoch scheint es auch keine automatische Leistungsreduktion bei Nichtnutzung durch ein geräteinternes Energiemanagement zu geben. Beide Geräte im Vergleichskrankenhaus wiederum zeigten zumindest während einiger Nächte eine deutliche Leistungsabsenkung auf wenige Watt. Die Betriebsleistung aller Geräte reichte von 300 bis 800 W, sodass deutlich wird, dass der Gerätetyp eine große Rolle spielt und zu erheblichen Unterschieden im Energieverbrauch führen kann.

Tabelle A.17: Messergebnisse Ultraschallgerät

$N_{\text{Geräte}}$	2/2
$P_{\text{Gesamtgeräte}}$	0,05
N_{Tage}	36 (24+12)
P_{Betrieb}	$556 \pm 174 \text{ W}$
P_{max}	$620 \pm 203 \text{ W}$
P_{Standby}	$14 \pm 6 \text{ W}$
$E_{\text{Mo-Fr}}$	$8,5 \pm 2,4 \text{ kWh}$
$E_{\text{Sa-So}}$	$6,9 \pm 4,8 \text{ kWh}$
P_{Standby}	3%
$t_{\text{Betrieb, Mo-Fr}}$	17 h/d
$t_{\text{Betrieb, Sa-So}}$	15 h/d
E_{Jahr}	103 MWh

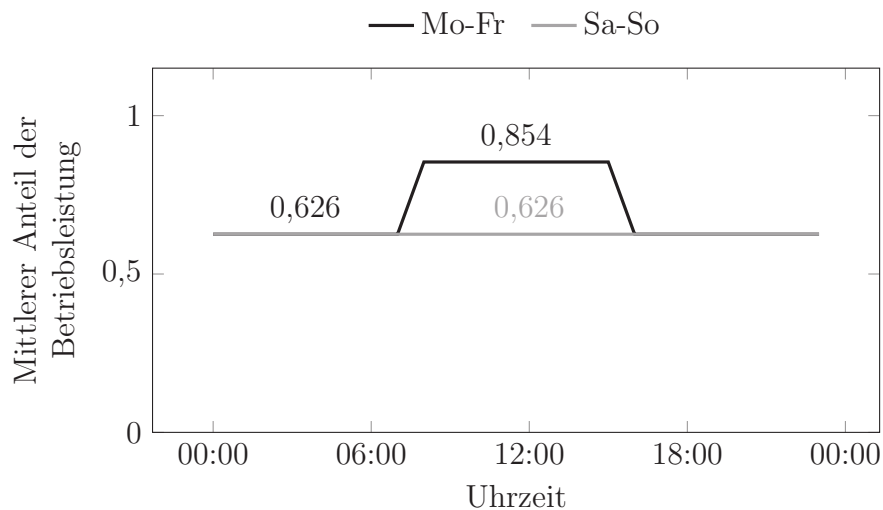


Abbildung A.16: Normiertes Profil der Ultraschallgeräte

Dialyse Die Dialyse wird im untersuchten Krankenhaus nur an den Wochentagen Montag, Mittwoch und Freitag durchgeführt. Während dieser Tage wird pro Gerät ein einzelner Dialysevorgang durchgeführt, dieser beginnt und endet jeweils zur gleichen Zeit und weist auch das gleiche Profil auf. An einem Dialysetag werden 3,5 kWh elektrische Energie verbraucht und die Geräte sind 6 h in Betrieb. Für die Geräteprofile wird lediglich eine Unterscheidung zwischen Wochentagen und Wochenendtagen vorgenommen und die einzelnen Wochentage nicht weiter unterschieden. Somit ergibt sich für die gemittelten Wochentage ein etwas geringerer Verbrauch als an den Dialysetagen, da die Mittelung auch über die Wochentage, an denen die Dialysegeräte nicht in Betrieb sind, durchgeführt wird.

Tabelle A.18: Messergebnisse Dialysegerät

$N_{\text{Geräte}}$	2/0
$P_{\text{Gesamtgeräte}}$	0,33
N_{Tage}	14 (10+4)
P_{Betrieb}	$604 \pm 82 \text{ W}$
P_{max}	$1616 \pm 45 \text{ W}$
P_{Standby}	$8 \pm 1 \text{ W}$
$E_{\text{Mo-Fr}}$	$2,2 \pm 1,7 \text{ kWh}$
$E_{\text{Sa-So}}$	$0,19 \pm 0,02 \text{ kWh}$
P_{Standby}	10 %
$t_{\text{Betrieb, Mo-Fr}}$	3,7 h/d
$t_{\text{Betrieb, Sa-So}}$	0 h/d
E_{Jahr}	4 MWh

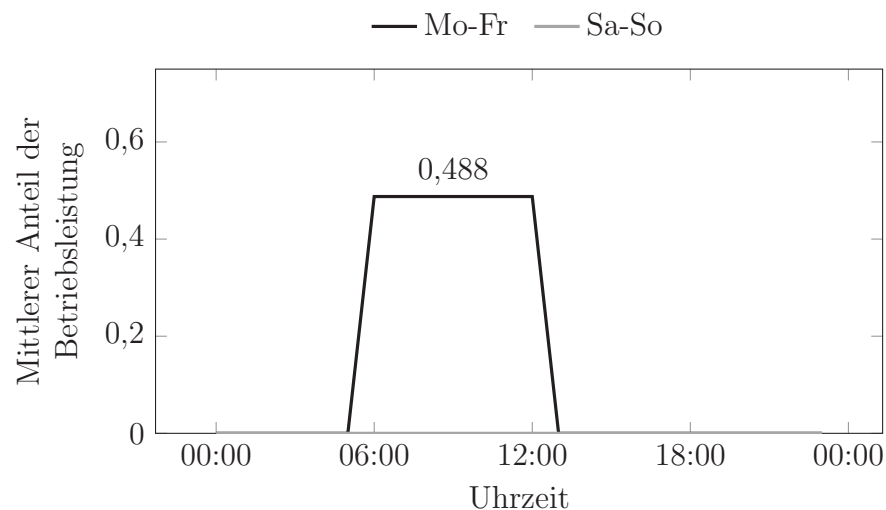


Abbildung A.17: Normiertes Profil der Dialysegeräte

A.3 Messergebnisse von Großverbrauchern

A.3.1 Medizinische Großgeräte

Neben dem in Kapitel 5.2.8 beschriebenen MRT wurden ein Computertomograph (CT), eine Kombination aus Positron-Emissionstomograph und Computertomograph (PET/CT) und ein Röntgengerät vermessen, deren Profile nachfolgend in Abbildung A.18 dargestellt sind.

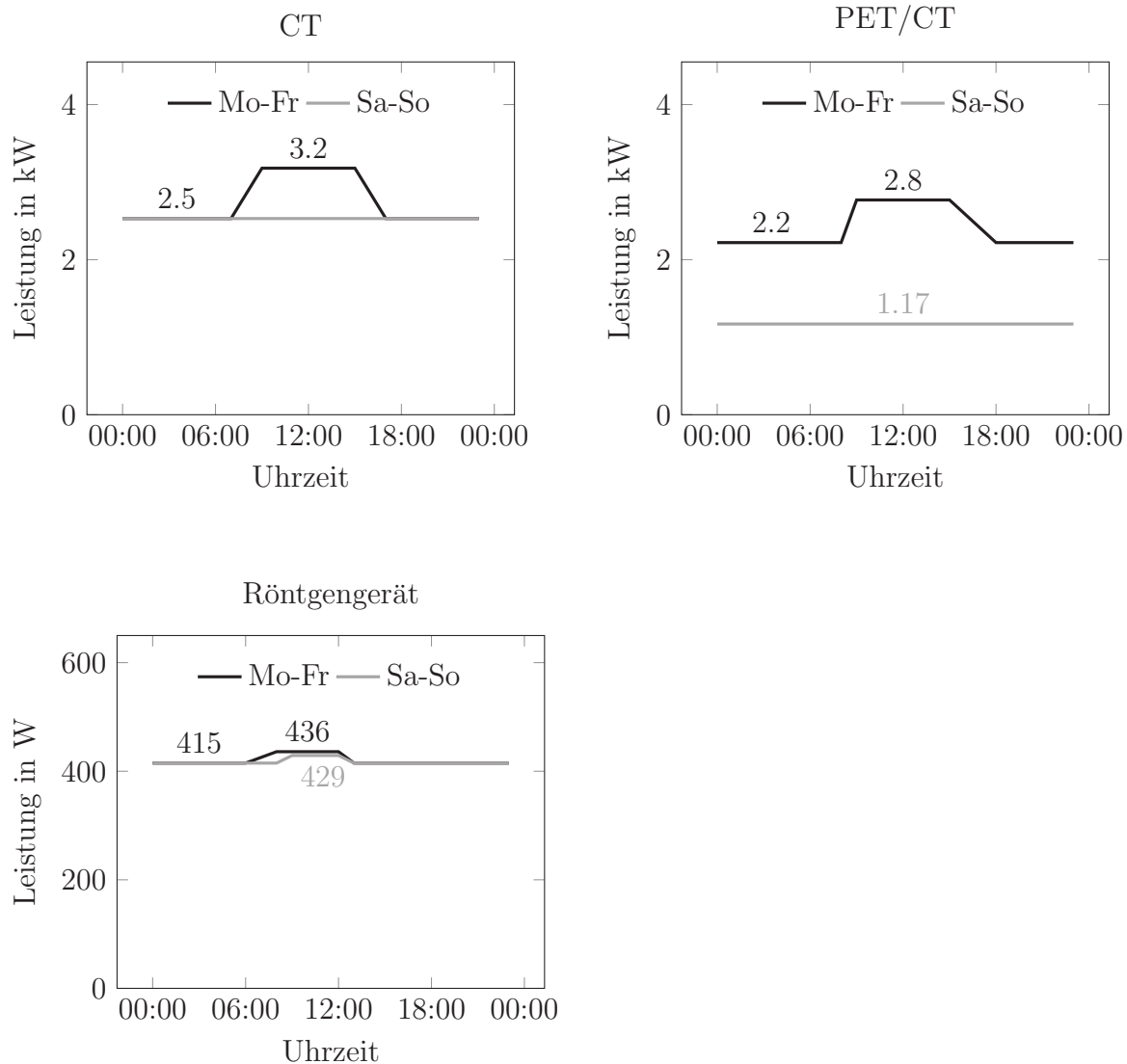


Abbildung A.18: Mittlere elektrische Profile medizinischer Großgeräte

A.3.2 Aufzüge

Um den Energieverbrauch der Aufzüge einzuschätzen, wurden zwei der insgesamt neun Aufzüge des Krankenhauses vermessen. Aufzug 1 hat eine Traglast von 450 kg, eine Förderhöhe von 18 m und wurde im Jahr 1990 komplett saniert. Aufzug 2 hat eine Traglast von 1875 kg, eine Förderhöhe von 14 m, ist frequenzgeregelt und stammt aus dem Jahr 2009. Abbildung A.19 gibt die mittleren Profile des elektrischen Verbrauches der beiden Aufzüge wieder. Der aus der Messung hochgerechnete Jahresverbrauch von Aufzug 1 liegt bei 17,7 MWh, Aufzug 2 verbraucht 7,7 MWh. Aufzug 1 weist eine deutlich höhere Grundlast als Aufzug 2 auf, die Lastspitzen sind mit bis zu 6,5 kW in einer ähnlichen Höhe wie bei Aufzug 2. Aufzug 1 war nachts mit wenigen Ausnahmen nicht in Benutzung, während bei Aufzug 2 auch nachts einige Fahrten stattfanden.

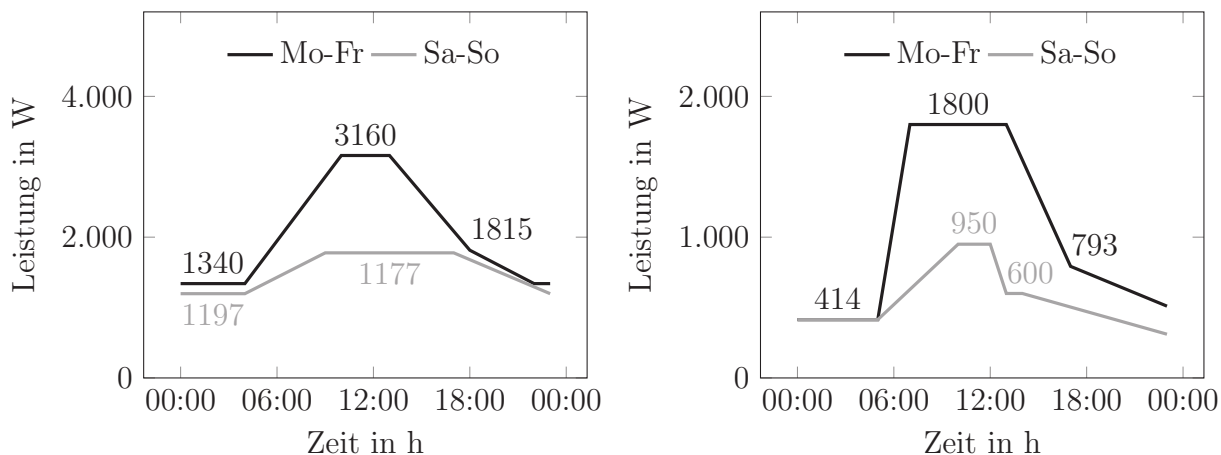


Abbildung A.19: Messergebnisse für zwei Aufzüge

A.3.3 Druckluftherzeugung

Die Druckluftherzeugung ist redundant ausgeführt, um eine Ausfallsicherheit zu garantieren. Insgesamt stehen drei Kompressoren mit jeweils 15 kW zur Verdichtung der Luft zur Verfügung. Die Aufbereitung der Luft erfolgt über zwei Kältetrockner sowie eine nachgeschaltete Aufbereitungseinheit mit einer Kombination aus verschiedenen Filtern und einer Adsorptionstrocknung. Für die unterschiedlichen Bereiche im Krankenhaus werden im Druckluftnetz zwei unterschiedliche Druckniveaus von 6 und 8 bar gehalten. Abbildung A.20 zeigt das gemessene mittlere Profil der Druckluftherzeugung. Die Grundlast der Druckluftherzeugung beträgt nachts und am Wochenende 6 bis 7 kW. Dies ist zum einen auf einen Bedarf an Druckluft für die Beatmung von Intensiv- und Notfallpatienten, zum anderen auf Verluste durch Leckagen zurückzuführen.

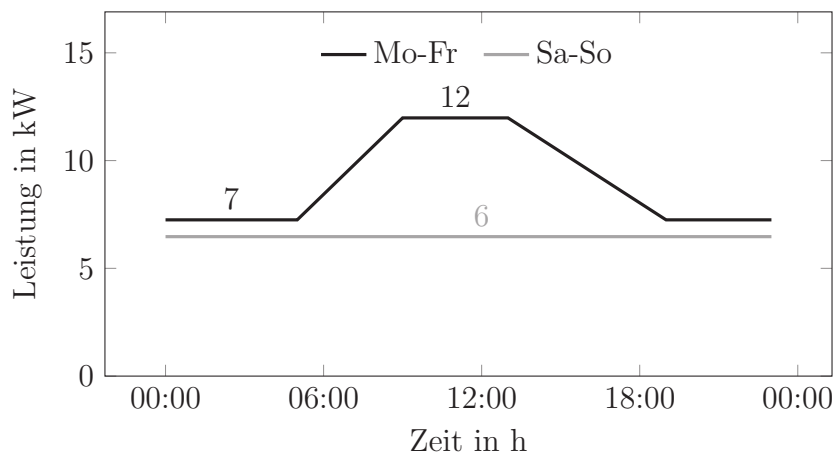


Abbildung A.20: Mittleres Profil der Druckluftherzeugung

A.4 Berechnung von Raumprofilen aus Messungen von Gesamtabteilungen

Sowohl in den OP-Stationen als auch auf der Intensivstation war es nicht möglich, Einzelgeräte zu vermessen. Stattdessen wurden die elektrischen Verbräuche der gesamten Abteilungen vermessen. Um dennoch Raumprofile für die einzelnen Räume bilden zu können, wurden diese aus den Gesamtmessungen abgeleitet. Das Verfahren wird in den folgenden Abschnitten beschrieben.

A.4.1 OP-Stationen

Neben den Operationssälen enthalten die OP-Stationen eine Reihe weiterer Räume. Dazu gehören die mit den OPs direkt verbundenen Einleitungs-, Ausleitungs- und Waschräume. Weiterhin gibt es Versorgungs- und Entsorgungsräume, Flure, Lager, Personalaufenthaltsbereiche, Umkleiden und Aufwachräume sowie gegebenenfalls weitere Räume. Für die meisten dieser Raumtypen wurden bereits Profile auf Basis von Einzelgerätemessungen auf anderen Stationen generiert. Räume, die nicht über die bisherigen Profile beschrieben werden können, sind die Ein- und Ausleitungsräume, Aufwachräume sowie die OP-Säle selbst.

In der Einleitung wird der Patient durch die Anästhesiekraft auf die Narkose vorbereitet. Der elektrische Leistungsbedarf hängt im Wesentlichen vom Zustand des jeweiligen Patienten ab, der darüber entscheidet, welche gerätetechnische Ausstattung notwendig ist. Die Ausleitung aus der Narkose nimmt in der Regel nur wenige Minuten in Anspruch, und wird daher häufig im Operationssaal selbst durchgeführt. Dem Ausleitungsraum kommt somit nur eine untergeordnete Bedeutung zu und die gerätetechnische Ausstattung ist geringer. Stattdessen wird für den Ausleitungsraum das Profil eines Flures verwendet, der hauptsächlich Beleuchtung, aber wenige Geräte aufweist. Im Aufwachraum verbleibt der Patient, bis seine Vitalfunktionen über längere Zeit stabil bleiben. Der Raum verfügt über mehrere Bettenplätze, die jeweils mit Geräten zur Überwachung ausgestattet sind.

Der OP-Saal selbst ist mit einer Vielzahl an Geräten ausgestattet. Neben Geräten zur Überwachung des Patienten können verschiedene medizinische Geräte zum Einsatz kommen. Dazu gehören auch Geräte mit einer hohen elektrischen Leistung wie beispielsweise Röntgen- und Ultraschallgeräte. Der genaue Einsatz von Geräten hängt somit stark von der grundsätzlichen Ausstattung des Saales und von der jeweils durchgeführten Operation ab. Somit kann das Raumprofil nur einen mittleren Verbrauch abbilden. Auch die Beleuchtung des OP-Feldes und die Ventilatoren der Umluft-Deckengeräte zur Erzeugung einer turbulenzarmen Verdrängungsströmung tragen erheblich zum elektrischen Verbrauch des Raumes bei.

Es stehen die Messungen dreier OP-Stationen zur Verfügung. Station 1 und 2 beinhalten jeweils 4 OP-Säle inklusive der zugehörigen Nebenräume, Station 3 einen OP-Saal. Tabelle A.19 gibt Aufschluss über die Verteilung der Flächen der einzelnen Raumtypen. Umkleiden, Versorgungs- und Entsorgungsräume wurden dem Raumtyp Lager zugewie-

sen, da dort nur wenige elektrische Geräte vorhanden sind.

Tabelle A.19: Flächen der Raumtypen in den drei vermessenen OP-Stationen

Raumtyp	Fläche in m ²		
	Station 1	Station 2	Station 3
OP-Saal	184	181	35
Einleitung	52	51	12
Ausleitung	49	42	11
Waschplatz	26	25	6
Flur	129	179	157
Lager/WC/Umkleide	90	140	45
Arbeitsraum	23	6	16
Aufenthalt	21	25	-
Behandlung	-	-	17
Büro	-	11	11
Treppenhaus	37	29	-
Aufwachraum	-	-	113

Für die Beleuchtung wird angenommen, dass in Einleitung und Aufwachraum 12 W/m^2 installiert sind und dass während der Nutzungszeit in den innenliegenden Einleitungsräumen 90 % sowie 60 % der Beleuchtung in den außenliegenden Aufwächrräumen eingeschaltet ist. Die Beleuchtung des OP-Saales wird nicht explizit bestimmt, da die dort installierten Lampen eine höhere Leistung aufweisen als typische Lampen in anderen Raumtypen.

Um die Profile für die unbekanntes Raumtypen Operationssaal, Einleitung und Aufwachraum zu bestimmen, wurden die Profile für die restlichen Raumtypen der Station addiert und die Differenz zu den Messdaten bestimmt. Die Differenz muss für Station 1 und 2 aus viermal dem Raumprofil für den Operationssaal und viermal der Einleitung bestehen, für Station 3 aus dem Verbrauch eines Operationssaals, einer Einleitung sowie zweier Aufwächrräume. So kann diejenige Lösung, die für alle drei Stationen den geringsten Fehler zwischen den Profilen für die fehlenden Räume und der Differenz der bekannten Raumtypen und der Messung hervorruft, bestimmt werden. Da Operationssaal und Einleitung in jeweils gleichem Verhältnis vorkommen, kann nur die Gesamtsumme aus beiden bestimmt werden. Daher wird für die Einleitung eine Leistung von 100 W zwischen 6 und 17 Uhr angenommen sowie eine Leistung von 50 W während der übrigen Zeiten und am Wochenende.

In Station 1 und Station 2 wurde jeweils eine Operation während des Wochenendes durchgeführt. Da jeweils nur ein Wochenende vermessen wurde, stehen weniger Messdaten zur Verfügung als an den Wochentagen, so dass sich dieses Ausreißer-Verhalten deutlich im Ergebnis zeigt. Die sich ergebenden Lastspitzen am Wochenende wurden herausgerechnet und eine konstante, mittlere Leistung am Wochenende angenommen. Auch für die Wochentage wird die Leistung, die stündliche Schwankungen aufweist, geglättet (Abbil-

Abbildung A.21). In Abbildung A.22 sind der Verbrauch der drei OP-Stationen als Messwert sowie als Summe der bisherigen und neu generierten Raumprofile aufgeführt.

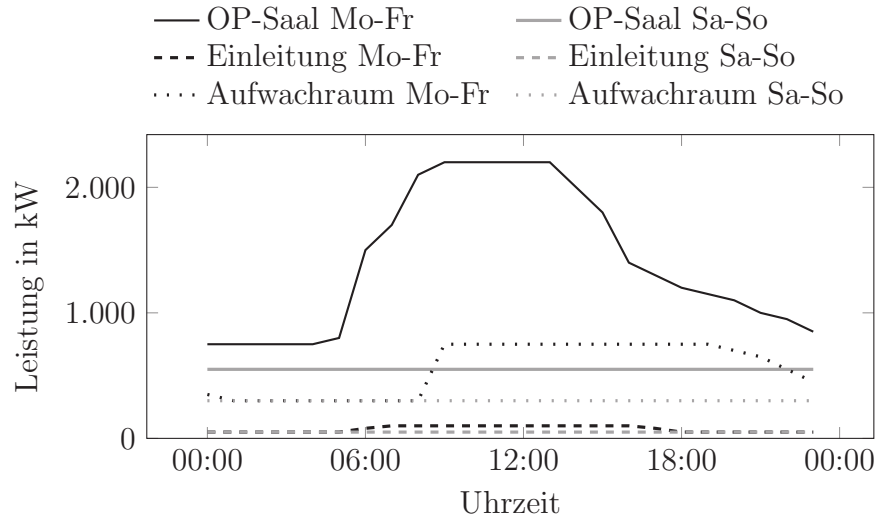


Abbildung A.21: Profile für OP-Saal, Einleitung und Aufwachraum

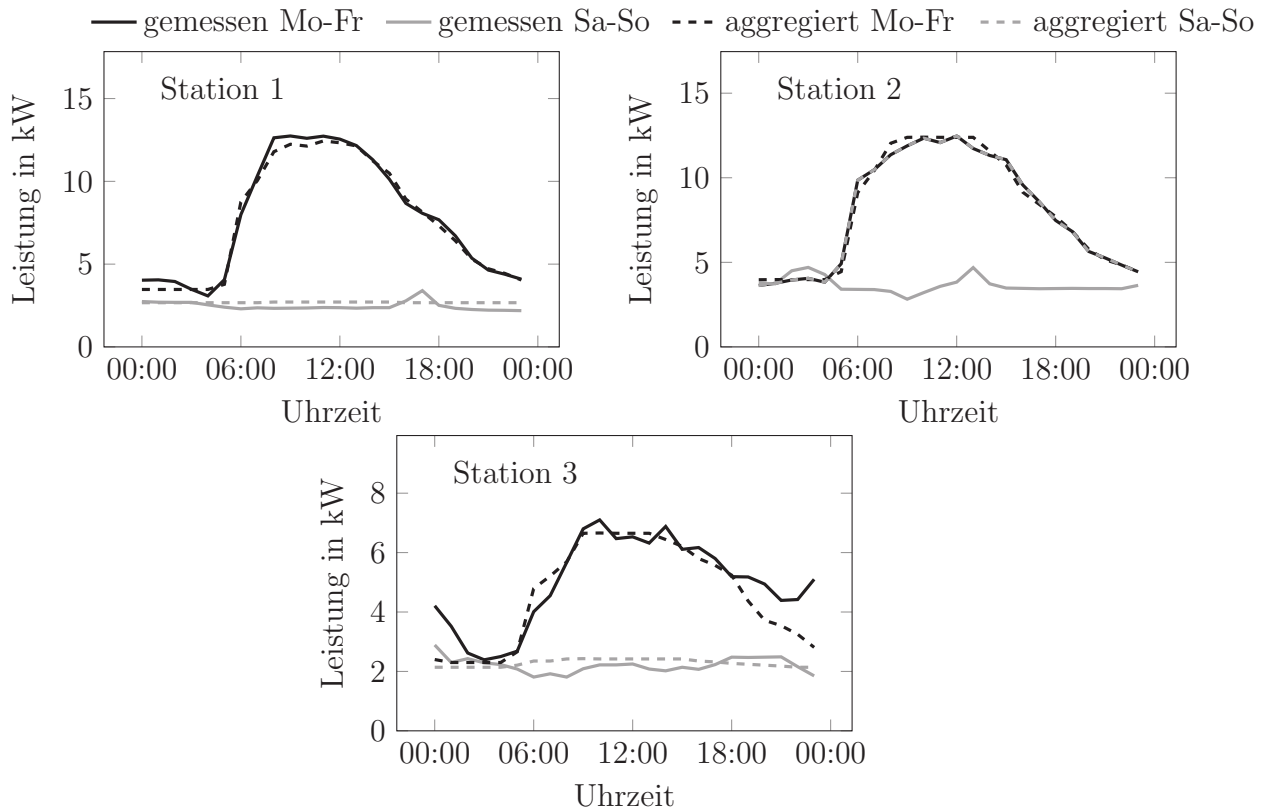


Abbildung A.22: Vergleich der gemessenen und aus den Raumprofilen aggregierten Verbräuche der drei OP-Stationen

A.4.2 Intensivstationen

Die Raumstrukturen der Intensivstationen gleichen denen der Pflegestationen, jedoch weicht die Ausstattung der Intensivzimmer von denen der Bettzimmer auf der Pflegestation ab. Der Energieverbrauch einer gesamten Intensivstation mit 14 Betten wurde im untersuchten Krankenhaus während eines Zeitraumes von 12 Tagen vermessen. Auffällig ist dabei, dass die mittlere Leistung im Tages- und Wochenverlauf nur geringfügigen Schwankungen unterworfen ist. Die minimale und maximale Leistung weichen lediglich um $\pm 30\%$ von der mittleren Leistung von 3,4 kW ab. Tabelle A.20 gibt die Zusammensetzung der Räume in der Intensivstation wieder.

Tabelle A.20: Zusammensetzung der Räume auf der Intensivstation

Raumtyp	Anzahl	Fläche in m ²
Intensivzimmer	10	225
Dienstzimmer	1	25
Büro	2	28
Aufenthalt	1	15
Treppenhaus	1	27
Umkleide	2	18
Lager	4	64
Unreiner Arbeitsraum	1	7
Flur	2	155

Es wird angenommen, dass die Räume auf der Intensivstation dasselbe Profil aufweisen wie die äquivalenten Raumtypen auf den Pflegestationen. Die einzigen Räume, die keinem bisher definierten Raumprofil entsprechen, sind die Intensivzimmer. Somit kann deren Profil aus der Differenz zwischen den Bettzimmern und der Summe der übrigen Raumprofile abgeleitet werden. Für die Beleuchtung der Zimmer werden dieselben Leistungen und Nutzungszeiten angenommen, wie für die Bettzimmer.

Die gerätetechnische Ausstattung variiert mit den Bedürfnissen der jeweiligen Patienten. Es sind vor allem Geräte zur Überwachung und Anzeige der Vitalparameter, elektronisch gesteuerte Medikamentenpumpen sowie Beatmungsgeräte vorhanden. Es wird davon ausgegangen, dass diese Geräte tageszeit- und wochentagsunabhängig eingesetzt werden und somit eine rund um die Uhr konstante Leistung im Bettzimmer vorliegt. Bei Annahme einer Leistung von 50 W pro Bett ergibt sich eine Abweichung von dem über die Summe der Raumprofile bestimmten Energieverbrauch der Intensivstation von der Messung von 1% an Wochentagen und 3% an Wochenenden. Die Profile sind in Abbildung A.23 dargestellt.

Das gemessene Profil zeigt drei leichte Lastspitzen um 8:00, 12:00 und 19:00 Uhr, die von dem aggregierten Profil nicht wiedergegeben werden. Die maximale Abweichung der Leistung am Wochentag tritt um 06:00 Uhr auf und beträgt 31%, am Wochenende

tritt eine maximale Abweichung von 47 % zur selben Zeit auf. Während der übrigen Zeit bleibt die Abweichung unterhalb von 16 %, während 15 Stunden des Wochentags bzw. 14 Stunden des Wochenendtags sogar unterhalb von 10 %.

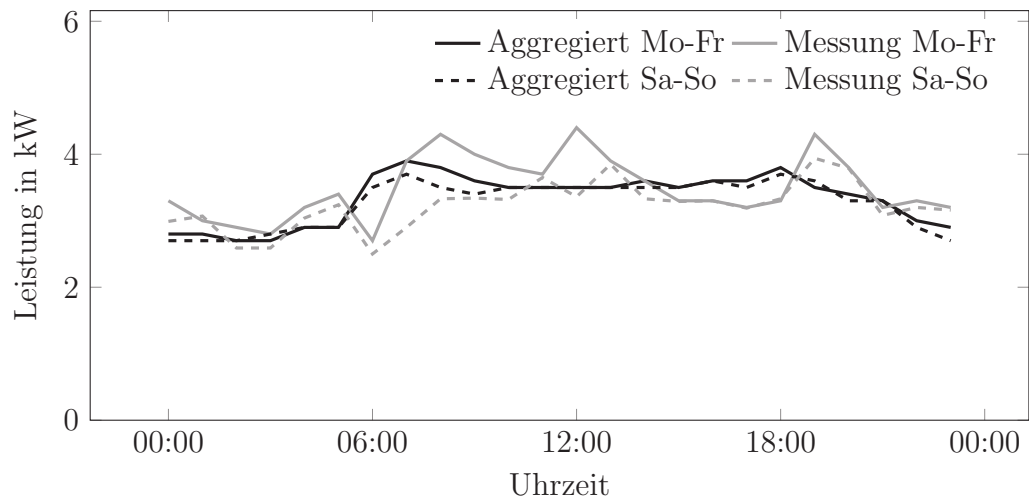


Abbildung A.23: Gemessene und aus den Raumprofilen aggregierte Profile der Intensivstation

A.5 Raumprofile der einzelnen Raumtypen

Im folgenden Abschnitt sind die Profile für Beleuchtung und Geräte für die einzelnen Raumtypen aufgeführt. Das Verfahren zur Generierung der Raumprofile wurde in Kapitel 5.2 beschrieben. Die Profile sind nach dem Flächenanteil, den die entsprechenden Räume im Krankenhaus einnehmen, sortiert. Da die installierte Beleuchtungsleistung für die meisten Raumtypen von der Raumfläche abhängig ist, werden die Profile für eine typische Grundfläche dieses Raumtyps angegeben.

Flur Im Raumprofil für den Flur sind keine Geräte enthalten. Da Flure in der Regel innenliegend sind, ist die Nutzung der Beleuchtung unabhängig von den Tageslichtverhältnissen. Abbildung A.27 zeigt das Raumprofil für den Flur. Obwohl fast alle Flure tagsüber beleuchtet sind, ist zum Teil nur jede zweite Leuchte eingeschaltet, sodass auch tagsüber nur maximal 90 % eingeschaltete Beleuchtung erreicht werden. Es findet eine Unterscheidung statt zwischen Fluren in Pflegebereichen, die rund um die Uhr beleuchtet sind und Fluren in ambulanten oder Büro-Bereichen, in denen nachts und am Wochenende die Beleuchtung in der Regel ausgeschaltet ist.

Tabelle A.21: Parameter des Raumprofils Flur

Beleuchtung	
P_{inst}	6 W/m ²

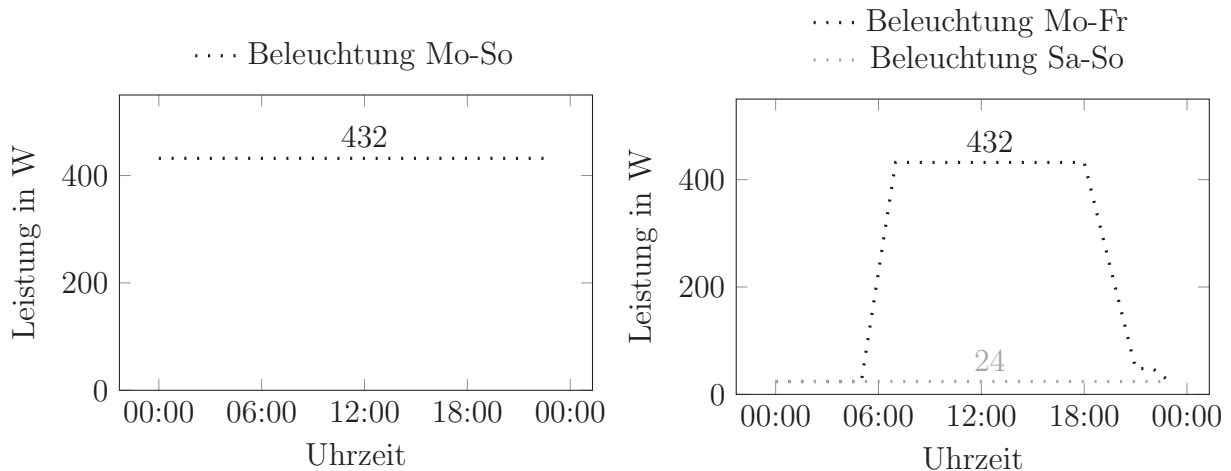


Abbildung A.24: Beleuchtungsprofil für einen Flur mit einer Fläche von 60 m², links: Pflegebereich, rechts: ambulanter Bereich

Bettzimmer Für die Profilbildung wurde von einem Fernseher pro Bett ausgegangen. Zudem wurden weitere Kleingeräte mit einer Leistung von wenigen Watt angenommen, beispielsweise für selbst mitgebrachte Unterhaltungselektronik der Patienten. Für die Kleingeräte wird während des Tages die Betriebsleistung und während der Nacht die Standbyleistung verwendet. Im Gegensatz zu den meisten anderen Raumtypen ist die Beleuchtungsleistung nicht in Abhängigkeit der Raumfläche, sondern in Abhängigkeit der Bettenzahl definiert. Da die Bettzimmer auch am Wochenende belegt sind, wird keine Unterscheidung der Profile für Wochentage und Wochenenden vorgenommen.

Tabelle A.22: Parameter des Raumprofils Bettzimmer

	Beleuchtung	Fernseher	Sonstige Kleingeräte
N		1/Bett	1/Bett
P_{inst}	100 W/Bett		
$P_{Betrieb}$		50 W	10 W
$P_{Standby}$		17 W	5 W

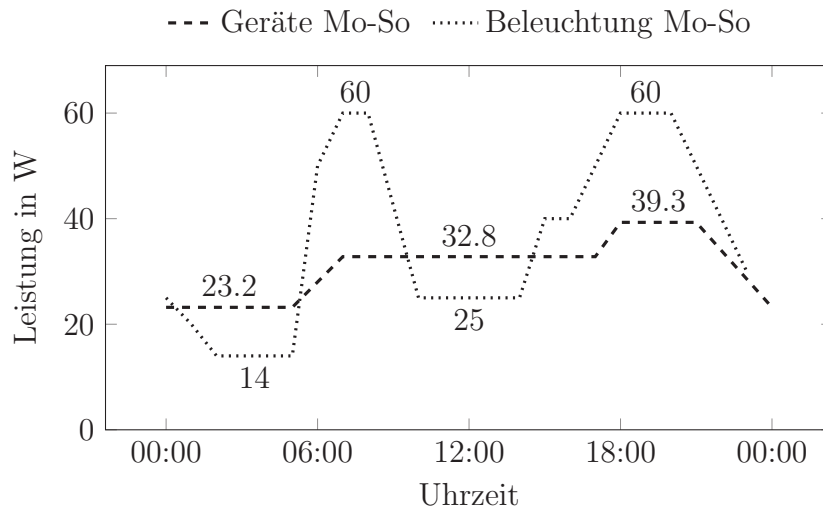


Abbildung A.25: Beleuchtungs- und Geräteprofile für ein 1-Personen-Bettzimmer

Bettzimmer Wahlleistung Im untersuchten Krankenhaus sind die Bettzimmer im Wahlleistungsbereich zusätzlich mit einem Kühlschranks ausgestattet, für den eine mittlere Leistung von 30 W angenommen wird. Zudem werden statt der Röhrenfernseher in den Standard-Bettzimmern Flachbildschirmfernseher verwendet, sodass die Nutzungszeiten der Fernseher im Vergleich zu den Standard-Bettzimmern gleich behalten wurden, die Leistungsdaten jedoch angepasst wurden.

Tabelle A.23: Parameter des Raumprofils Bettzimmer Wahlleistung

	Beleuchtung	Fernseher	Kühlschrank	Sonstige Kleingeräte
N		1/Bett	1/Bett	1/Bett
P_{inst}	100 W/Bett			
$P_{Betrieb}$		90 W	30 W	10 W
$P_{Standby}$		0,5 W		5 W

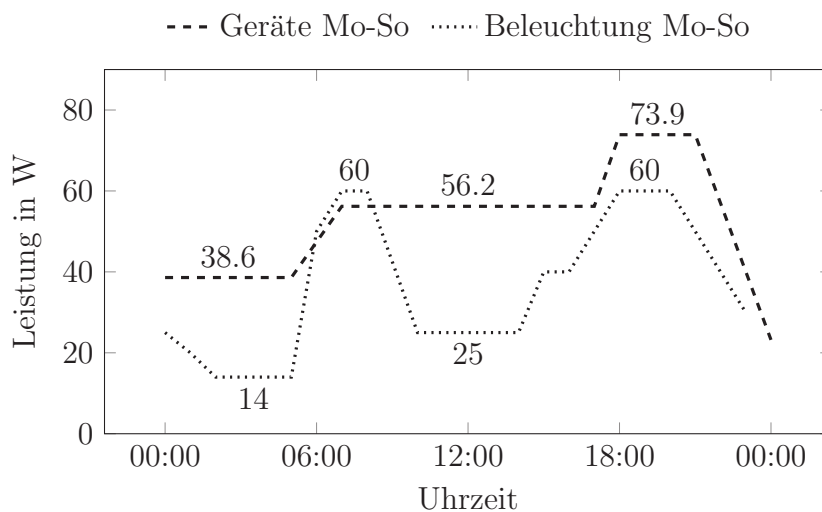


Abbildung A.26: Beleuchtungs- und Geräteprofile für ein 1-Personen-Wahlleistungszimmer

Lager Unter dem Raumprofil Lager werden alle Räume zusammengefasst, die nicht durchgehend von Personen belegt sind und keine Geräte aufweisen. Dazu werden in diesem Zusammenhang neben den eigentlichen Lagerräumen beispielsweise auch Bäder und Umkleiden gezählt. Analog zu den Fluren wird auch bei den Lagerräumen unterschieden zwischen ambulanten Lagerräumen und Lagerräumen im Pflegebereich, die auch während der Nacht teilweise in Benutzung sind.

Tabelle A.24: Parameter des Raumprofils Lager

Beleuchtung	
P_{inst}	12 W/m ²

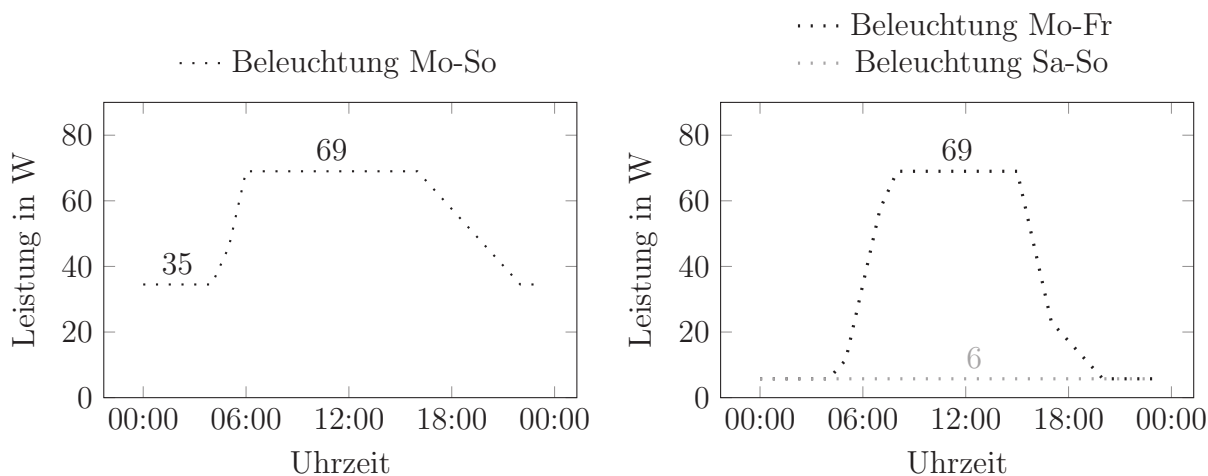


Abbildung A.27: Beleuchtungsprofil für einen Lagerraum mit einer Fläche von 10 m², links: Pflegebereich, rechts: ambulanter Bereich

Büro Ein Büro enthält im Durchschnitt 1,6 Computerarbeitsplätze. Die Nutzung erfolgt vorwiegend tagsüber an Werktagen. In etwa 10% der Büroräume war auch nachts die Beleuchtung eingeschaltet. In wenigen Fällen war über die Messungen eine Gerätenutzung am Wochenende feststellbar, sodass auch an den Wochenenden eine geringe Beleuchtungsleistung angesetzt wurde.

Tabelle A.25: Parameter des Raumprofils Büro

	Beleuchtung	Computer	Monitor	Drucker	Kaffeemaschine	Sonstige Kleingeräte
N		1,6	1,7	0,6	0,2	
P_{inst}	15 W					
$P_{Betrieb}$		30 W	21 W	150 W	470 W	20 W
$P_{Standby}$		1 W	0,4 W	15 W	1 W	10 W

--- Geräte Mo-Fr --- Geräte Sa-So Beleuchtung Mo-Fr Beleuchtung Sa-So

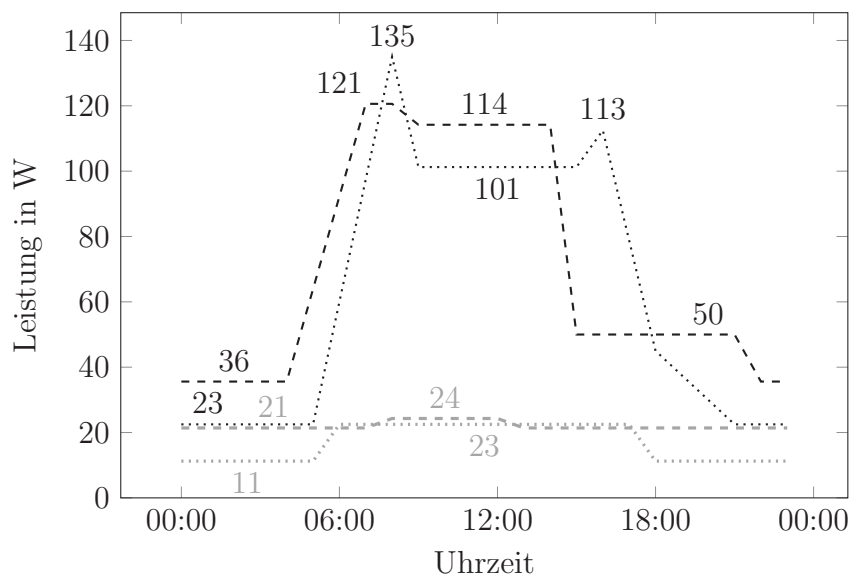


Abbildung A.28: Beleuchtungs- und Geräteprofile für ein Büro mit einer Fläche von 15 m^2

Technikraum Da die Technikräume sehr unterschiedliche Lasten aufweisen, wurde hierzu kein eigenes Profil erstellt. Die Technikräume, die als Lüftungs- oder Heizzentralen die technischen Anlagen zur Versorgung des Krankenhauses beinhalten, werden zudem nicht gesondert als thermische Zonen modelliert. Sie sind häufig nicht beheizt und die technischen Anlagen werden über die entsprechenden Untermodelle realisiert.

Treppenhaus Die Treppenhäuser enthalten keine Geräte. Obwohl diese zumeist außenliegend sind, müssen sie aus sicherheitstechnischen Gründen beleuchtet sein. Jedoch ist auch hier teilweise nur jede zweite Leuchte eingeschaltet, sodass der Anteil der eingeschalteten Beleuchtung unter 100 % liegt. Da in der Regel zwei Leuchten pro Etage angebracht sind, ist die Beleuchtungsleistung nicht pro Fläche sondern pro Etage definiert. In ambulanten Bereichen wird nachts die Beleuchtung ausgeschaltet, sodass eine Unterscheidung zwischen ambulanten und Pflege-Bereichen erfolgt.

Tabelle A.26: Parameter des Raumprofils Treppenhaus

Beleuchtung	
P_{inst}	50 W/Etage

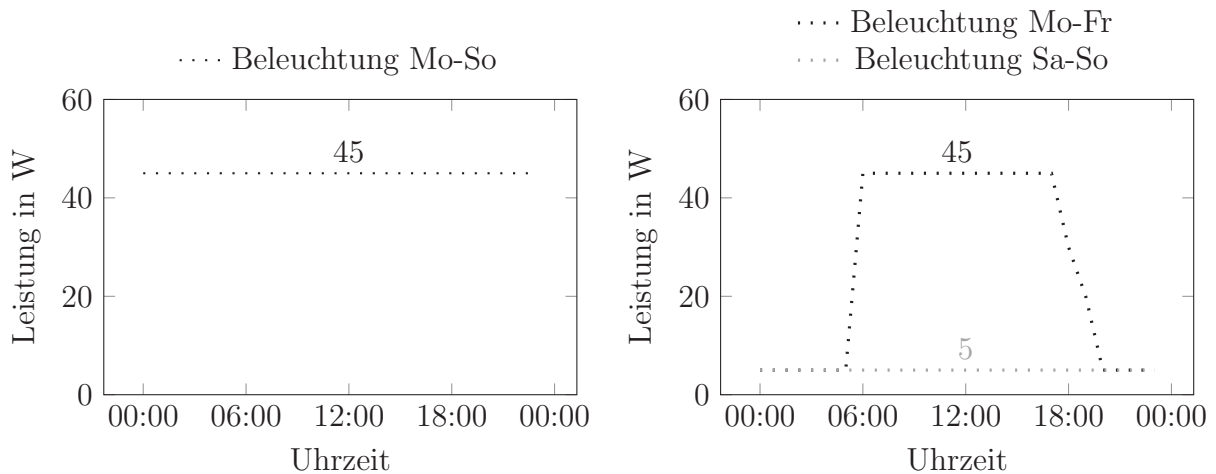


Abbildung A.29: Beleuchtungsprofil für eine Etage eines Treppenhauses, links: Pflegebereich, rechts: ambulanter Bereiche

Behandlungsraum Die Begehung zeigte, dass es große Unterschiede im elektrischen Energieverbrauch der Behandlungsräume gibt. Ein Großteil der Behandlungsräume verfügt, abgesehen von einem Computerarbeitsplatz, über nur wenige elektrische Verbraucher. Diese sind entweder batteriebetrieben oder weisen nur einen sehr geringen Verbrauch auf, wie beispielsweise Absauggeräte. Diese Räume werden als Behandlungsraum Typ I bezeichnet. In einigen Behandlungsräume hingegen sind zusätzlich Ultraschallgeräte, Röntgengeräte oder andere Geräte mit elektrischen Verbräuchen im zweistelligen kWh-Bereich pro Tag vorhanden. Diese Räume bekommen das Raumprofil Behandlungsraum Typ II zugewiesen.

Tabelle A.27: Parameter des Raumprofils Behandlungsraum Typ I und Typ II

	Beleuchtung	Computer	Monitor	Drucker	Ultraschall ¹	Röntgengerät ¹
N		0,5	0,5	0,4	0,7	0,3
P_{inst}	15 W					
$P_{Betrieb}$		30 W	21 W	150 W	550 W	590 W
$P_{Standby}$		1 W	0,4 W	15 W	15 W	440 W

¹ nur Behandlungsraum Typ II

- - Geräte Mo-Fr - - Geräte Sa-So Beleuchtung Mo-Fr Beleuchtung Sa-So

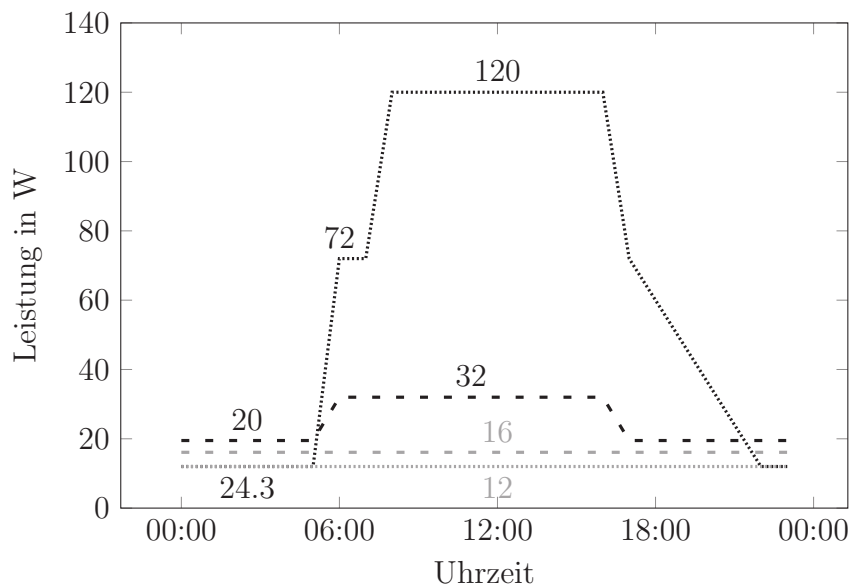


Abbildung A.30: Beleuchtungs- und Geräteprofile für einen Behandlungsraum Typ I mit einer Fläche von 15 m^2

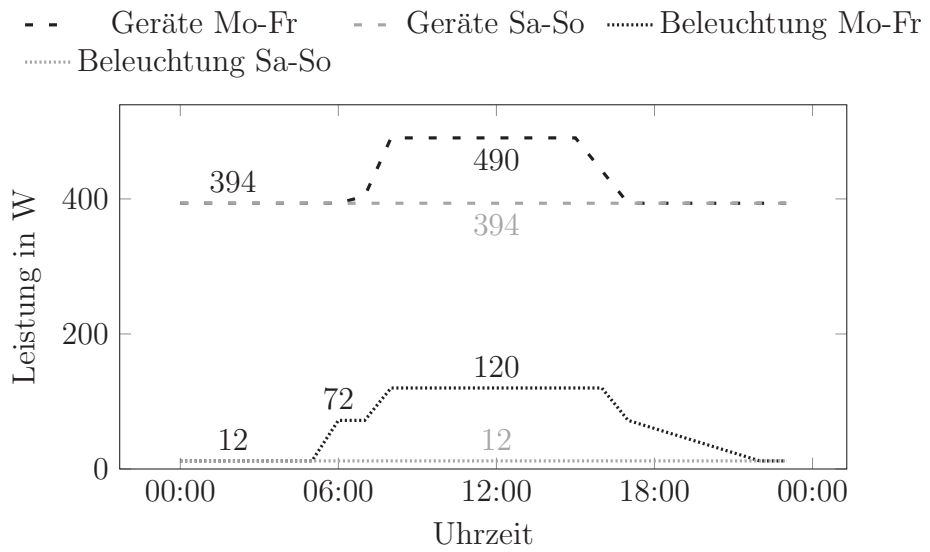


Abbildung A.31: Beleuchtungs- und Geräteprofile für einen Behandlungsraum Typ II mit einer Fläche von 15 m^2

Aufenthaltsbereiche In Bezug auf die Aufenthaltsbereiche wird zwischen Aufenthaltsräumen für Personal und Patienten in Pflegestationen und Wartebereichen für Patienten in ambulanten Bereichen unterschieden. Diese weisen unterschiedliche Ausstattungen auf. Häufig sind Aufenthaltsräume im Pflegebereich mit einem Kühlschrank ausgestattet. In ambulanten Bereichen hingegen finden sich in einigen Fällen Fernseher in den Wartebereichen.

Tabelle A.28: Parameter des Raumprofils Aufenthalt

	Beleuchtung	Kühlschrank	Sonstige Kleingeräte
N		0,5	
P_{inst}	12 W		
$P_{Betrieb}$		30 W	10 W

Tabelle A.29: Parameter des Raumprofils Warteraum

	Beleuchtung	Fernseher	Sonstige Kleingeräte
N		0,5	
P_{inst}	15 W		
$P_{Betrieb}$		90 W	10 W
$P_{Standby}$		0,5 W	

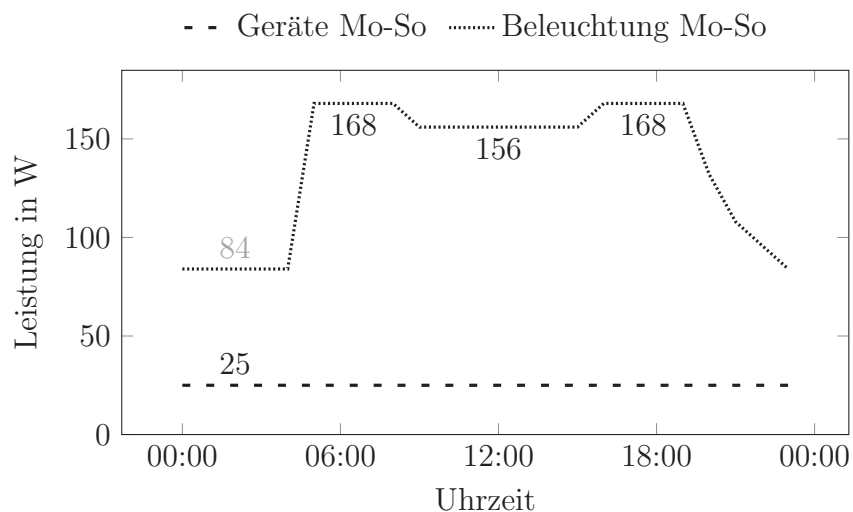


Abbildung A.32: Beleuchtungs- und Geräteprofile für einen Aufenthaltsraum mit einer Fläche von 20 m²

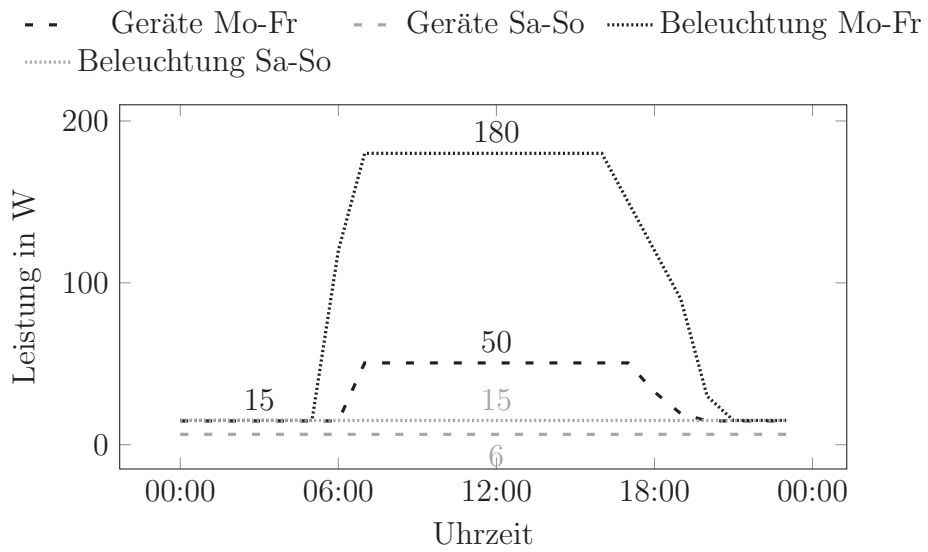


Abbildung A.33: Beleuchtungs- und Geräteprofile für einen Warteraum mit einer Fläche von 20 m^2

OP-Nebenraum Die Räume in den OP-Stationen, deren Nutzung und Ausstattung den Raumtypen auf anderen Stationen entsprechen (beispielsweise Aufenthaltsbereiche, Lager- räume), bekommen die entsprechenden Profile zugewiesen. Nebenräume, die nicht über die übrigen Profile abgedeckt werden, sind die Einleitungsräume und die Aufwachräume. Die Profile für die OP-, Einleitungs- und Aufwachräume wurden aus der Gesamtmessung abgeleitet. Das Verfahren ist in Anhang A.4.1 dargestellt.

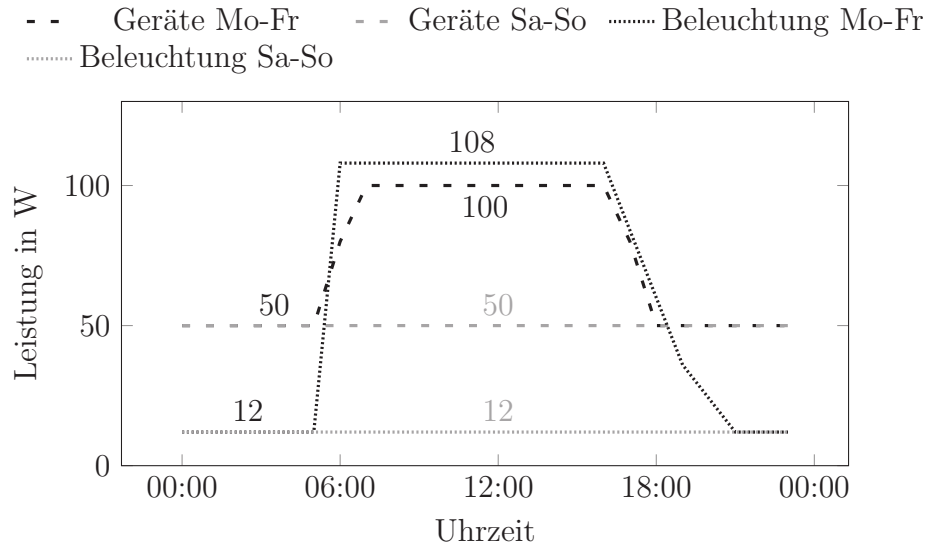


Abbildung A.34: Beleuchtungs- und Geräteprofile für einen Einleitungsraum mit einer Fläche von 12 m²

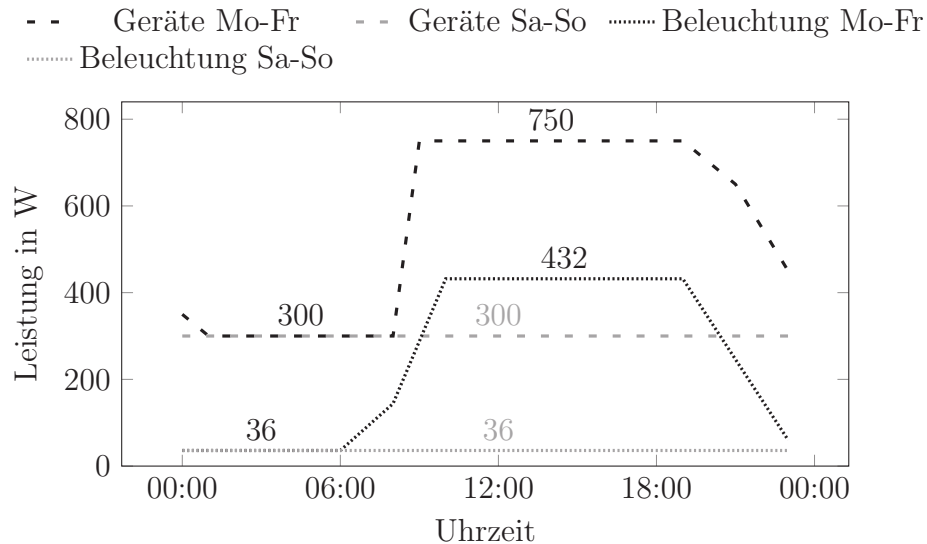


Abbildung A.35: Beleuchtungs- und Geräteprofile für einen Aufwachraum mit einer Fläche von 60 m²

Arztzimmer Das Arztzimmer wird von verschiedenen Ärzten genutzt, um Schreibarbeiten zu erledigen. Die Nutzung des Arztzimmers unterscheidet sich somit von der des Büros darüber, dass es von mehreren Personen benutzt wird und dies zu Zeiten, die von den üblichen Büroarbeitszeiten abweichen. Für den Drucker im Arztzimmer wurden keine Messungen durchgeführt. Stattdessen wird das Profil eines Büro-Druckers verwendet. Da an der Messung des Monitors auch am Wochenende eine Aktivität erkennbar war, wird auch eine Beleuchtungsleistung am Wochenende angenommen.

Tabelle A.30: Parameter des Raumprofils Arztzimmer

	Beleuchtung	Computer	Monitor	Drucker	Kaffeemaschine	Sonstige Kleingeräte
N		2,5	2,5	1	0,3	
P_{inst}	12 W					
$P_{Betrieb}$		29 W	23 W	146 W	470 W	20 W
$P_{Standby}$		1 W	0,4 W	15 W	1 W	10 W

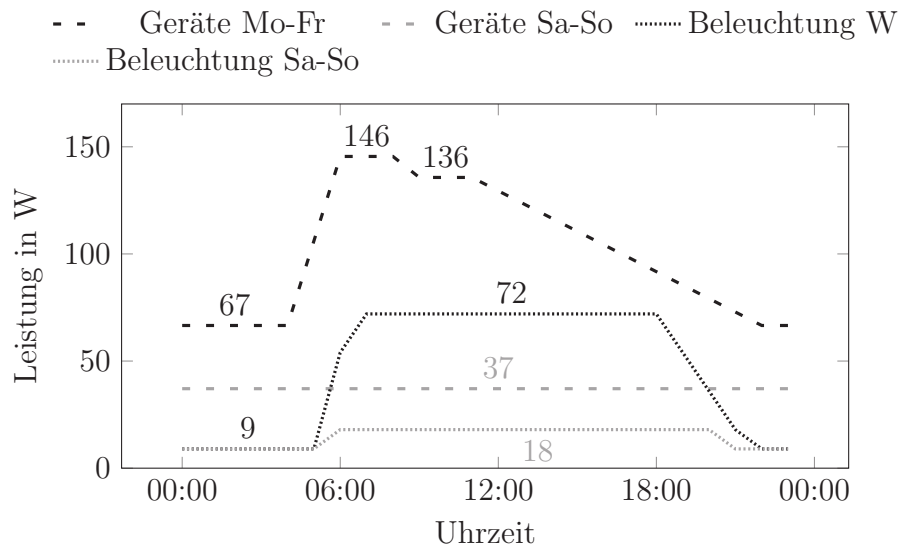


Abbildung A.36: Beleuchtungs- und Geräteprofile für ein Arztzimmer mit einer Fläche von 15 m^2

Teeküche In den Teeküchen auf den Pflegestationen wird Kaffee und Tee für die Patienten zubereitet. Weiterhin dienen sie als Aufenthaltsraum für die Krankenhausmitarbeiter, von denen einige dort auch ihr Essen zubereiten. Die Räume werden rund um die Uhr genutzt. Teeküchen in ambulanten und Verwaltungsbereichen hingegen sind nur während der Büroarbeitszeiten in Benutzung und sind weniger stark frequentiert, da hierüber keine Versorgung der Patienten, sondern lediglich der Mitarbeiter stattfindet. Somit wird hier wiederum eine Fallunterscheidung zwischen Teeküchen im Pflegebereich und im ambulanten Bereich getroffen. Die Ausstattung ist jedoch dieselbe für beide Raumtypen.

Tabelle A.31: Parameter des Raumprofils Teeküche

	Beleuchtung	Kaffee- maschine	Spül- maschine	Kühl- schrank	Mikro- welle	Wasser- kocher	Sonstige Kleingeräte
N		1,5	1	1	0,8	0,8	
P_{inst}	15 W						
$P_{Betrieb}$		1400 W	500 W	30 W	1180 W	1675 W	20 W
$P_{Standby}$		-	-	-	-	-	-

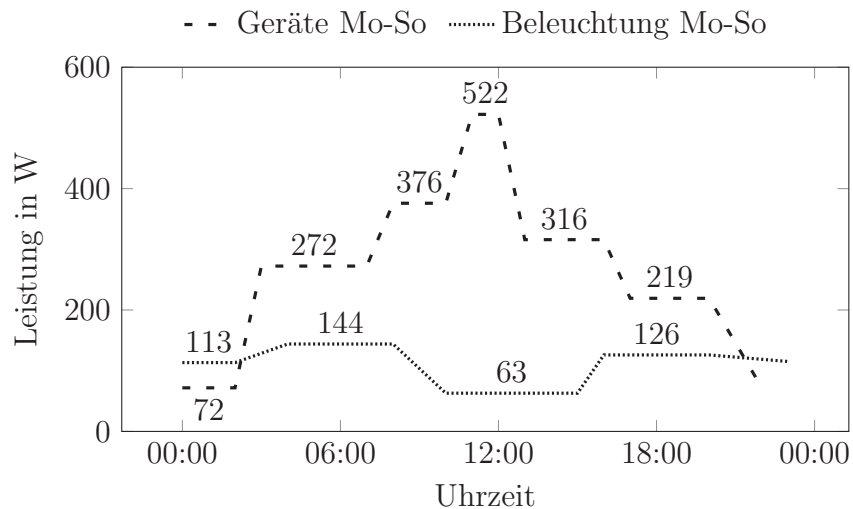


Abbildung A.37: Beleuchtungs- und Geräteprofile für eine Teeküche im Pflegebereich mit einer Fläche von 12 m^2

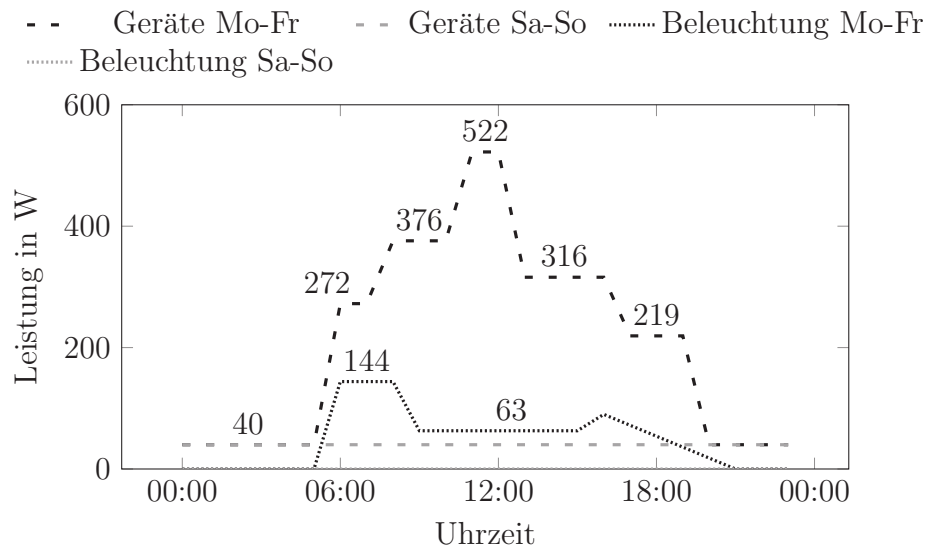


Abbildung A.38: Beleuchtungs- und Geräteprofile für eine ambulante Teeküche mit einer Fläche von 12 m^2

Dienstzimmer Das Dienstzimmer ist der Arbeitsplatz des Pflegepersonals auf den Bettenstationen. Dieser ist rund um die Uhr in Nutzung. Neben Bürogeräten und Kühlschrank werden weitere Kleingeräte, beispielsweise die Aufladestationen für batteriebetriebene medizinische Geräte, Telefone, etc., über eine pauschale Leistung von 20 Watt berücksichtigt.

Tabelle A.32: Parameter des Raumprofils Dienstzimmer

	Beleuchtung	Computer	Monitor	Drucker	Kühlschrank	Sonstige Kleingeräte
N		1,5	1,5	1	0,5	15
P_{inst}	15 W					
$P_{Betrieb}$		30 W	21 W	100 W	30 W	
$P_{Standby}$		1 W	0,4 W	9 W		

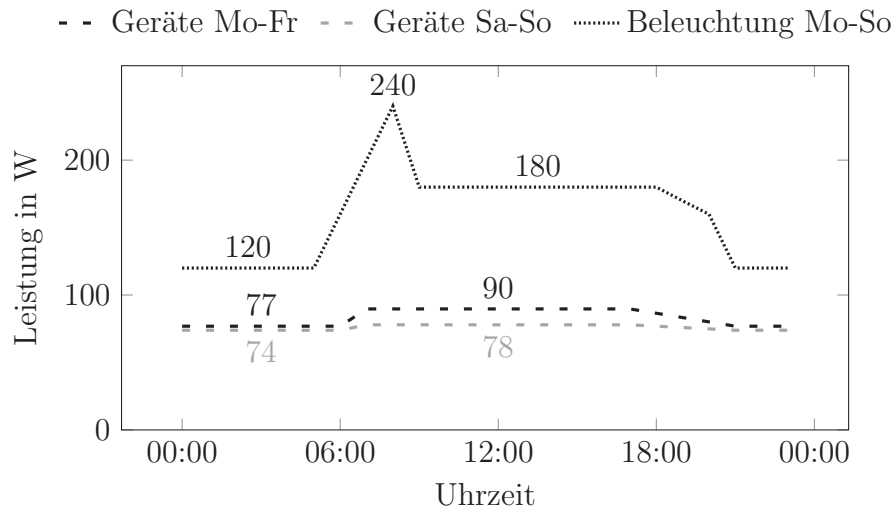


Abbildung A.39: Beleuchtungs- und Geräteprofile für ein Dienstzimmer mit einer Fläche von 25 m²

Operationssaal Analog zum Profil der OP-Nebenräume wurden auch die Profile für die OP-Säle aus den Messungen abgeleitet. Das Vorgehen ist in Anhang A.4.1 nachzulesen. Aus der Messung ergibt sich das nachfolgend dargestellte Profil, das nicht weiter nach Beleuchtung und Geräten aufgetrennt wird.

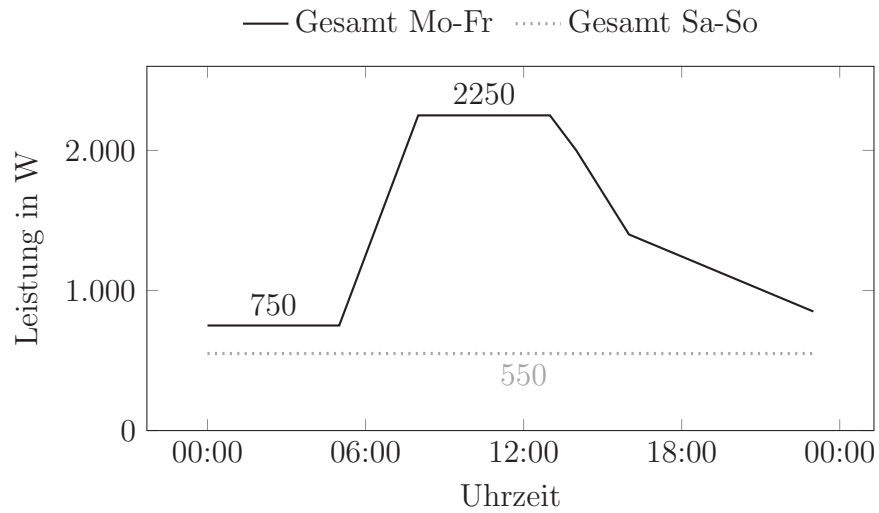


Abbildung A.40: Raumprofil für einen Operationssaal

Aufzug Da nur zwei Aufzüge vermessen wurden und diese sehr hohe Unterschiede im Energieverbrauch aufweisen, erscheint es nicht sinnvoll, deren Mittelwert zu verwenden, um den elektrischen Verbrauch der übrigen Aufzüge abzubilden. Stattdessen wird auf die Messung der 20 Krankenhausaufzüge von Beier (2009) zurückgegriffen. Im Mittel verbrauchten die durch ihn vermessenen Aufzüge knapp 17,8 MWh/a. Hierbei zeigte sich eine Abhängigkeit des Jahresenergieverbrauchs vor allem von der elektrischen Leistung während der Fahrt sowie vom Fahrtzeitanteil. Diese Größen lassen sich jedoch ohne Messung nur schwer bestimmen.

Weiterhin hat das Vorhandensein einer Frequenzregelung einen hohen Einfluss auf den Jahresenergieverbrauch. Aufzüge mit Frequenzregelung hatten einen mittleren Jahresenergieverbrauch von 12,1 MWh, nicht-frequenzgeregelt Aufzüge verbrauchten im Durchschnitt 24,8 MWh. Sofern bekannt ist, ob ein Aufzug frequenzgeregelt ist, werden somit diese Mittelwerte verwendet.

Intensivzimmer Auch die Profile für die Patientenzimmer auf der Intensivstation werden aus der Messung der Gesamtabteilung abgeleitet. Die Berechnung ist in Anhang A.4.2 beschrieben.

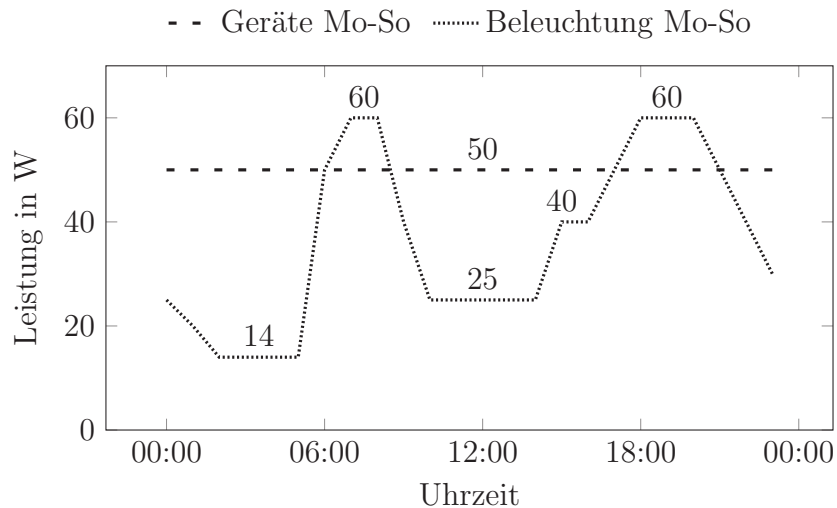


Abbildung A.41: Beleuchtungs- und Geräteprofile für ein Intensivzimmer

Cafeteria In der Cafeteria werden täglich von 07:30 bis 18:00 Uhr Mahlzeiten für Klinikpersonal und -besucher verkauft und verzehrt. Diese werden zum Teil in der Großküche des Krankenhauses, zum Teil aber auch vor Ort in der Cafeteria zubereitet. Da die Cafeteria nur einmal im Krankenhaus vorkommt, wird hierfür kein getrenntes Profil der einzelnen Räume abgeleitet, sondern der Verbrauch des gesamten Bereiches gemessen. Die Messung konnte nicht separat für die Cafeteria durchgeführt werden, sondern eine an die Cafeteria angrenzende ambulante Praxis wurde mitgemessen. Um das Profil der Cafeteria abzuleiten, wurde der Verbrauch der Praxis über die Raumprofile aus dem gemessenen Gesamtverbrauch herausgerechnet.

Die Cafeteria hat eine Fläche von 350 m^2 . Der Verbrauch umfasst die elektrischen Verbräuche des Speisesaals, der Essensausgabe mit mehreren Kühltheken, Wärmetheken und Getränkependern sowie den zugehörigen Vorbereitungsräumen mit Kombidämpfer, Spülmaschine, Kühlgeräten und Eiswürfelbereiter. Weiterhin ist der Verbrauch dreier dezentraler Klimageräte im Verbrauch enthalten, die die Wärmelasten der Cafeteria abführen. Eine Übertragbarkeit auf andere Krankenhäuser ist demnach nur bedingt möglich, da der Verbrauch stark von der Größe, der Ausstattung und den Gegebenheiten im jeweiligen Krankenhaus abhängt.

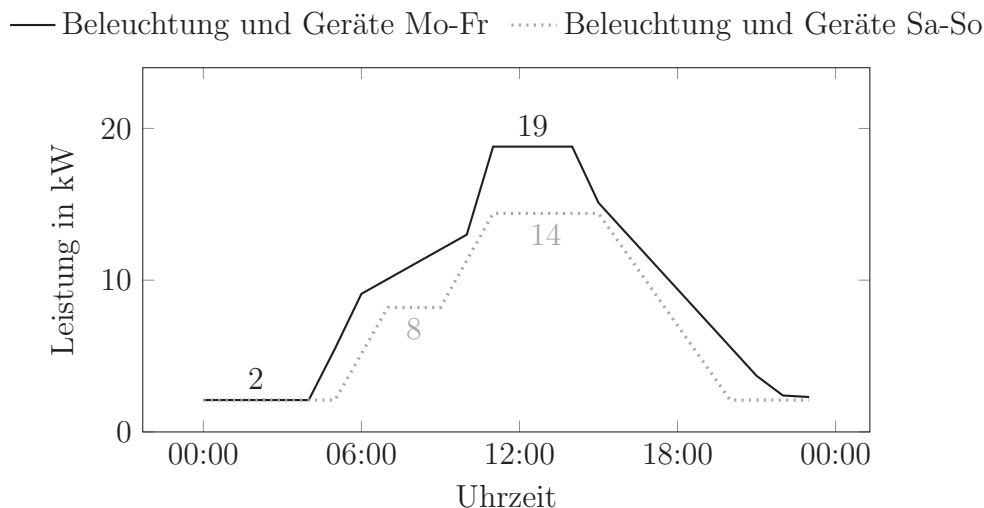


Abbildung A.42: Beleuchtungs- und Geräteprofile für die Cafeteria

Pflegearbeitsraum Im unreinen Pflegearbeitsraum stehen die Steckbeckenspülen, die rund um die Uhr im Einsatz sind.

Tabelle A.33: Parameter des Raumprofils unreiner Pflegearbeitsraum

	Beleuchtung	Steckbeckenspüle
N		1
P_{inst}	13 W	
$P_{Betrieb}$		1500 W
$P_{Standby}$		6 W

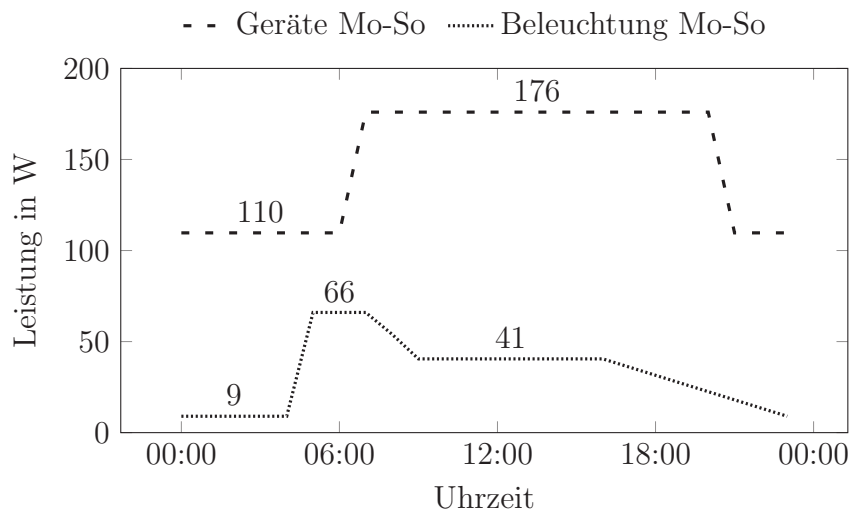


Abbildung A.43: Beleuchtungs- und Geräteprofile für einen unreinen Pflegearbeitsraum mit einer Fläche von 8 m²

Großküche Für die Abschätzung des Verbrauchs der Großküche wurde eine Messung des gesamten Verbrauches an der elektrischen Unterverteilung durchgeführt, da eine Messung der Einzelverbraucher aufgrund deren Vielzahl nicht praktikabel gewesen wäre. In der Küche werden täglich 900 warme Mahlzeiten zubereitet und das entstehende Geschirr gespült. Die Küchengeräte sind strombetrieben. Der mittlere Verbrauch unter der Woche und an Wochenendtagen ist in Abbildung A.44 dargestellt. Es sind drei deutliche Lastspitzen zu erkennen. Die größte tritt um 10:00 Uhr auf, wenn das Mittagessen zubereitet und gleichzeitig das Geschirr vom Frühstück gespült wird. Die nächsten beiden Lastspitzen sind der Spülmaschine zuzuordnen, wenn diese das Geschirr des Mittag- und Abendessens spült. Die elektrische Leistung der Spülmaschine im Betrieb liegt bei etwa 40 kW.

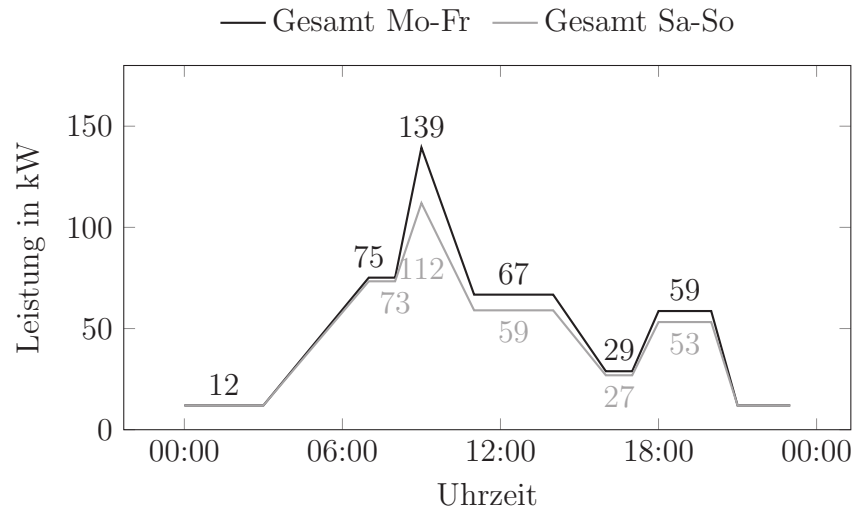


Abbildung A.44: Profil der Großküche

Zentralsterilisation Die Zentralsterilisation wurde als Gesamtabteilung vermessen. Hier werden pro Jahr etwa 20 000 Sterilguteinheiten aufbereitet. Maßgeblich am Verbrauch der Sterilisation beteiligt sind die beiden Dampferzeuger für die Dampfsterilisation.

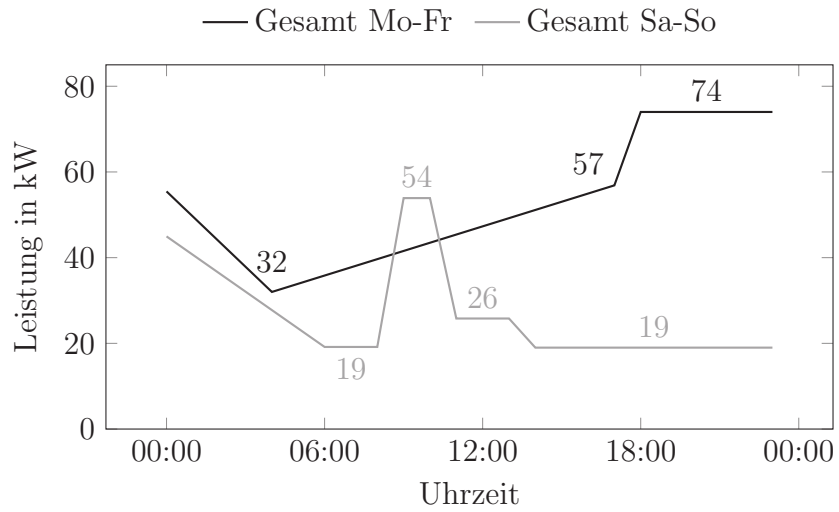


Abbildung A.45: Profil der ZSVA

Serverraum Der Energieverbrauch von Serverräumen kann nur schwer abgeschätzt werden. Die physikalische Ausstattung eines Serverraumes kann, beispielsweise durch den Einsatz von Virtualisierungstechnik und die Art der verwendeten Serversysteme, stark variieren und somit sehr unterschiedliche Ressourcenverbräuche aufweisen (Hintemann und Fichter, 2010). Sehr häufig sind kleine dezentrale Serveranlagen stockwerksweise oder abteilungsweise installiert. Hier sind zumeist keine Daten vorhanden, sodass der Anteil der Serverleistungen teilweise höher liegen kann als angenommen (Jakob et al., 2008). Nach Beispielen aus Borderstep (2009) ergibt sich ein mittlerer Gesamtenergieverbrauch inklusive Klimatisierung von $6300 \text{ kWh/m}^2 \text{ a}$ für Serverräume verschiedener Größenklassen. Wird ein Anteil der Klimatisierung von 50 % am Gesamtenergiebedarf angenommen, so ergibt sich ein mittlerer Energiebedarf von $4460 \text{ kWh/m}^2 \text{ a}$ für den Stromverbrauch der Server, bzw. eine mittlere Leistung von 510 W/m^2 .

Im Krankenhaus wurden keine Messungen des Energieverbrauches von Serverräumen vorgenommen. Eine indirekte Bestimmung eines einzelnen Serverraumes lässt sich über die Temperaturen der Belüftung vornehmen. Die Temperaturen der Zuluft werden für zwei Serverräume in der Gebäudeleittechnik aufgezeichnet. Im Mittel beträgt die Differenz zwischen Zu- und Ablufttemperatur 5 K. Laut Ausführungsplanung ist eine Zuluftmenge von $2550 \text{ m}^3/\text{h}$ vorgesehen. Damit ergibt sich eine über die Lüftungsanlage abgeführte Wärmemenge von 4,3 kW. Die Fläche beider Räume ist 45 m^2 , somit ergibt sich eine Leistung von 100 W/m^2 , die für die weitere Modellierung verwendet wird. Dieser Wert ist deutlich geringer als die oben genannten Literaturwerte.

Kopiererraum Die Kopierräume finden sich vor allem in Bürotrakten. In diesen stehen Kopierer, die von vielen Personen gleichzeitig in Nutzung sind.

Tabelle A.34: Parameter des Raumprofils Kopiererraum

	Beleuchtung	Kopierer
N		1
P_{inst}	15 W	
$P_{Betrieb}$		240 W
$P_{Standby}$		57 W

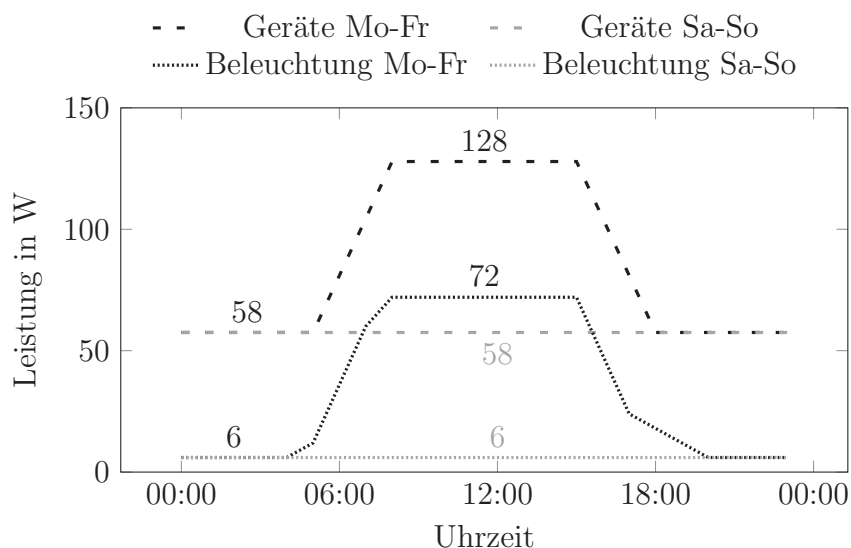


Abbildung A.46: Beleuchtungs- und Geräteprofile für einen Kopiererraum mit einer Fläche von 8 m^2

Außenbeleuchtung Während der Nachtstunden sind die Wege rund um das Krankenhaus und durch den zugehörigen Park sowie einige Fassaden beleuchtet. Die beleuchteten Wege umfassen etwa 2 km Weglänge. Die Länge der beleuchteten Fassaden beträgt ca. 85 m. Die Einschaltzeiten werden über einen Helligkeitssensor gesteuert. Der Energieverbrauch der Außenbeleuchtung wurde über einen Zeitraum von drei Wochen vermessen. Während der Nachtstunden beträgt die aufgenommene Leistung konstant 6,75 kW. Die Bildung eines mittleren Profils ist hierbei nicht sinnvoll, da die Beleuchtung an jedem Tag zu anderen Zeiten ein- und ausgeschaltet wird. Ein Vergleich der Einschaltzeit mit der gemessenen Beleuchtungsleistung zu diesem Zeitpunkt zeigte, dass das Einschalten im Mittel bei einer Globalstrahlung von $3,6 \text{ W/m}^2$ erfolgte, während die Beleuchtung ab einer Globalstrahlung von $1,3 \text{ W/m}^2$ wieder ausgeschaltet wurde.

Anhang B

Fensteröffnung

Tabelle B.1: Anteil der Räume mit geöffneten Fenstern in Abhängigkeit der Außentemperatur

		Außentemperatur in °C									
		-2,2	1,9	4,0	5,0	6,5	9,0	13,0	17,6	17,7	22,0
Alle	399	0,17	0,38	0,24	0,46	0,32	0,42	0,34	0,73	0,60	0,73
Bettzimmer	109	0,18	0,39	0,32	0,58	0,45	0,48	0,44	0,86	0,95	0,88
Büro	45	0,00	-	0,16	0,31	0,19	0,40	0,30	-	0,41	0,89
Dienstzimmer	17	-	-	0,53	0,39	0,44	0,59	0,59	-	0,56	0,71
Teeküche	20	-	0,38	0,57	0,67	0,48	0,54	0,47	-	0,70	-
Lager	48	0,33	-	0,30	0,51	0,38	0,55	0,43	-	0,59	0,62
Arztzimmer	38	0,22	-	0,22	0,41	0,34	0,33	0,34	-	0,48	10,85
Behandlung	41	-	-	0,15	0,39	0,14	0,33	0,29	-	0,52	0,78
Aufenthalt	31	-	-	0,00	0,40	0,27	0,38	0,32	-	0,59	0,67
Warterraum	9	-	-	0,00	0,56	0,10	0,25	0,43	-	0,50	-
Flur	17	-	-	0,14	0,14	0,14	0,33	0,11	-	0,20	0,5
Treppenhaus	38	-	-	0,13	0,41	0,19	0,23	0,22	-	0,23	0,78

Tabelle B.2: Koeffizienten der Logit-Funktion für die Fensteröffnung in verschiedenen Raumtypen

Alle	-1,14	0,09
Bettzimmer	-1,01	0,13
Büro	-2,34	0,16
Dienstzimmer	-0,37	0,05
Teeküche	-0,14	0,04
Lager	-0,62	0,05
Arztzimmer	-1,40	0,10
Behandlung	-2,07	0,13
Aufenthalt	-1,84	0,12
Warterraum	-1,85	0,11
Flur	-2,27	0,08
Treppenhaus	-2,11	0,11

Anhang C

Sensitivitätsanalyse

C.1 Variation der Eingangswerte der Sensitivitäts- und Unsicherheitsanalyse

Tabelle C.1: Parameter der Sensitivitätsanalyse

Parameter	Min-Max	Erläuterung
Gebäudedaten		
α	0,3-0,6	Der Absorptionsgrad der Wände hängt von den verwendeten Materialien ab und steigt mit der Zeit durch Verschmutzung und Witterungseinflüsse. Werte finden sich z. B. in Clarke (2001); Hestermann und Rongen (2015).
ϵ	0,85-0,95	Materialwerte für den Emissionsgrad für Putz, Ziegel oder Stein liegen in der Größenordnung von 0,85 bis 0,95 (Clarke, 2001).
h	15-30 W/(m ² K)	Der Wärmeübergangskoeffizient an den Außenbauteilen ist abhängig von der Windgeschwindigkeit. Wird wie in dieser Arbeit ein mittlerer, konstanter Wert verwendet, resultiert eine hohe Unsicherheit. Werte für h in Abhängigkeit der Windgeschwindigkeit finden sich z. B. in Hebgen und Heck (2013) oder Zhang et al. (2004).
$U_{AW,Altbau}$	1,1-2,2 W/(m ² K)	Sind keine detaillierten Informationen zum Wandaufbau vorhanden, können die U-Werte der Außenbauteile der Gebäude über das Baualter abgeschätzt werden.
$U_{AW,Neubau}$	0,2-0,4 W/(m ² K)	
$U_{D,Altbau}$	0,8-2,6 W/(m ² K)	
$U_{D,Neubau}$	0,2-0,3 W/(m ² K)	
$U_{B,Altbau}$	1,0-2,3 W/(m ² K)	
$U_{B,Neubau}$	0,3-0,5 W/(m ² K)	
$U_{F,Altbau}$	1,5-2,9 W/(m ² K)	Die U-Werte des gesamten Fensters inklusive des Rahmens sowie die g-Werte der Verglasung differieren für neuere und ältere Gebäude und werden ebenfalls über das Baualter abgeschätzt.
$U_{F,Neubau}$	1,3-1,5 W/(m ² K)	
g_{Altbau}	0,65-0,75	
g_{Neubau}	0,60-0,70	

Parameter	Min-Max	Erläuterung
U_{IW} C_{IW}	0,5-1,5 W/(m ² K) 100- 400 kJ/(m ² K)	Da keine Angaben zum Aufbau der Innenwände im Krankenhaus vorliegen, wurden für den U-Wert und die Wärmekapazität pro Wandfläche jeweils eine breite Spanne angenommen, angelehnt an Beispiele in Gierga und Staniszewski (2014); VDI 6007-1.
C_{AW} C_D C_B	50-500 kJ/(m ² K) 50-500 kJ/(m ² K) 50-500 kJ/(m ² K)	Die Spanne der Werte wurde ausgewählt in Anlehnung an die in VDI 2078 angegebenen Werte für leichte bis schwere Gebäude sowie die typischen Wandaufbauten nach GERTEC (2007).
$T_{Erdreich}$ R_v	±1 °C ±30 %	Die virtuelle Temperatur des Erdreiches und der Wärmedurchlasswiderstand der virtuellen Schicht berechnen sich nach DIN 13370:2008-08 in Abhängigkeit der mittleren Innen- und Außentemperaturen sowie den Parametern des Kellerbodens und des Erdreichs. Die Unsicherheit ist sowohl durch die monatlichen Mittelwerte, als auch die Unsicherheiten der Eingangsparameter in das Berechnungsverfahren gegeben.
$R_{Erdreich}$ $C_{Erdreich}$	0,14- 0,33 W/(mK) 2-3 MJ/(m ³ K)	Für den Wärmeübergangswiderstand und die Wärmekapazität des Erdreiches sind in DIN 13370:2008-08 verschiedene Werte in Abhängigkeit der Bodenart gegeben.
$n_{Inf,Altbau}$ $n_{Inf,Neubau}$	0,5-1 0,1-0,5	Die Infiltration über Undichtigkeiten in der Gebäudehülle kann nicht mit vertretbarem Aufwand gemessen werden. Die mögliche Spanne wurde aufgrund von Erfahrungswerten abgeschätzt.
f_S	±25 %	Der Schatten wird in einer externen Excel-Anwendung als verschatteter Anteil der Fassade berechnet. Somit kann es zu Abweichungen für einzelne Zonen kommen.
Geometrie		
h_{Etage}	±2 %	Die Angaben zur Höhe der Etagen konnten aus Raumplänen entnommen werden.
a_R	0,18-0,32	Der Rahmenanteil des Fensters wird aus Fotos abgeschätzt, sodass eine Unsicherheit resultiert, da keine genauen Messungen durchgeführt wurden.
A_{AW}	±15 %	Die Außenwandfläche wird über die aus Plänen abgemessene Außenwandlänge bestimmt. Durch manuelles Ablesen ist eine Fehleranfälligkeit gegeben.
A_F	±17 %	Einzelne Fenster wurden vermessen, der Rest aus Fotos abgeschätzt, was zu einer erhöhten Unsicherheit führt.

Parameter	Min-Max	Erläuterung
A_{IW}	$\pm 30\%$	Um den Aufwand für die Datenaufnahme gering zu halten, wurden die Innenwandflächen nur grob abgeschätzt.
C_M	10-100 kJ/(m ² K)	Die Wärmekapazität des Mobiliars lässt sich nur schwer abschätzen und in der Literatur lassen sich nur wenige und stark differierende Angaben finden (z. B. Madsen, 2012; Raftery et al., 2014).
$f_{\dot{V},Z}$	$\pm 50\%$	Der Luftaustausch zwischen den Zonen ist von vielen Faktoren abhängig und wird basierend auf Untersuchungen von Foord und Lidwell (1975) abgeschätzt.
Raumkonditionierung		
T_{Heiz}	21,5-23 °C	Die Sollraumtemperaturen während der Heiz- und Kühlperiode werden durch den Nutzer festgelegt. Punktuelle Messungen und Erfahrungswerte dienen als Anhaltspunkt, jedoch ist eine breite Spanne an Raumtemperaturen möglich.
$T_{Kühl}$	23-25 °C	
$f_{\dot{V}_{Zu}}$	$\pm 30\%$	Die der einzelnen Zone zugeführten und aus der Zone abgeführten Luftmengen sind in den Planungsunterlagen dokumentiert. Die tatsächliche Luftmenge kann jedoch große Abweichungen dazu aufweisen.
$f_{\dot{V}_{Ab}}$	$\pm 30\%$	
Nutzung		
\dot{Q}_P	$\pm 40\%$	Die Wärmeabgabe durch Geräte, Beleuchtung und Personen wird aus stichprobenartigen Erhebungen und Messungen bestimmt. Dies führt zu einer hohen Unsicherheit dieser Lasten.
\dot{Q}_G	$\pm 35\%$	
\dot{Q}_B	$\pm 35\%$	
$a_{Lüft}$	-0,5-3	Die Logit-Koeffizienten aus Gleichung 5.1 zur manuellen Lüftung sind wie alle nutzungsabhängigen Variablen einer hohen Unsicherheit unterworfen. Die Werte wurden stichprobenartig erhoben und stellen einen Mittelwert aller Räume eines Raumtyps dar.
$b_{Lüft}$	-0,01-0,15	
a_{kon}	0,2-0,95	Der konvektiv übertragene Anteil der inneren Wärmequellen variiert mit der Art und Zusammensetzung der Lasten. Der konvektive Anteil der Geräthewärme liegt zwischen 60 und 90 %, der Beleuchtungswärme zwischen 0 und 50 % und der Personenwärme bei etwa 67 % (ASHRAE, 1997; Chantrasrisalai und Fisher, 2007; Hosni et al., 1999).
Anlagendaten		

Parameter	Min-Max	Erläuterung
$P_{Ventilator}$	$\pm 10\%$	Die Leistung des Ventilators im Auslegungspunkt kann vom Typenschild abgelesen werden. Diese Leistung wird auf dem Teststand bestimmt, kann im realen Betrieb jedoch abweichen. Die Regelung des Ventilators in von dem Auslegungszustand abweichenden Betriebszuständen erfolgt im Modell über Kennlinien, die ebenfalls unsicherheitsbehaftet sind.
RWZ	0,5-0,7	Für die in Krankenhäusern in der Regel eingesetzten Kreuzstrom- oder Kreislaufverbund-Wärmeübertrager liegt die Rückwärmezahl zwischen 50 und 70 %. (Schmid et al., 2013)
t_{RLT}	± 2 h	Die Betriebszeiten der RLT-Anlagen wurden mündlich vom Personal übermittelt, Messungen zeigten jedoch zum Teil Abweichungen der angegebenen Zeiten.
T_{Zul} T_{Abl}	$\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ $\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$	Die Zu- und Ablufttemperatur ist in vielen Fällen aus der GLT ablesbar. Vergleichsmessungen zeigten jedoch Fehler der GLT-Messung von bis zu 1 K. Zudem werden die Temperaturen bei Unbehaglichkeit der anwesenden Personen geändert, sodass im Jahresverlauf kein konstanter Wert auftritt.
$P_{Nenn,KM}$	$\pm 10\%$	Die elektrische Nennleistung der Kältemaschine kann der technischen Dokumentation entnommen werden. Es handelt sich dabei um Prüfstandswerte, die im realen Betrieb abweichen können.
EER	$\pm 10\%$	Die Leistungszahl der Kältemaschine wird in der technischen Dokumentation angegeben. Da diese von den Betriebsbedingungen abhängt, ist sie einer Unsicherheit unterworfen.
$V_{Speicher}$	$\pm 2\%$	Das Volumen des Kältespeichers ist in den Planungsunterlagen verzeichnet und weist daher eine geringe Unsicherheit auf.
$A_{Speicher}$	$\pm 10\%$	Die Oberfläche des Speichers kann über die Form des Speichers und die Oberfläche abgeschätzt werden, da keine genauen Angaben zur Geometrie vorliegen, verbleibt eine Unsicherheit.
$U_{Speicher}$	0,2-1 W/(m ² K)	Die Spanne des U-Wertes des Kältespeichers wurde aus gängigen Dämmmaterialien und Dämmstärken für Kältespeicher ermittelt (TWL, 2012; Wikora, 2015).

Parameter	Min-Max	Erläuterung
$T_{V,K}$	± 1 K	Die Kaltwassertemperatur ist häufig über die GLT oder die Anlagendokumentation ermittelbar. Bei nicht-dokumentierten Änderungen oder ungenauen Messgeräten können diese jedoch fehlerhaft sein.
$T_{RK,KM}$	30-45 °C	Da keine Angaben zur Rückkühltemperatur der Kältemaschine vorlagen, unterliegt diese einer hohen Unsicherheit.

C.2 μ^*/σ -Diagramme für die Modelle mit Altbaustandard

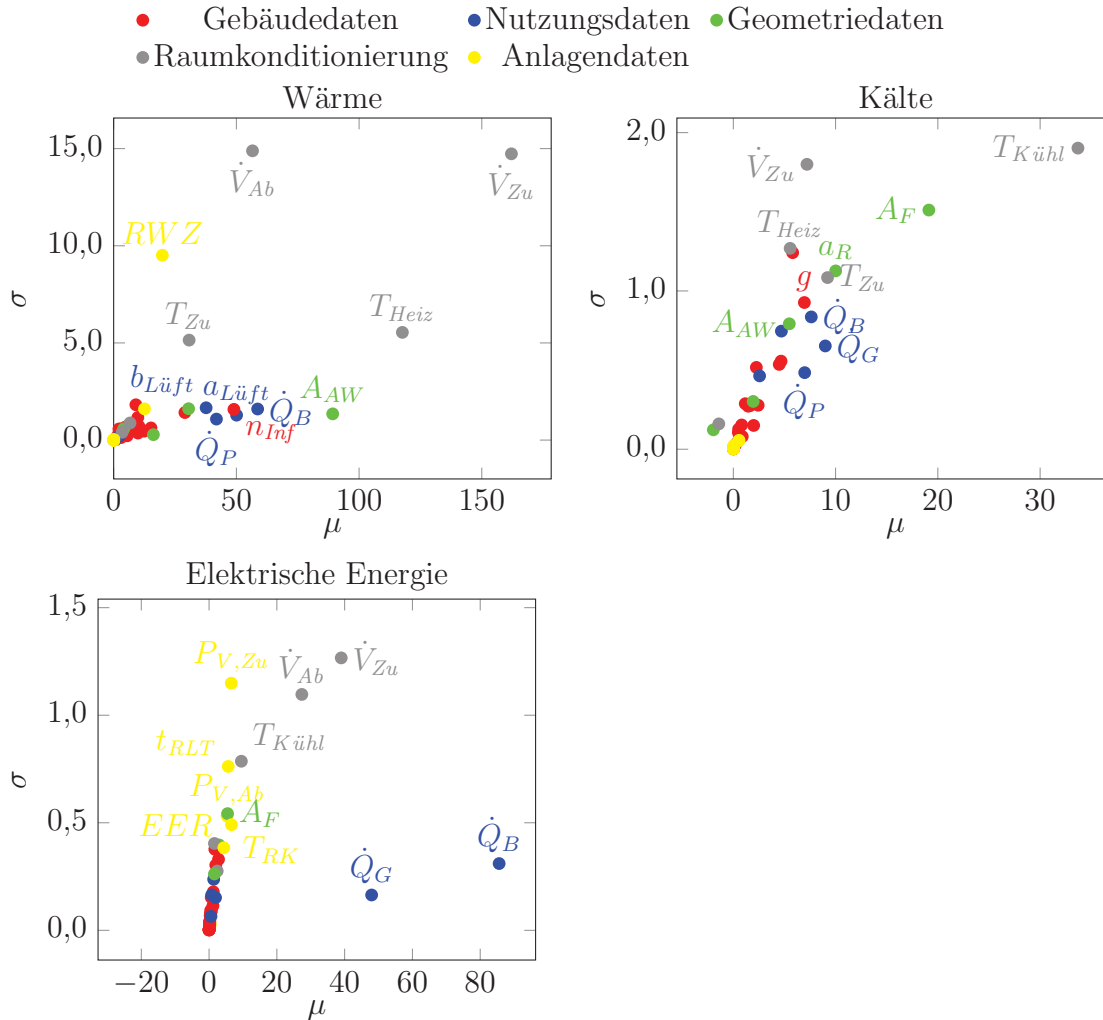


Abbildung C.1: Ergebnisse des Screenings des Wahlleistungsgebäudes mit Altbaustandard und geringer Unsicherheit der U-Werte

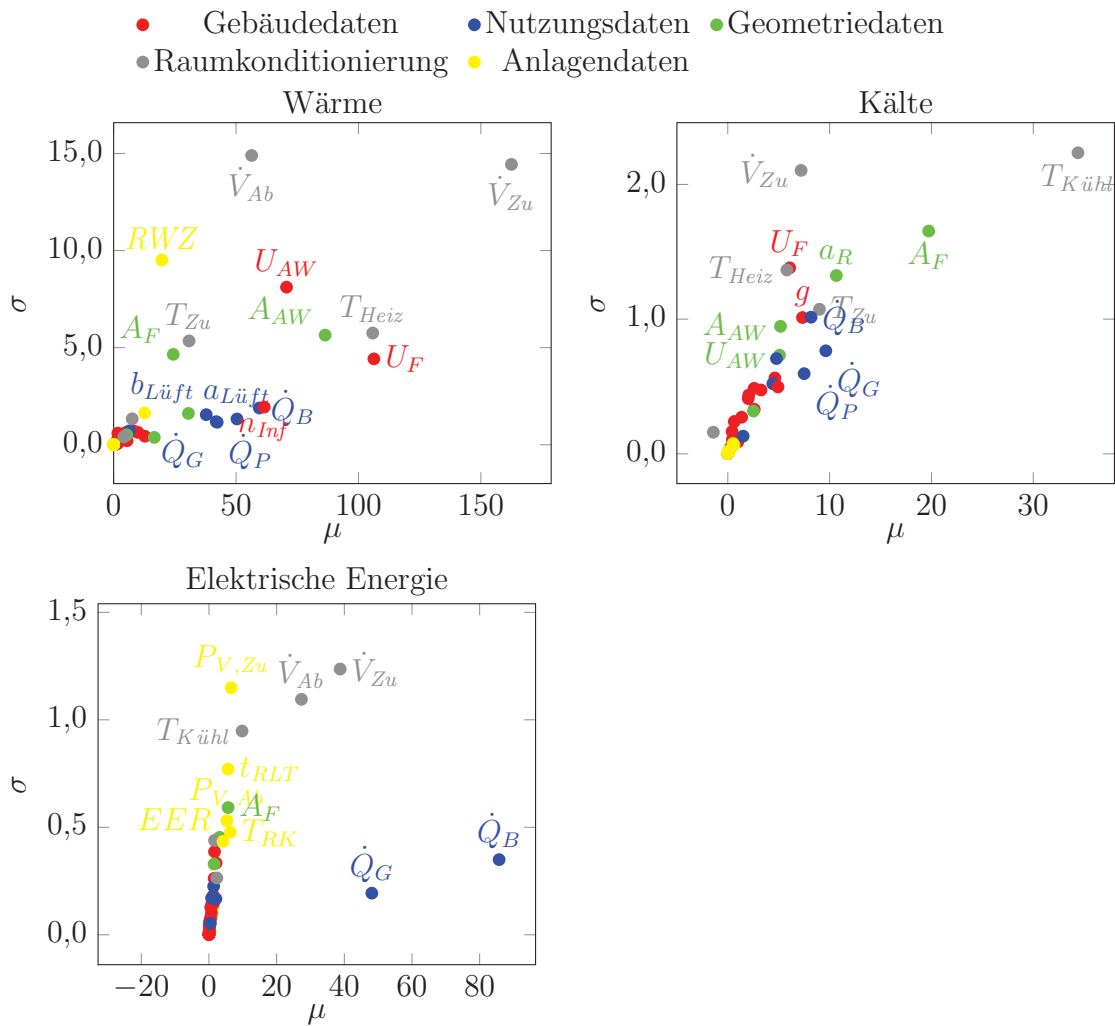


Abbildung C.2: Ergebnisse des Screenings des Wahlleistungsgebäudes mit Altbaustandard und hoher Unsicherheit der U-Werte

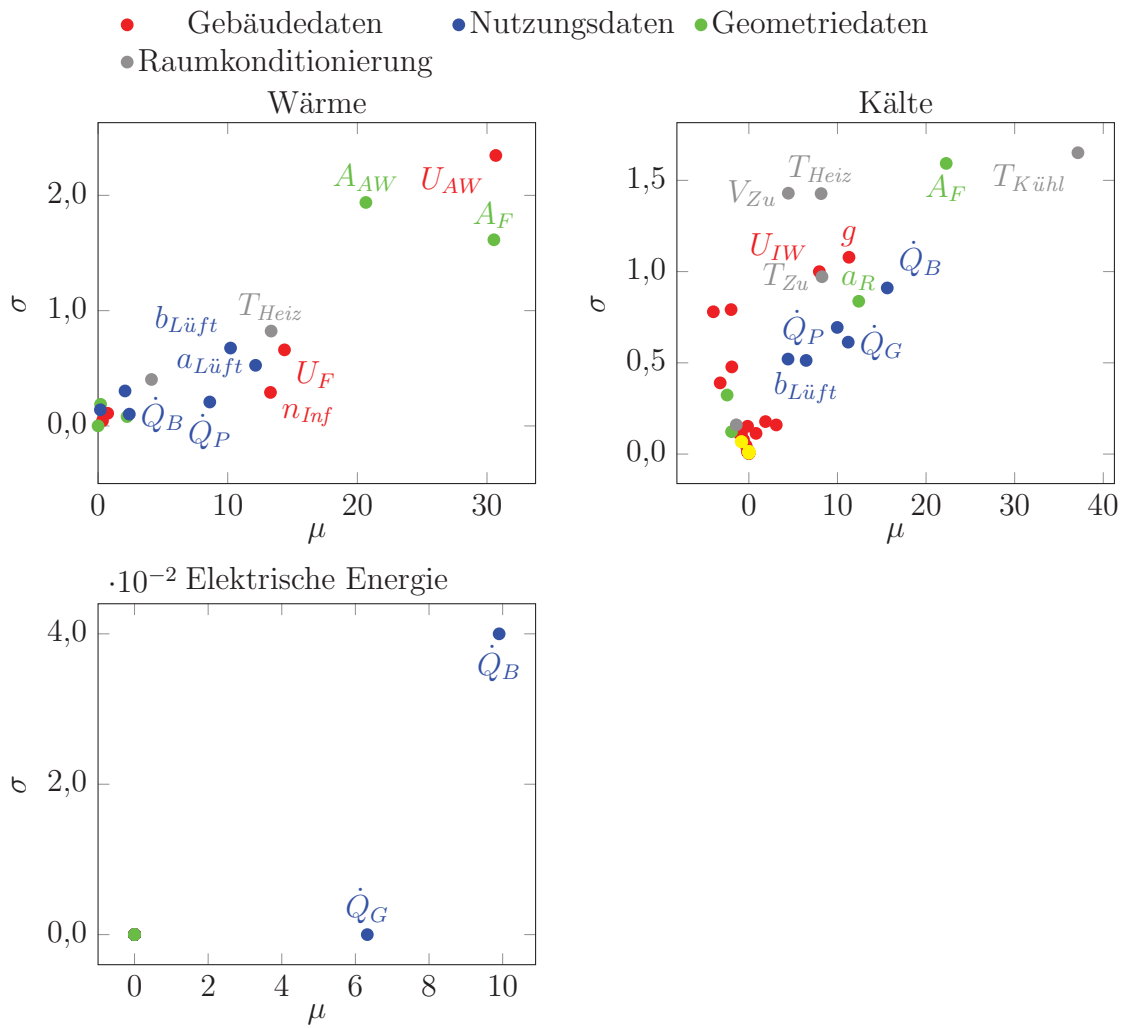


Abbildung C.3: Ergebnisse des Screenings der Bettenstation

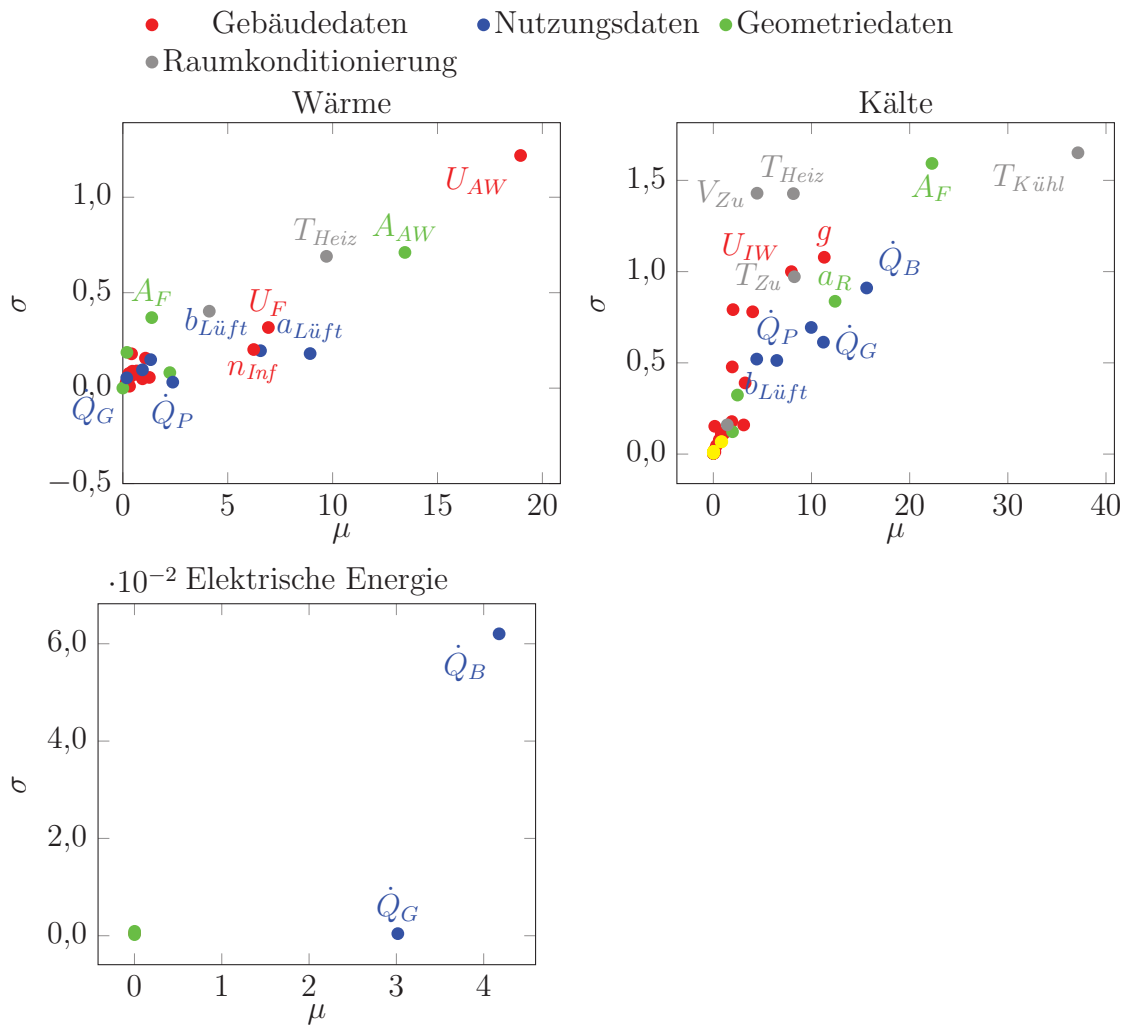


Abbildung C.4: Ergebnisse des Screenings des Bürotrakts