Die approbierte Originalversion dieser Diplom-/Masterarbeit ist in der Hauptbibliothek der Technischen Universität Wien aufgestellt und zugänglich.
http://www.ub.tuwien.ac.at

The approved original version of this diploma or master thesis is available at the main library of the Vienna University of Technology.
http://www.ub.tuwien.ac.at/eng

TECHNISCHE UNIVERSITÄT WIEN
Vienna University of Technology

Ao.Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Martin Gröschl

DIPLOMARBEIT

Bewertungsmethode für Energieeffizienzmaßnahmen im Gebäudesektor

Ausgeführt am Institut für Angewandte Physik
der Technischen Universität Wien

unter der Anleitung von
Ao.Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Martin Gröschl
E134 - Institut für Angewandte Physik

durch

Klemens Schlögl, BSc
1125698

Familienplatz 8/8
1160 Wien

Ort, Datum

Klemens Schlögl, BSc

Danksagung

Ich möchte mich an dieser Stelle bei meinem Betreuer, Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Martin Gröschl, für die freundliche und sehr hilfreiche Unterstützung während des gesamten Prozesses der Erstellung meiner Diplomarbeit herzlich bedanken.

Bedanken möchte ich mich auch beim Team der e7 Energie Markt Analyse GmbH, welches mich insbesondere bei der Auswahl der Beispielmaßnahmen und der Beispielgebäude unterstützt hat. Ein weiterer Dank gilt in diesem Zusammenhang auch all jenen Gebäudebetreibern, welche mir eine anonyme Verwendung der notwendigen Daten für die Beispielbewertungen im Rahmen der Diplomarbeit gestattet haben.

Ein Dank geht auch an Prof. Dr. Herbert Formayer vom Institut für Meteorologie der Universität für Bodenkultur und die Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik für die freundliche Bereitstellung der verwendeten meteorologischen Messdaten.

Ein persönlicher, tiefer Dank geht an meine Eltern, welche mich unermüdlich und mit größter Hingabe auf meinem Bildungsweg liebevoll unterstützt und mir diesen erst ermöglicht haben, sowie an meinen Bruder für seine unzähligen hilfreichen Ratschläge und sein gutes Vorbild. Ich möchte diese Arbeit meiner zukünftigen Ehefrau widmen, die mir immer zur Seite steht, sich stets über meine Höhen im Studium mit mir gefreut, mich immer wieder motiviert hat und die eine oder andere Tiefe mit ihrem Humor und stets den richtigen Worten alt aussehen ließ.

Zusammenfassung

Das Themenfeld „Energieeffizienz“ gewinnt aus Gründen des Klimaschutzes, der Importabhängigkeit von Energieträgern, der Beschränktheit bestimmter Rohstoffe und aus wirtschaftlichen Gründen immer mehr an Bedeutung. Die Europäische Union räumt dieser im Rahmen der „Energieeffizienz-Richtlinie“ große Bedeutung ein, sodass die nationalen Parlamente in der Union entsprechende Ziele zur Erhöhung der Energieeffizienz beschlossen haben.

Diese Arbeit beschreibt eine Methode, mit deren Hilfe der Einspareffekt von Energieeffizienzmaßnahmen im Gebäudebereich bewertet werden kann. Diese trägt dem Umstand Rechnung, dass in Bewertungsprozessen unsichere Einflussgrößen die nach Maßnahmenumsetzung eingesparte Energiemenge wesentlich beeinflussen können. Einflussparameter wie die Außentemperatur oder die Betriebszeit einer Anlage sind nicht über die Lebensdauer einer Maßnahme vorhersagbar, können allerdings erheblichen Einfluss auf den Energieverbrauch haben. Daher unterscheidet die vorgestellte Methode zwischen festen, bekannten Einflussparametern, und unsicheren Modellparametern, welchen eine statistische Verteilung zugeordnet wird. Mittels Monte-Carlo-Simulation wird eine Verteilung des Einspareffekts gewonnen, sodass anstelle eines Einzahlwerts ein entsprechendes Intervall das Ergebnis der Bewertung darstellt, was das Ergebnis wesentlich robuster macht. Im Zusammenhang mit Bewertungsmethoden spielen die Definition und Normalisierung des Vergleichsszenarios, der Baseline, eine bedeutende Rolle, was in dieser Arbeit allgemein und anhand von Beispielen diskutiert wird.

Im Folgenden wird die Methode zunächst allgemein beschrieben und anschließend ihre Anwendbarkeit im Rahmen von ausgewählten Beispielmaßnahmen demonstriert. Dabei zeigte sich, dass Modellparametern, welche nicht näher bekannt sind, aufgrund der Durchführung von Monte-Carlo-Simulationen eine geeignete statistische Verteilung basierend auf realistischen Annahmen zugewiesen werden kann, sodass die Methode selbst bei geringer Datenlage hilfreiche Ergebnisse bereitstellt. Darüber hinaus kann mit ihrer Hilfe der Einfluss möglicher „Rebound-Effekte“ abgeschätzt werden und es können jene Einflussparameter erkannt werden, welche über den Einsparerfolg einer Energieeffizienzmaßnahme entscheiden.

Die behandelten Beispielmaßnahmen für die betrachtete Gebäudestichprobe würden nach Umsetzung in Summe zu einer jährlichen Einsparung von rund 1 200 t CO_2 führen.

Abstract

As a consequence of climate protection, dependances on imports of energy resources, limited availability of non-renewable energy carriers and due to economic reasons, energy efficiency has gained in importance. The European Union even emphasizes its importance in a directive leading national parliaments to pass laws to increase energy efficiency.

This thesis describes a method to evaluate the achievable energy savings by measures in the building sector. The fact that uncertain factors can significantly affect the calculated amount of saved energy is taken into account by implementation of energy efficiency measures. Influencing quantities, such as outside temperature or the operating time of an energy consuming system, cannot be predicted precisely throughout the lifespan of a measure. Consequently, the introduced method distinguishes between fixed model parameters, which stay the same throughout the simulation and uncertain model parameters, which are identified by an appropriate statistical distribution. Via a Monte-Carlo-Simulation a distribution of the achievable energy savings can be evaluated. Instead of delivering a single quantity, the introduced method provides a range of variations for the expectable energy savings leading to a much more robust result. The specification and normalization of the baseline plays a very important role in the process of evaluating energy savings of an energy efficiency measure, which will be discussed both in general and on the basis of case studies.

In the following, the above mentioned method will be described in general and its applicability will be shown using a real dataset of selected buildings. It will be shown that if required model parameters are unknown for a building, it is possible to estimate them using an appropriate statistical distribution and applying it in the Monte-Carlo-Simulations. Consequently, the method leads to useful results even if there is little knowledge of required model parameters. Moreover, the influence of possible “rebound-effects” can be estimated as well. Finally, using the method provides information, which influencing quantities have the highest impact on the achievable savings.

If all in this thesis presented examples of energy efficiency measures were implemented, about 1 200 tons of CO_2 emissions could be saved per year.

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung ... 3

1.1 Hintergrund und Motivation ... 3

1.2 Forschungsfragen, Zielsetzung und Methodik der Arbeit ... 6

1.3 Der Begriff „Energieeffizienz“ ... 9

2 Grundlagen ... 14

2.1 Begriffsdefinitionen und –erklärungen ... 14

2.2 Das Bundes-Energieeffizienzgesetz ... 17

2.3 Grundbegriffe zur Ermittlung von Energieeinsparungen ... 18

2.3.1 Elementareinheit für Maßnahmen und Systemgrenze ... 18

2.3.2 Baseline ... 19

2.3.3 Normalisierung ... 19

2.3.4 Technische Wechselwirkungen ... 20

2.3.5 Lebensdauer einer Energieeffizienzmaßnahme ... 20

2.3.6 Rebound-Effekt ... 22

2.4 Statistische Grundlagen ... 22

2.4.1 Regressionsanalyse ... 22

2.4.2 p-Wert, Signifikanztests und Informationskriterien ... 25

2.4.3 Korrelationskoeffizient nach Bravais-Pearson ... 27

2.4.4 Datendarstellung mittels Boxplot ... 28

2.4.5 Statistische Verteilungen ... 29

2.5 Monte-Carlo-Simulation ... 31

2.6 Klimanormalperiode und Gradtageszahl ... 35

3 Methodik ... 37

3.1 Darstellung der Analysemethode ... 37

3.2 Baseline-Ermittlung und Normalisierung ... 39

3.2.1 Normalisierung von Energieverbrauchsdaten bei geringem Datenbestand ... 41

3.2.2 Normalisierung von Energieverbrauchsdaten durch ein Regressionsmodell ... 47

3.3 Simulationsmodelle für die Berechnung des Einspareffekts ausgewählter Maßnahmen 54
3.3.1 Beleuchtung 55
3.3.2 Lüftung 73
3.3.3 Kälte- und Pumpsysteme 98
4 Ergebnisse 107
4.1 Ergebnisse der Methodenanwendung 107
4.2 Ergebnisse der Befragung gelisteter Energieauditoren 113
4.3 Ergebnisse des Methodenvergleichs 117
5 Diskussion 119
6 Literaturverzeichnis 123
7 Abbildungsverzeichnis 126
8 Tabellenverzeichnis 130
9 Abkürzungsverzeichnis und Anmerkungen 131

1 Einleitung

1.1 Hintergrund und Motivation

Die Fähigkeit, natürliche Primärenergiequellen in handhabbare Energieformen wie elektrische Energie, Wärmeenergie oder mechanische Energie umwandeln zu können, erlaubt es der Menschheit der Moderne auf eine Vielzahl von technischen Anwendungen zurückgreifen zu können. Seit dem Beginn der Industrialisierung stieg die Nachfrage nach nutzbarer Energie weltweit sukzessive an. Insbesondere wohlhabende Individuen erfreuen sich eines hohen Wohnkomforts, nachdem Heizsysteme in der kalten Jahreszeit und Klimaanlagen an sommerlichen Tagen ein angenehmes Raumklima schaffen. Der globalen Mobilität sind aufgrund verschiedenster verfügbarer Verkehrsmittel kaum noch Grenzen gesetzt. Die Möglichkeiten des Technologisierungsbooms der letzten Jahrzehnte ließen kaum einen Lebensbereich unberührt und bescherten der Menschheit eine weltweite Vernetzung, welche durch unterschiedliche Kommunikationssysteme erreicht werden konnte. All dies hat zum einen zu einer allgemeinen Steigerung der Lebensqualität beigetragen, zum anderen den globalen Energiehunger jedoch sehr stark in die Höhe getrieben.

Die Tatsache, dass dieser insbesondere durch fossile Energieträger gestillt worden ist und wird, hat dazu geführt, dass die Menschheit vor „beispiellosen Herausforderungen, die auf verstärkte Abhängigkeit von Energieimporten, knappe Energieressourcen sowie das Erfordernis, dem Klimawandel Einhalt zu gebieten“ ([1], S.1) steht. Die Vergangenheit hat gezeigt, dass ein Mangel der Fähigkeit, den eigenen Energiebedarf aus heimischen Quellen zu jeder Zeit decken zu können, zu einer politischen Abhängigkeit führen kann. Abbildung 1 zeigt die zeitliche Entwicklung der Importabhängigkeit der Energieversorgung Österreichs und der Europäischen Union seit 1990, wobei für die 28 Mitgliedsstaaten eine steigende Tendenz erkennbar ist. Die Tatsache, dass die Europäische Union nur etwa die Hälfte ihres Energieverbrauchs aus eigener Kraft decken kann, wirkt hierbei gravierender als derselbe Sachverhalt auf nationaler österreichischer Ebene, nachdem sich die Mitgliedsstaaten gegenseitige Solidarität zur Gewährleistung der Energieversorgung im Rahmen des Vertrags von Lissabon zugesichert haben (vgl. [2], Artikel 176a). Eine politische Abhängigkeit der Union aufgrund von Importabhängigkeit von Energieträgern kann nur dann vermieden werden, wenn die Mitgliedsstaaten gemeinsam betrachtet ihren gesamten Energieverbrauch decken können.

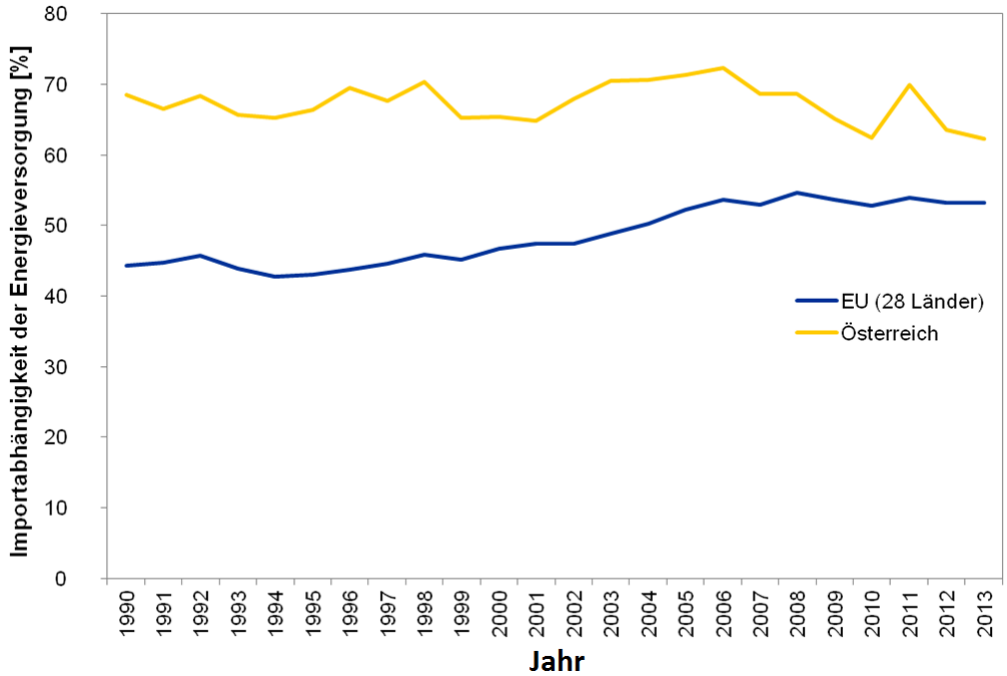

Abbildung 1: Vergleich der Energieabhängigkeit von Österreich und der Europäischen Union [3]

Neben der Frage der Versorgungssicherheit ist allgemein zu bedenken, dass insbesondere fossile Energieträger eine begrenzte Ressource darstellen und damit eine Umstrukturierung des Energiemarkts ebenso unausweichlich scheint, wie das Bemühen, dessen Wachstum durch adäquate Maßnahmen in einem gewissen Rahmen zu halten.

Darüber hinaus ist mit der Deckung des Ressourcen- und Energiebedarfs auch eine Reihe von sozialen und ökologischen Auswirkungen auf die Umwelt verbunden. Die Verbrennung von fossilen Energieträgern in Kraftwerken oder Kraftfahrzeugen führt in aller Regel zur Freisetzung von gesundheitsbeeinträchtigenden Substanzen, wie etwa Feinstaub, Stickoxiden oder Kohlenmonoxid und Schwermetallen. Darüber hinaus kommt es bei deren Förderung und Nutzung zum Ausstoß von Treibhausgasen wie CO_2 oder CH_4, welche zu einem anthropogen bewirkten globalen Klimawandel beitragen, der mit einer Erhöhung der globalen Durchschnittstemperatur und einem Abschmelzen der Polkappen verbunden ist und viele Ökosysteme der Erde aus ihren sensiblen Gleichgewichten bringen könnte.

Das Abkommen von Paris, welches am 12. Dezember 2015 als Resultat der 21. Klimakonferenz der Vereinten Nationen von 195 Staaten ausverhandelt und angenommen worden ist, trägt diesen Umständen entsprechend Rechnung. Die Übereinkunft hat die zentrale Zielsetzung, „die globale Antwort auf die Gefahr des Klimawandels zu verstärken“ ([4], Article 2, S.22). und sieht unter anderem vor, den Anstieg der globalen Durchschnittstemperatur auf „weit unterhalb von 2 °C gegenüber dem Level der vorindustriellen Zeit“ ([4], Article 2, S.22) zu halten. Abbildung 2 zeigt einen Vergleich der CO_2-Emissionen von Österreich, dem EU-Durchschnitt und Entwicklungsgebieten. Dabei wird ersichtlich, dass höher entwickelte Gebiete deutlich gewichtiger zum Treibhausgasausstoß

beitragen als Entwicklungsländer, andererseits letztere aber in den letzten Jahren einen Anstieg der Emissionen zu verbuchen haben.

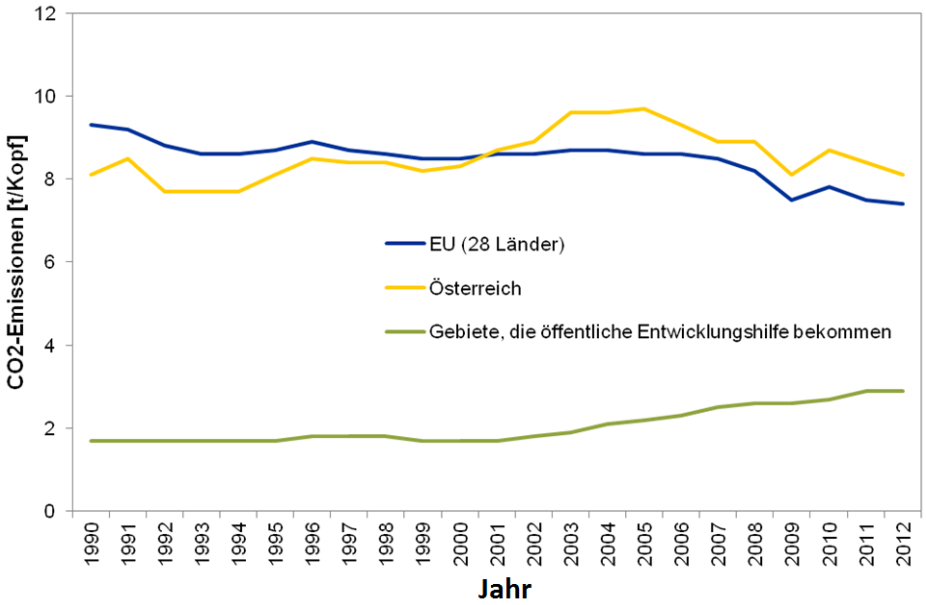

Abbildung 2: Vergleich der CO2-Emissionen von Österreich, dem EU-28-Durchschnitt und Entwicklungsgebieten [5]

Die genannten Aspekte haben dazu geführt, dass Energie verstärkt als begrenzte Ressource angesehen wird. Die Ziele, die Importabhängigkeit zu senken, den Energiebedarf langfristig und nachhaltig decken zu können, sowie die Emission von Treibhausgasen gegen Null gehen zu lassen, sind wohl nur zu erreichen, wenn die zur Verfügung stehenden Primärenergiequellen möglichst effizient genutzt werden. Dies erfordert eine deutliche Erhöhung der Effizienz des globalen Energiesystems, wobei dies sowohl die Energieumwandlung, als auch die Endenergienutzung betrifft.

Folglich hat die Europäische Union das Themenfeld Energieeffizienz im Rahmen der EU-Richtlinie 2012/27/EU des Europäischen Parlaments und des Rates, welche in Österreich durch das Bundes-Energieeffizienzgesetz umgesetzt worden ist, „in den Mittelpunkt der Energiestrategie der Union bis 2020 gestellt“ ([1], S.1) und durch ein rechtlich verbindliches Ziel, nämlich eine Steigerung der europäischen Energieeffizienz um 20 % gegenüber einer Trendentwicklung ohne gezielte Anstrengungen, ihre Mitgliedsstaaten auch zu nachweislichen Handlungen verpflichtet. Neben dieser allgemeinen Zielsetzung wird auch der Gebäudebestand als „Einezlsektor mit dem größten Energieeinsparpotenzial“ ([1], S.3) besonders hervorgehoben.

Die Zielsetzungen der Europäischen Union einerseits und die legislative, nationale Verpflichtung zur Steigerung der Energieeffizenz auf Basis des Bundes-Energieeffizienzgesetzes andererseits, erfordern eine Methode, die Energieeinsparung einzelner Maßnahmen mit ausreichender Genauigkeit und angemessener Qualität berechnen zu können. Letztlich ist das Erreichen des Ziels der Europäischen Union, die Energieeffizienz um 20 % zu steigern bzw. den Primärenergieverbrauch im Jahr 2020 unter

einem Wert von 1 474 Millionen Tonnen Rohöleinheiten zu halten, geeignet zu verifizieren (vgl. [1], S.1).

Die Verfügbarkeit der Bewertung von Energieeffizienzmaßnahmen bildet sowohl eine Entscheidungsgrundlage im Vorfeld, ob eine konkrete Maßnahme den gewünschten Rahmenbedingungen genügt und daher umsetzbar ist, als auch die Möglichkeit, das Erreichen der gesetzlich festgelegten Einsparverpflichtung nachzuweisen. Der Bedarf nach einer repräsentativen Bewertungsmethode für Energieeffizienzmaßnahmen motiviert diese Diplomarbeit, in welcher eine solche erarbeitet werden soll. Dabei wird insbesondere der Gebäudesektor in den Fokus der Arbeit gerückt und die betrachtete Methode an konkreten Einzelfällen erprobt.

1.2 Forschungsfragen, Zielsetzung und Methodik der Arbeit

Entsprechend der dargestellten Motivationspunkte ergeben sich für die Arbeit die folgenden konkreten Forschungsfragen:

- **Wie kann der Energieeinspareffekt von Energieeffizienzmaßnahmen im Gebäudesektor bewertet werden?**

Als Antwort auf diese Frage soll eine Berechnungsmethode vorgestellt werden, mit deren Hilfe eine Bewertung verschiedener Energieeffizienzmaßnahmen erfolgen kann. Für den konkreten Anwendungsfall soll das Bewertungsergebnis eine Entscheidungsgrundlage darstellen, ob die Umsetzung der untersuchten Maßnahmen den gewünschten Rahmenbedingungen genügt und damit durchgeführt werden sollte. Die methodische Grundlage dieses Prozesses stellt eine Auswahl einschlägiger Normen, fachspezifische Literatur und ein auf Expertenmeinungen basierender Praxisbezug dar. Grundbegriffe werden insbesondere in Einklang mit der europäischen Norm zur harmonisierten Berechnung und Begriffsdefinition für Energieeinsparberechnungen, welche in Österreich als „ÖNORM EN 16212 - Energieeffizienz und -einsparberechnungen – Top-Down- und Bottom-Up-Methoden“ verfügbar ist, definiert. Nachdem der Fokus auf der Bewertbarkeit einzelner, ausgewählter Maßnahmen liegt, folgt die Methodik dem Bottom-Up-Prinzip.

- **Wie werden grundsätzlich Energieeinspareffekte in Österreich aktuell berechnet und bewertet?**

Energieeffizienzanalysen und Energieberatungen stellen Themenfelder dar, welche bereits seit Jahren im öffentlichen Interesse stehen und zu welchen ein entsprechender Markt vorhanden ist. Insofern ist anzunehmen, dass es bereits verschiedene Methoden zur Bewertung des Einspareffekts von Energieeffizienzmaßnahmen gibt. Um die Forschungsfrage, wie in Österreich Energieeinsparberechnungen vorgenommen werden, beantworten zu können, ergeht ein Online-

Fragebogen an die Energieauditoren, welche für den Bereich Gebäude gemäß dem Bundes-Energieeffizienzgesetz gelistet und befugt sind, gesetzeskonforme Maßnahmenbewertungen durchzuführen.

- **Wie sehr unterscheiden sich die Berechnungsergebnisse der im Rahmen der Arbeit erarbeiteten Methode von jenen gemäß der Methodik der Richtlinienverordnung des Bundes-Energieeffizienzgesetzes?**

Das Bundes-Energieeffizienzgesetz sieht das Erlassen einer Verordnung seitens des Bundesministers für Wissenschaft, Forschung und Wirtschaft vor, mit welcher die Tätigkeit der Nationalen Energieeffizienz-Monitoringstelle festgelegt wird (vgl. [6], S.19 §27). Deren Aufgabe liegt im Wesentlichen darin, die gesetzeskonforme Einhaltung der Verpflichtungen des Bundes-Energieeffizienzgesetzes sicherzustellen. In der Anlage 1 der verabschiedeten „Verordnung des Bundesministers für Wissenschaft, Forschung und Wirtschaft über die Richtlinien für die Tätigkeit der nationalen Energieeffizienz-Monitoringstelle (Energieeffzienz-Richtlinienverordnung)“ ist eine Reihe von Energieeffizienzmaßnahmen samt entsprechender Bewertungsmethode angeführt. Diese findet im Rahmen gesetzeskonformer Energie-Audits und gutachterlichen Berechnungen zum Nachweis des Einspareffekts von bereits umgesetzten Energieeffizienzmaßnahmen Anwendung. Für betrachtete Beispielmaßnahmen, zu welchen eine Berechnungsmethode in der Anlage 1 zur Richtlinienverordnung angegeben ist, soll ein Methodenvergleich der Bewertung erfolgen.

- **Welche unsicheren Einflussgrößen treten im Bewertungsprozess von Energieeffizienzmaßnahmen auf und wie kann die resultierende Unsicherheit des Berechnungsergebnisses quantifiziert werden?**

Im Rahmen von Contracting-Modellen, bei welchen Energiedienstleister Energieeffizienzmaßnahmen in Gebäuden nach Rücksprache mit Gebäudenutzern umsetzen und eine vertragliche Aufteilung der Kosten und Einsparungen erfolgt, trifft man häufig auf beispielhafte Bewertungen von Energieeffizienzmaßnahmen. Die dargestellten Amortisationszeiten für die Gebäudenutzer umfassen dabei häufig eine sehr lange Zeitperiode von über zehn Jahren, während die Garantie der erzielbaren Energieeinsparungen meist früher erlischt. Tabelle 1 zeigt ein Beispiel einer Einsparberechnung im Rahmen eines Energie-Contractings, wobei für die angegebenen Ergebnisse eine Garantie von 80 % angegeben wurde.

Abbildung 3 zeigt eine ökonomische Bewertung des in Tabelle 1 dargestellten Maßnahmenkatalogs gemäß der „ÖNORM M7140 – Betriebswirtschaftliche Vergleichsrechnung für Energiesysteme“, wobei zu Demonstrationszwecken ein Verbraucherpreisindex und eine nominale Preissteigerung sämtlicher Kosten von 2 % angenommen worden ist.

Das Beispiel soll verdeutlichen, dass die dargestellte Bewertung auf Annahmen beruht, welche mit einer gewissen Unsicherheit behaftet sind. In diesem Fall handelt es sich angesichts mehrerer Maßnahmen, die das Gewerk Heizung betreffen, insbesondere um eine Abhängigkeit des Einspareffekts von den jeweils auftretenden klimatischen Bedingungen. In einem strengen Winter ist die Betriebszeit der Heizungsanlage entsprechend länger und die Maßnahme erzielt höhere Einsparungen gegenüber einem ineffizienten System. Ist die Winterperiode jedoch entsprechend warm und die Anlagenbetriebszeit kurz, so tritt der gegenteilige Effekt ein. Aus der Bewertung geht die Unsicherheit der dargestellten Einspareffekte jedoch nicht hervor, sodass mit der Umsetzungsentscheidung ein gewisses Risiko verbunden ist, nachdem auch die Abschätzung von Energiepreisentwicklungen zumindest bis zu einem gewissen Grad spekulativ ist.

Tabelle 1: Beispiel einer Maßnahmenbewertung ([7], S.10)

Maßnahme	Investition [€]	Einsparung [€/a]	Einsparung [kWh/a]
Regulierung der Brenntemperatur	754	576	33 732
Neuregulierung des Brenners	14 567	4 115	240 733
Tausch des Heizkessels	79 152	5 626	329 059
Einstellung einer Nachtabsenkung	293	1 613	94 341
Ventilatortausch der Lüftungsanlage	1 916	185	10 840
DDC-Regelung für Wärmeabgabe	102 459	5 163	302 006
SUMME	199 141	17 278	1 010 711

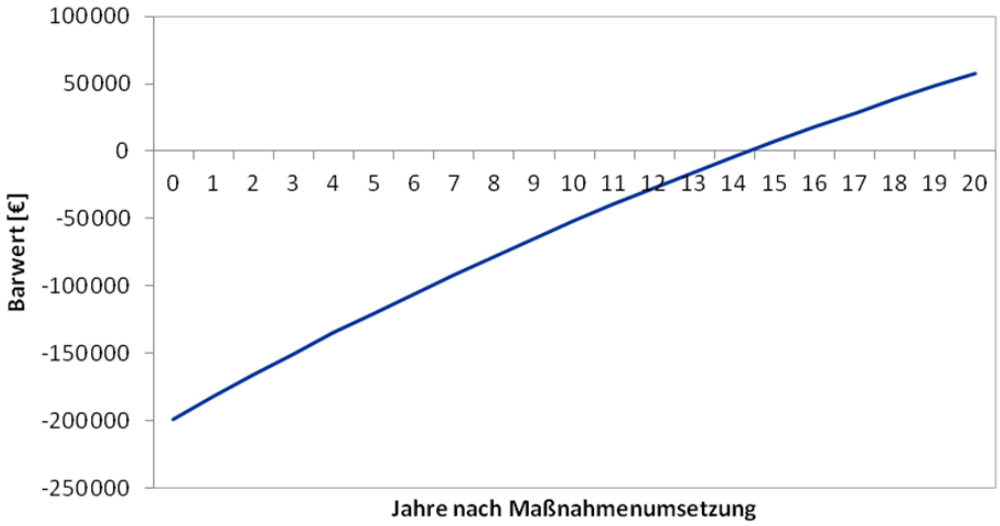

Abbildung 3: Barwertentwicklung nach ÖNORM M7140

Die Tatsache, dass Einsparberechnungen oftmals unsichere Einflussgrößen beinhalten und die Schwankungsbreite des Ergebnisses von Interesse für die Beurteilung einer Energieeffizienzmaßnahme sein kann, motiviert die dritte Forschungsfrage der Arbeit. Daher unterscheidet die Bewertungsmethode zwischen statischen Modellparametern und solchen, die mit einer gewissen Unsicherheit behaftet sind. Die Unsicherheit wird dabei in Form einer statistischen Verteilung abgebildet. Mit Hilfe von Monte-Carlo-Simulationen soll die Schwankungsbreite des Bewertungsergebnisses abgebildet werden.

Eine Ursache für Unsicherheiten des Ergebnisses und eine besondere Herausforderung im Bewertungsprozess stellt das Auftreten technischer Wechselwirkungen unterschiedlicher technischer Anlagen eines Gebäudes dar. Für Gebäude, in welchen der Wärmeeintrag beispielsweise sowohl über Heizungs-, als auch Lüftungsanlagen erfolgt, ist die Änderung von Betriebsparametern in der Regel nur dann sinnvoll möglich, wenn diese im Einklang aller betroffenen Anlagen erfolgt, um negative Effekte oder gar Mehrverbräuche zu vermeiden.

- **Welche Schwierigkeiten können bei Berechnungen des Einspareffekts von Energieeffizienzmaßnahmen auftreten?**

Die Frage der Anwendungsgrenze einer Methode ist grundsätzlich von Interesse und soll daher auch für jene dieser Arbeit gestellt werden. Diese wird im Rahmen der Methodenanwendung für eine Auswahl von Energieeffizienzmaßnahmen untersucht. Darüber hinaus werden die dabei erkannten Schwierigkeiten von Einsparberechnungen mit jenen verglichen, welche von den befragten Energieauditoren genannt werden. Bei der Auswahl der Beispielmaßnahmen wird darauf geachtet, dass die Berechnungsergebnisse in Relation zu tatsächlich beobachteten Verbrauchs- und Einsparverhalten gesetzt werden können.

1.3 Der Begriff „Energieeffizienz“

Die Europäische Union definiert den Begriff der Energieeffizienz als Verhältnis eines gewünschten Ertrags zur dafür eingesetzten Energie ([1], S.10):

$$Energieeffizienz = \frac{Ertrag\ an\ Leistung,\ \ Dienstleistungen,\ \ Waren\ oder\ Energie}{Energieeinsatz} \tag{1.1}$$

Die allgemein gehaltene Begriffsdefinition nach (1.1) zeigt deutlich, dass es sich hierbei um keine allgemein beurteilbare oder messbare Größe handelt. Betrachtet man den Begriff als derartiges Output-Input-Verhältnis, so kann man eine parallele zum Begriff des Wirkungsgrades ziehen. Dieser

basiert jedoch nicht auf dem Energiebegriff, sondern stellt das Verhältnis der umgewandelten, nutzbaren Leistung zur dem Prozess zugeführten Leistung zu einem bestimmten Betrachtungszeitpunkt dar (vgl. [8], S.25). Während beispielsweise der Wirkungsgrad von thermodynamischen Kraftmaschinen durch den Carnot-Wirkungsgrad eine nicht überschreitbare Grenze aufweist, ist dies für den Begriff der Energieeffizienz im Allgemeinen nicht der Fall. Je nach betrachtetem Prozess kann ihr Betrag etwa auch größer als eins sein.

Manchmal werden im täglichen Sprachgebrauch die Begriffe „Energieeffizienz“ und „Energiesparen“ synonym verwendet, jedoch geht aus (1.1) hervor, dass eine Energieeffizienzsteigerung nicht nur durch Reduktion des Energieeinsatzes erreicht werden kann. Wird dieser nämlich konstant gehalten, im Gegenzug allerdings der erzielbare Ertrag gesteigert, verbessert sich ebenso die Energieeffizienz des betrachteten Prozesses. Diese Betrachtungsweise ist mit dem „ökonomischen Prinzip“ vergleichbar, nach welchem der Einsatz von Mitteln, die nicht zum angestrebten Nutzen beitragen, minimiert werden (vgl. [8], S.1f).

Energieeffizienzsteigerungen können entlang der gesamten Umwandlungskette von Primär- zu Nutzenergie erreicht werden, um die jeweiligen Umwandlungsverluste zu reduzieren (vgl. Abbildung 4). Manchmal wird auch der alleinige Austausch des Primärenergieträgers (beispielsweise der Umstieg von fossilen Energieträgern zu Holz) als Energieeffizienzmaßnahme bezeichnet, was allerdings nur dann zulässig ist, wenn in diesem Zusammenhang der erforderliche Energieeinsatz zum Erreichen des gewünschten Ertrags an Leistung reduziert wird. Im Rahmen der Arbeit wird der Fokus auf den Endenergie- und Nutzenergiesektor gelegt.

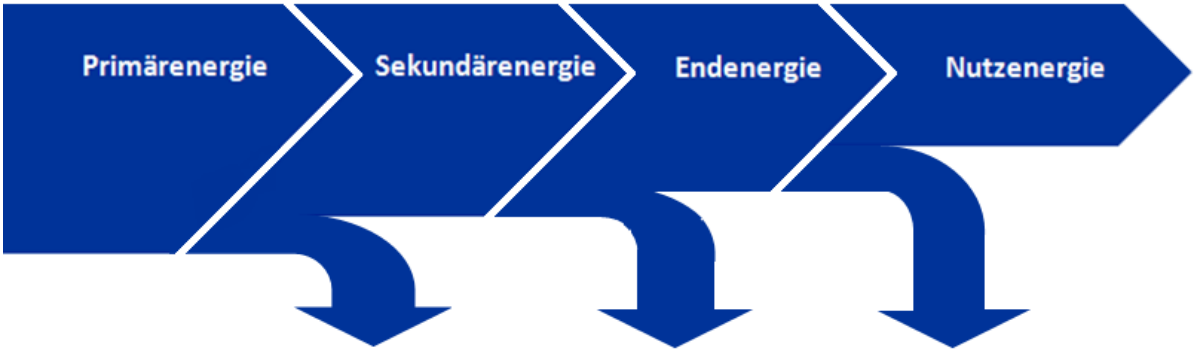

Abbildung 4: Umwandlungskette der Energieversorgung mit qualitativer Darstellung der Verluste

Die Definition der Energieeffizienz nach (1.1) lässt keine allgemeine Beurteilung zu, sodass es im Allgemeinen vom jeweiligen Sachverhalt abhängig ist, ob ein bestimmter Prozess als „effizient“ oder „ineffizient“ zu bezeichnen ist. In der Praxis wird die Energieeffizienz einer bestimmten Anlage vom Kosten-Nutzen-Verhältnis möglicher Verbesserungsmaßnahmen, dem Interesse der Nutzer und den jeweils verursachten Energiekosten abhängen. In diesem Zusammenhang ist auch die Frage zu stellen, ob es überhaupt Möglichkeiten gibt, Effizienzsteigerungen zu realisieren, was beispielsweise

aus baulichen Gründen, Kostengründen oder mangels besserer Technologien am Markt nicht der Fall sein kann.

Die Richtlinie 2010/30/EU des Europäischen Parlaments und des Rates sieht eine einheitliche Energieverbrauchskennzeichnung vor, nach welcher Energieverbraucher je nach ihrer Energieeffizienz in unterschiedliche Güteklassen eingeteilt werden. Dabei ist der Betrag des Quotienten in (1.1) im Gegensatz zu energiespezifischen Kennzahlen (beispielsweise bei Produktionskapazitäten von Maschinen, welche als „Stück je kWh“ angegeben werden können) nicht von bestimmender Bedeutung, sondern jenen Geräten, welche in ihrer Kategorie den geringsten Energieverbrauch aufweisen, wird die höchste Effizienzklasse zugewiesen (vgl. Abbildung 5). Damit ist eine gewisse Vergleichbarkeit der Energieeffizienz von Produkten gegeben (vgl. [9]).

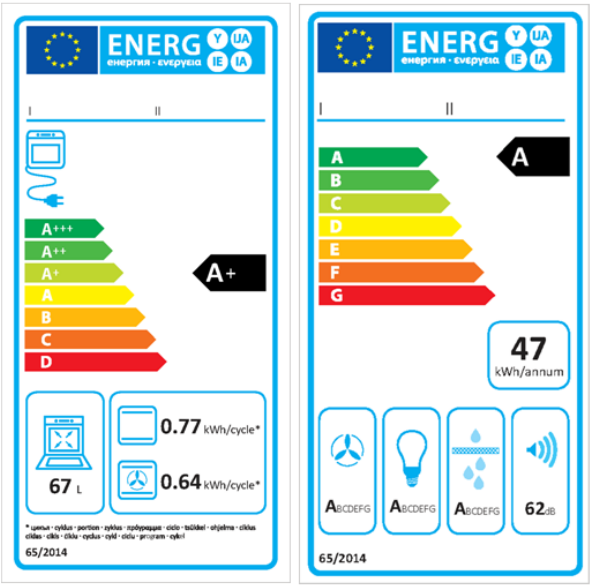

Abbildung 5: Energieverbrauchskennzeichnung in der EU [10]

Das Beurteilen der Energieeffizienz eines Sachverhalts ist durch derartige Maßnahmen zumindest auf Produktebene standardisierbar. Bei der Betrachtung von größeren Einheiten, beispielsweise von Städten oder ganzen Volkswirtschaften, stellen sich allerdings oftmals Schwierigkeiten bei der Bewertung der Energieeffizienz ein. Insbesondere ist der Effekt einer Maßnahme zur Förderung von Energieeffizienzsteigerungen, wie etwa einer Subventionierung von bestimmten Gütern, nicht unbedingt direkt aus dem Energieverbrauch einer Stadt oder eines Staates ablesbar, nachdem ihr bzw. sein Energieverbrauch in der Regel von vielen Einflussgrößen abhängig ist. Die Auswirkung einer effektiven Energieeinsparung kann durch andere Effekte überlagert werden und ist somit in der Regel nicht direkt aus dem Gesamtenergieverbrauch einer Volkswirtschaft ablesbar. Möglicherweise führen Produkte, welche einen spezifisch geringeren Energieverbrauch aufweisen, aufgrund einer verstärkten Nutzung letztlich sogar zu einem erhöhten Energieverbrauch, was in der Literatur meist als Rebound- oder Backfire-Effekt bezeichnet wird.

Dennoch können durch Heranziehen so genannter Energieeffizienzindikatoren zumindest mit Vorbehalt gewisse Aussagen über die Energieeffizienzentwicklung einer Volkswirtschaft getroffen werden. Beispiele derartiger Indikatoren sind die Energieintensität, oder ihr Kehrwert, die Energieproduktivität. Die Energieintensität erhält man, indem man den Primärenergieverbrauch eines Landes auf eine bestimmte Einheit des Bruttoinlandprodukts (BIP) bezieht. Sie gibt somit den energetischen Aufwand an, der aufgebracht werden muss, um diese Einheit des BIPs zu erwirtschaften. Ebenso kann der Primärenergieverbrauch auf die Einwohnerzahl bezogen werden (vgl. [8], S.3).

Bei der Betrachtung von Energieindikatoren ist eine Normalisierung hinsichtlich externer Einflussgrößen notwendig. Diese umfassen beispielsweise die klimatischen Bedingungen jedes Betrachtungsjahres, nachdem davon auszugehen ist, dass strenge Winter einen hohen Wärmeverbrauch induzieren und folglich ohne Normalisierung keine Vergleichbarkeit mit milden Jahren gegeben ist. Ebenso sollte die inflationsbereinigte Preisentwicklung der Energieträger berücksichtigt werden, nachdem ein niedriges Preisniveau Energieeffizienzbemühungen hindern könnte. Auch bei dieser Betrachtungsweise sollte bedacht werden, dass eine Effizienzsteigerung auch dann eintreten kann, wenn der Ertrag an gewünschten Gütern stärker steigt als der erforderliche Energieeinsatz. Dies kann beispielsweise bei Ländern eine Rolle spielen, in welchen sich der Lebensstandard über die Betrachtungszeit bedeutend verbessert hat (vgl. [8], S.28ff).

Abbildung 6 zeigt die Entwicklung der Energieintensität ausgewählter Länder, wobei – mit Ausnahme von Island – eine fallende bzw. gleichbleibende Tendenz erkannt werden kann.

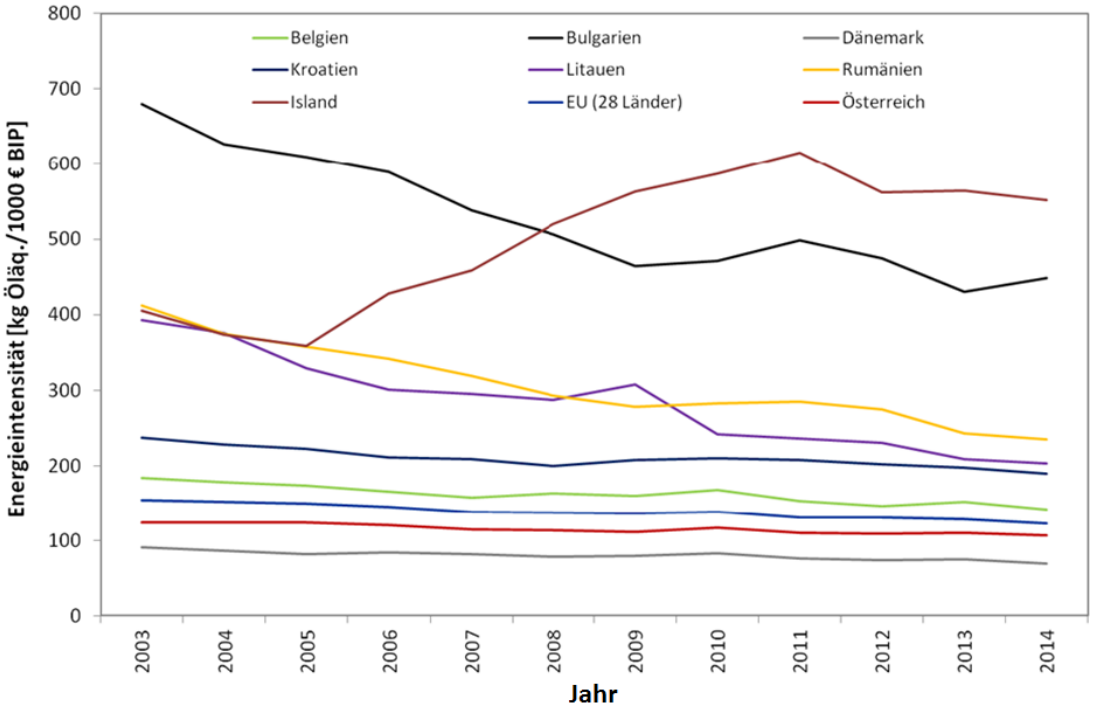

Abbildung 6: Energieintensität in kg Öläquivalent pro 1 000 EUR des BIP ausgewählter Länder [11]

Ein starker Rückgang der Energieintensität, wie er für Bulgarien, Litauen oder Rumänien in Abbildung 6 zu beobachten ist, kann als Signal gedeutet werden, dass sich Energieverbrauch und Wirtschaftsleistung entkoppeln, respektive das Wirtschaftssystem effizienter geworden ist. Allerdings wird bei dieser Effizienzbewertung nicht berücksichtigt, ob in einer Volkswirtschaft ein Strukturwandel stattgefunden hat und sich diese in Richtung einer Dienstleistungsgesellschaft entwickelt. Hierbei kann es also zum Auftreten von Verschiebungseffekten kommen, sodass der Gesamtenergiebedarf der betrachteten Wirtschaftsbereiche nicht unbedingt zurückgegangen ist, sondern sich in andere Volkswirtschaften verlagert hat.

2 Grundlagen

2.1 Begriffsdefinitionen und –erklärungen

Im Folgenden werden einige Begriffe erklärt bzw. definiert, welche im Rahmen der Arbeit verwendet werden:

Barwert

„Als Barwert wird der zusammengefasste heutige Wert einer oder mehrerer zukünftig anfallender positiver oder negativer Zahlungen bezeichnet. Der Barwert wird rechnerisch dadurch ermittelt, dass die in der Zukunft anfallenden Zahlungen auf den heutigen Wert abgezinst und aufaddiert werden. Der Barwert ermöglicht einerseits den Gegenwartswert einer Zahlungsreihe zu ermitteln. Andererseits erlaubt er es, Investments mit unterschiedlicher Zahlungsreihe aber gleicher Laufzeit zu vergleichen.“ [12]

Bruttoinlandsverbrauch

„Der Bruttoinlandsverbrauch an Energie, verkürzt auch als Bruttoinlandsverbrauch, ist der gesamte Energiebedarf eines Landes oder einer Region. Der Wert entspricht der Menge an Energie, die notwendig ist, um den Inlandsverbrauch der betrachteten geografischen Einheit zu decken.“ [13]

Bruttoinlandsprodukt (BIP)

„Das BIP bezeichnet den Wert aller Waren und Dienstleistungen, die in einer Volkswirtschaft in einer bestimmten Periode hergestellt werden.“ [14] „Das Bruttoinlandsprodukt (BIP) ist eine grundlegende Kennzahl für den wirtschaftlichen Wohlstand eines Landes insgesamt.“ [15]

CO_2-Emissionen pro Kopf

Dieser Indikator gibt die CO_2-Emissionen pro Einwohner über einen bestimmten Betrachtungszeitraum in einem definierten geografischen Gebiet an. Für EU-Mitgliedsstaaten basieren die in der Arbeit zitierten Angaben auf CO_2-Emissionsdaten der Europäischen Kommission und den Bevölkerungsdaten des Statistischen Amts der Europäischen Union „eurostat“. Für Entwicklungsländer werden CO_2-Emissionen, welche durch Verbrennung von Kraftstoffen hervorgerufen werden, und Bevölkerungsdaten von der Internationalen Energieagentur IEA verwendet. Als „Entwicklungsländer“ werden all jene Länder bezeichnet, welche von der Organisation für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung OSZE als solche eingestuft werden (vgl. [5]).

Endenergie

Unter Endenergie versteht man jene Energie, welche in ihrer jeweiligen Form beim Verbraucher ankommt. Dies kann beispielsweise elektrische Energie, Heizenergie in Form eines aufbereiteten festen, flüssigen oder gasförmigen Brennstoffs sein (vgl. [16], S.20).

Energieabhängigkeit

„Die Energieabhängigkeit zeigt, inwieweit sich eine Wirtschaft auf Importe verlässt, um [ihren] eigenen Energiebedarf zu decken. Sie wird als Nettoimport dividiert durch die Summe des Bruttoinlandsenergieverbrauchs inkl. Lager berechnet.“ [3]

Energieeffizienzmaßnahme

„Aktivität, die normalerweise zu einer überprüfbaren, messbaren oder abschätzbaren Verbesserung der Energieeffizienz führt.“ ([17], S.8)

Energieintensität der Wirtschaft

„Dieser Indikator ist das Verhältnis zwischen dem Nettoinlandsverbrauch an Energie und dem Bruttoinlandsprodukt (BIP), berechnet für ein Kalenderjahr. Er misst den Energieverbrauch einer Volkswirtschaft und ihre Gesamtenergieeffizienz. Der Bruttoinlandsverbrauch an Energie wird durch Addition der Verbrauchswerte für die fünf Energiearten (Kohle, Elektrizität, Öl, Erdgas und erneuerbare Energien) ermittelt. Für die BIP-Zahlen werden verkettete Volumen mit dem Referenzjahr 2005 verwendet. Zur Ermittlung des Energienutzungsgrads wird der Bruttoinlandsverbrauch durch das BIP dividiert. Da der Bruttoinlandsverbrauch in kg ROE (Kilogramm Rohöleinheiten) und das BIP in 1 000 EUR gemessen wird, ergibt sich der Nutzungsgrad in kg ROE pro 1 000 EUR.“ [11]

Der Kehrwert der Energieintensität ist das Verhältnis des BIP zum Primärenergieverbrauch und wird Energieproduktivität genannt.

Energieträger

„Stoff oder Phänomen, der bzw. das zur Erzeugung mechanischer Arbeit, Wärme oder zum Betrieb chemischer oder physikalischer Prozesse verwendet werden kann.“ ([17], S.7)

Energieverbrauch

Unter dem Begriff „Energieverbrauch“ ist jene Menge an Energie zu verstehen, welche zum Aufrechterhalten eines bestimmten Prozesses erforderlich ist (beispielsweise Beleuchtung eines Raumes, Fortbewegen eines Kraftfahrzeuges). Obwohl Energie nur von einer in eine andere Form umgewandelt werden kann, hat sich der Begriff des „Energieverbrauchs“ im allgemeinen Sprachgebrauch etabliert. Im Falle von elektrischer Energie spricht man auch gerne von „Stromverbrauch“.

Nutzenergie

Unter Nutzenergie wird jene Energie verstanden, welche für den eigentlichen Zweck verwendet wird. Für Leuchtkörper ist dies beispielsweise jener Anteil elektrischer Energie, welcher zur Bereitstellung des gewünschten Lichtstroms dient. Die Differenz zur Endenergie umfasst somit sämtliche Verluste, welche nicht zum eigentlichen Zweck beitragen (beispielsweise Wärme- oder Übertragungsverluste).

Primärenergie

Unter Primärenergie versteht man jene Energie, welche in naturgegebenen Phänomenen (z.B. Wind, Fließbewegung von Strömen) und Produkten (z.B. Holz, Kohle) enthalten ist. Über bestimmte Prozesse können diese Energieformen nutzbar gemacht werden (z.B. mittels Laufwasser- und Windkraftwerken) (vgl. [16] S. 19).

Rohöleinheiten (ROE)

„Tonne(n) Rohöleinheiten (t RÖE) ist eine normierte Maßeinheit der Energie, die vereinbarungsgemäß etwa der Energiemenge entspricht, die aus einer Tonne Rohöl gewonnen werden kann. t RÖE ist eine standardisierte Maßeinheit, der ein Nettoheizwert von 41 868 Kilojoule/kg zugeordnet wurde und die zum Vergleich des Energiegehalts unterschiedlicher Energieträger verwendet werden kann.“ [18]

Rohöleinheiten werden auch als Öläquivalente bezeichnet.

Sekundärenergie

Unter Sekundärenergie versteht man jene Energieform, in welche Primärenergie nach ein oder mehreren Umwandlungsschritten umgewandelt wird. Diese Umwandlungsprozesse sind verlustbehaftet. Beispiele für derartige Umwandlungsprozesse sind: Zerkleinern von Holz, Umwandlung von kinetischer Energie eines Stromes in elektrische Energie oder das Aufbereiten von Rohöl in Raffinerien.

Energieaudit

„Ein systematisches Verfahren im Einklang mit § 18 und Anhang III [des Bundes-Energieeffizienzgesetzes] zur Erlangung ausreichender Informationen über das bestehende Energieverbrauchsprofil eines Gebäudes oder einer Gebäudegruppe, eines Betriebsablaufs in der Industrie und/oder einer Industrieanlage oder privater oder öffentlicher Dienstleistungen zur Ermittlung und Quantifizierung der Möglichkeiten für kostenwirksame Energieeinsparungen und Erfassung der Ergebnisse in einem Bericht.“ ([6], S.3 §5)

2.2 Das Bundes-Energieeffizienzgesetz

Mit der Beschließung des Bundes-Energieeffizienzgesetzes (Langtitel: „Bundesgesetz über die Steigerung der Energieeffizienz bei Unternehmen und dem Bund (Bundes-Energieeffizienzgesetz – EEffG)“) am 9. Juli 2014 durch den Nationalrat, wurde die „Energieeffizienz-Richtlinie“ 2012/27/EU des Europäischen Parlaments und des Rates in nationales Recht umgesetzt (vgl. [19]). Das Bundesministerium für Wissenschaft, Forschung und Wirtschaft beschreibt die Ziele des Gesetzes als Steigerung der Energieeffizienz um 20 Prozent bis zum Jahre 2020, Erhöhung der Versorgungssicherheit und Erreichen eines höheren Anteils erneuerbarer Energieträger im Energiemix (vgl. [20]). Mit dem Gesetz setzt sich die Republik Österreich das Ziel, eine derartige Energieeffizienzsteigerung zu erreichen, dass „der auf ein Regeljahr bezogene Endenergieverbrauch in Österreich im Jahr 2020 die Höhe von 1 050 Petajoule (Energieeffizienzrichtwert) nicht überschreitet“ ([6], S.3 §4).

Um diese Ziele erreichen zu können, sieht das Gesetz mehrere Verpflichtungen vor, welche sowohl Energieverbraucher (und damit das Ende der Energiebereitstellungskette), als auch Energielieferanten (und somit deren Anfang) betreffen. Insbesondere Unternehmen, welche mehr als 250 Mitarbeiter bei einem Umsatz über 50 Millionen Euro oder einer Bilanzsumme von 43 Millionen Euro haben, sind seitens der Energieverbraucher von Reglementierungen betroffen. Diese haben die Wahl, entweder ein Energieaudit nach den Vorgaben des EEffGs alle vier Jahre durch externe Auditoren durchführen zu lassen, oder ein Energiemanagementsystem mit integrierten Energieaudits nach gewissen Vorgaben in der Betriebsstruktur zu implementieren (vgl. [20], [21]). Maßnahmen, welche den Unternehmen im Rahmen dieser Energieanalysen vorgeschlagen werden, müssen von diesen jedoch nicht verpflichtend umgesetzt werden.

Neben einer Verpflichtung für vom Bund genutzte Gebäude, sieht das Gesetz noch die so genannte „Lieferantenverpflichtung“ vor. Dadurch sind Energielieferanten, welche eine Energiemenge von mindestens 25 GWh an österreichische Energieabnehmer bereitgestellt haben, dazu verpflichtet, gewisse Energieeffizienzmaßnahmen nachweislich zu setzen, welche einen Umfang von 0,6 % ihres Vorjahresenergieabsatzes umfassen, welcher jedoch nicht reduziert werden muss (vgl. [21]).

Die Österreichische Energieagentur wurde mit der Aufgabe betraut, als „Nationale Energieeffizienz-Monitoringstelle“ die Zielerreichung und gesetzeskonforme Abwicklung der einzelnen Verpflichtungen durchzuführen. Eine ihrer Aufgaben umfasst dabei die Bewertung von durchgeführten Energieaudits, die Bewertung von vorgeschlagenen Maßnahmen und die Kontrolle von gutachterlichen Nachweisen über die erzielbaren Energieeinsparungen, welche durch umgesetzte Maßnahmen erreicht werden können. Diese „Monitoringstelle Energieeffizienz“ betreut darüber hinaus ein Register, in welchem Energieexperten angeführt sind, welche die Vorgaben des Bundes-Energieeffizienzgesetzes zur Durchführung von Energieaudits und Maßnahmenbewertungen nachweislich erfüllen (vgl. [20], siehe [22]).

2.3 Grundbegriffe zur Ermittlung von Energieeinsparungen

Zur Harmonisierung von Bewertungs- und Nachweismethoden für Energieeinsparungen auf europäischer Ebene wurde die Europäische Norm „EN 16212 – Energieeffizienz und -einsparberechnung – Top-Down- und Bottom-Up-Methoden“ verfasst. Insbesondere definiert diese allgemeine Berechnungsregeln, Grundbegriffe und Parameter und bezieht sich auf Maßnahmen im Endenergiesektor. Im Folgenden werden jene Begriffe in Anlehnung an besagte Norm angeführt, welche für die Bewertungsmethode der Arbeit von Bedeutung sind.

2.3.1 Elementareinheit für Maßnahmen und Systemgrenze

Die Elementareinheit gibt jenes Objekt an, welches von einer bestimmten Energieeffizienzmaßnahme betroffen ist und auf welches sich die Berechnung des Einspareffekts bezieht. Ihre Definition steht damit am Beginn des Bewertungsprozesses. Eine Elementareinheit kann in einem sehr kleinen Umfang gehalten werden (beispielsweise ein Haushaltselektrogerät), oder aber viele Unterobjekte beinhalten und einen verallgemeinernden Charakter haben (z.B. die Berechnung der Energieeinsparung, welche die thermische Sanierung eines gesamten Stadtviertels mit sich bringt). Die Elementareinheit bestimmt damit auch bis zu einem gewissen Grad die erreichbare Genauigkeit des Berechnungsergebnisses. Wird etwa die Effektivität einer Maßnahme betrachtet, welche eine sehr große Anzahl von Verbrauchern betrifft (wie der verpflichtende Einsatz eines Kraftstoffadditivs zur Effizienzsteigerung), wird man verallgemeinernde Annahmen zur Berechnung des Einspareffekts vermutlich nicht vermeiden können, um den Berechnungsaufwand überschaubar zu halten. Für eine derartig umfangreiche Maßnahmenbewertung schlägt die EN 16212 eine repräsentative Wahl der Elementareinheit vor, für welche der Einspareffekt berechnet wird. Der Gesamteffekt der Maßnahme kann durch einfache Multiplikation mit der Gesamtanzahl der Elementareinheiten ermittelt werden.

Ein Beispiel einer derartigen verallgemeinerten Maßnahmenbewertung kann die staatliche Subventionierung des Tauschs von Heizkesseln sein. Dabei kann ein repräsentativer, zu tauschender Kessel als Elementareinheit gewählt und mit einem solchen verglichen werden, welcher den Rahmenbedingungen der Subventionierung entspricht. Die Anzahl all jener Kessel, welche ohne Gewährung des Zuschusses nicht ersetzt worden wären, entspricht dem Faktor, mit welchem die Einsparung der Elementareinheit zu multiplizieren ist (vgl. [17], S.30f). Bei dieser Betrachtung wird auch deutlich, dass die Aussagekraft einer derartigen Berechnung von der Repräsentanz der Auswahl der Elementareinheit limitiert wird.

Neben der Elementareinheit bestimmt auch die Systemgrenze die zu bewertende Energieeffizienzmaßnahme. In manchen Fällen können Elementareinheit und Systemgrenze ident sein, beispielsweise wenn ein einzelnes Elektrogerät wie ein Kühlschrank betrachtet wird. Ein Gegenbeispiel ist die Wahl eines gesamten Gebäudes als Elementareinheit, die Systemgrenze

umfasst allerdings nur die in diesem enthaltenen Lüftungsanlagen. Die Wahl der Elementareinheit und der Systemgrenzen hat eine fundamentale Auswirkung auf die technischen Wechselwirkungen einer Maßnahme, welche in der Bewertung berücksichtigt werden müssen.

2.3.2 Baseline

Als Baseline wird jener Energieverbrauchswert bezeichnet, welcher als Ausgangsbasis der Einsparberechnung herangezogen wird und als Verbrauch zu erwarten wäre, wenn keinerlei Maßnahmen gesetzt werden würden (vgl. [17], S.6). Als Basiswert kann entweder ein bekannter Energieverbrauchswert verwendet werden, oder aber eine bestimmte Referenzsituation definiert werden. Die Wahl einer Referenzsituation als Vergleichswert ist dann erforderlich, wenn noch keine materielle Vergleichssituation vorliegend ist. Dies kann beispielsweise im Planungsprozess eines Gebäudes erforderlich sein, wenn dieses in einem wesentlich besseren energietechnischen Standard ausgeführt wird, als es die aktuelle Bauordnung vorsieht. Dann ist es zweckmäßig, die erzielbare zukünftige Einsparung auf das fiktive Szenario zu beziehen, das Gebäude würde gemäß den Mindestanforderungen der Bauordnung errichtet werden (vgl. [17], S.33f).

Bei der Wahl der Baseline ist zu berücksichtigen, dass Einsparungen mitunter auch ohne eine gesetzte Effizienzmaßnahme erfolgen können. Dies kann der Fall sein, wenn am Markt verfügbare Energieverbraucher alleine durch den technischen Fortschritt sukzessive einen höheren Energieeffizienzstandard erreichen. Um diesem Umstand Rechnung zu tragen, ist darauf zu achten, dass die zu erwartende Verwendungsdauer eines momentan genutzten Energieverbrauchers realistisch bemessen wird. Darüber hinaus ist eine Normalisierung des Baselineverbrauchs gegenüber Einflussgrößen wichtig, welche diesen verzerren können.

2.3.3 Normalisierung

Um eine Vergleichbarkeit von Energieverbrauchsdaten zu erreichen, ist eine Normalisierung erforderlich. Einflussgrößen, welche den Energieverbrauch beeinflussen und das Ergebnis der Maßnahmenbewertung entsprechend verzerren würden, können beispielsweise klimatische Bedingungen, geänderte Öffnungszeiten von Gebäuden oder Produktionskapazitäten von Anlagen sein. Es ist etwa intuitiv annehmbar, dass Heiz- und Kühlbedarf von der jeweils vorliegenden Außentemperatur abhängen.

Die EN 16212 Norm sieht hierbei die Einführung eines Korrekturfaktors vor, welcher den Energieverbrauch entsprechend skaliert. Darüber hinaus wird gefordert, dass die Normalisierung sinnvollerweise nur jenen Anteil des Energieverbrauchs betrifft, der auch tatsächlich von der jeweiligen externen Größe abhängig ist (vgl. [17], S.34).

Im Rahmen der Bewertung einer Energieeffizienzmaßnahme sind alle Einflussgrößen zu eruieren, welche einen entsprechenden Einfluss auf den Energieverbrauch haben können und folglich eine Normalisierung erfordern.

2.3.4 Technische Wechselwirkungen

Bei der Kalkulation von Energieeinspareffekten auf Basis bestimmter Effizienzmaßnahmen ist häufig mit Wechselwirkungen unterschiedlicher Gewerke zu rechnen. Dies kann unter Umständen auch durch eine passende Wahl der Elementareinheit und Systemgrenze vermieden werden. Technische Wechselwirkungen können bei Umsetzung mehrere Maßnahmen in Form eines „Maßnahmen-Pakets“ der Grund sein, weshalb der Gesamteinspareffekt nicht zwangsweise mit der Summe der Einzeleffekte übereinstimmt.

Ein Beispiel für technische Wechselwirkungen kann das Anbringen einer Verschattungseinrichtung an der Außenfassade sein, welche zwar zur Reduktion des Kühlbedarfs führt, andererseits einen verstärkten Einsatz der Beleuchtung erfordert. Es kann allerdings auch möglich sein, dass der Effekt einer Maßnahme Wechselwirkungen mit sich zieht, welche deren Effekt positiv verstärken.

Stützt sich die Berechnung des Einspareffekts auf Messdaten, welche alle relevanten technischen Wechselwirkungen berücksichtigen, so ist eine Anpassung der Daten nicht erforderlich. Andernfalls sieht die ÖNROM EN 16212 die Verwendung von Parametern vor, mit deren Hilfe die Wechselwirkungen geeignet abgebildet werden können (vgl. [17], S.34).

Eine Möglichkeit, technische Wechselwirkungen zu berücksichtigen, ist durch die Unterscheidung in einen aktiven und einen passiven Teil einer Energieeffizienzmaßnahme gegeben. Der aktive Anteil beschreibt hierbei die Einsparwirkung der Maßnahme an sich, der passive Anteil, welcher einen positiven oder negativen Wert annehmen kann, berücksichtigt die Aufsummierung der auftretenden Wechselwirkungen.

2.3.5 Lebensdauer einer Energieeffizienzmaßnahme

Der Lebensdauer einer Energieeffizienzmaßnahme kommt eine entscheidende Bedeutung zu, nachdem über diesen Zeitraum hinweg der entsprechende Einspareffekt bestehen bleibt. Das Bundes-Energieeffizienzgesetz sieht vor, nur jene Maßnahmen als vollwertig anzusehen, welche ihre Wirkung über das Jahr 2020 hinaus erhalten (vgl. [6], S.4 §5).

Bei der Berechnung des Gesamteinspareffekts während der Lebensdauer einer Maßnahme ist zu beachten, dass die Wirksamkeit einer Maßnahme im Laufe der Zeit abnehmen kann, beispielsweise durch Erosions- oder Abnutzungserscheinungen. Dies kann die Amortisationszeit einer Anschaffung

zur Verbesserung der Energieeffizienz merklich beeinflussen. Eventuell auftretende Kosten für Wartungsarbeiten, welche die Effektivität der Maßnahme erhalten, sind daher zu berücksichtigen.

Entsprechend der Definition der Baseline ist zu beachten, dass auch die Lebensdauer des aktuellen Energieverbrauchers eine wesentliche Rolle spielt. Wird ein Ersatz des bestehenden Systems vor Ablauf der Lebensdauer der Energieeffizienzmaßnahme erforderlich und erreicht das neue System gegebenenfalls eine bessere Effizienz als das alte, so ist ein Wechsel der Baseline vorzunehmen, um den tatsächlichen Einspareffekt der Maßnahme über den Betrachtungszeitraum korrekt abzubilden. Abbildung 7 zeigt dies beispielhaft für eine Effizienzmaßnahme. Die Baseline stellt den Energieverbrauch dar, welcher ohne das Setzen der Maßnahme zu erwarten wäre und der auf Annahmen über die zukünftige Verbrauchsentwicklung basiert. Während der Vergleichsfall „Szenario 1“ die Restlebensdauer des ersetzten Systems und nach deren Ablauf den ohnehin fälligen Tausch des Verbrauchers berücksichtigt, ist dies für „Szenario 2“ nicht der Fall. Nachdem oftmals davon auszugehen ist, dass am Markt verfügbare Energiesysteme in Zukunft eine höhere Effizienz aufweisen, flacht daher der kumulierte Einspareffekt der Maßnahme nach Ablauf der Lebensdauer des ursprünglichen Systems entsprechend ab (Szenario 1). Es ist ersichtlich, dass der Gesamteinspareffekt der Maßnahme über ihre angenommene Lebensdauer von 10 Jahren für die beiden Szenarien eine deutliche Diskrepanz aufweist. Die korrekte Wahl der Baseline ist daher insbesondere auch für die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung einer Maßnahme interessant. Ist man jedoch nur an der grundsätzlich erzielbaren Energieeinsparung durch die Umsetzung der Maßnahme interessiert, so ist ein Baselinewechsel nicht zwingend erforderlich.

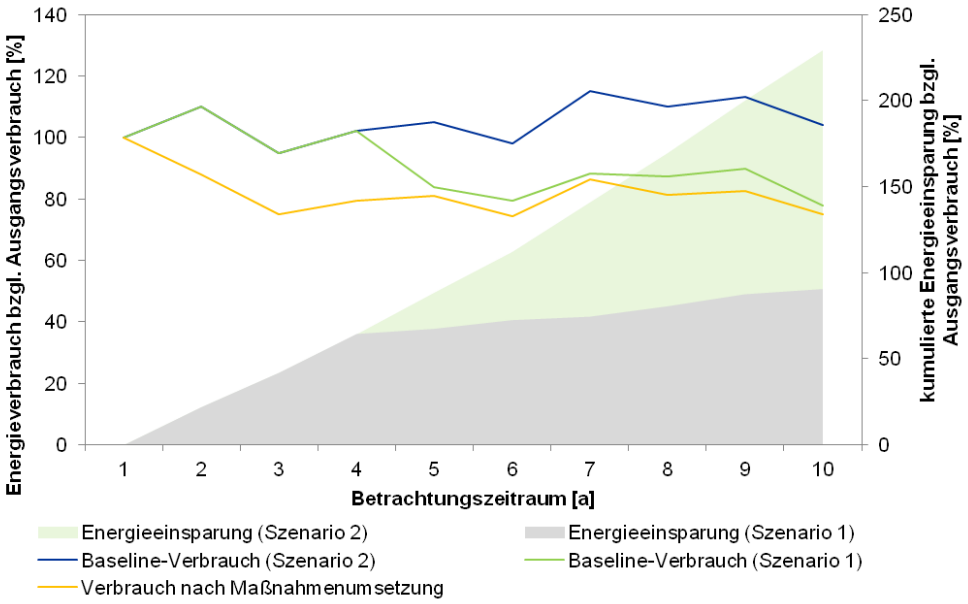

Abbildung 7: Einfluss der Baseline-Definition auf das Berechnungsergebnis

2.3.6 Rebound-Effekt

Die Berechnung des Energiespareffekts führt zunächst auf eine Brutto-Energieeinsparung, welche nach Berücksichtigung von weiteren Korrekturen oder Normierungen zur Netto-Energieeinsparung wird. Mögliche Korrekturen können aufgrund unterschiedlicher Effekte erforderlich sein, die im Zusammenhang mit der Umsetzung von Energieeffizienzmaßnahmen beobachtet werden. Der so genannte Mitnahmeeffekt ist dann zu beachten, wenn der Einspareffekt auch ohne das Setzen einer bestimmten Maßnahme aufgetreten wäre, beispielsweise der Kauf eines effizienten Geräts, welcher auch ohne eine Subventionierung erfolgt wäre. Unter dem Begriff Multiplikationseffekt wird die Verstärkung einer Maßnahme verstanden, etwa der langfristigen Nachfrage nach einem effizienten Produkt, welche erst durch eine bestimmte Aktion aufgekommen ist (vgl. [17], S.38).

Ein besonderes Phänomen in der Berechnung von Einspareffekten stellt der so genannte Rebound-Effekt dar. Im Gegensatz zu den oben dargestellten Effekten, welche besonders für politische Maßnahmen von Bedeutung sind, kann dieser für beinahe jede Effizienzmaßnahme beachtenswert sein. Unter dem Begriff Rebound-Effekt werden Änderungen des Energienutzungsverhaltens aufgrund einer gesetzten Maßnahme verstanden, welche zu einer Verringerung des Einspareffekts, in Extremfällen sogar zu einem effektiven Mehrverbrauch, führen. Der Ersatz alter Leuchtmittel durch effizientere kann beispielsweise die Konsequenz haben, dass sich die Beleuchtung eines Gebäudes als weniger kostenintensiv erweist und damit das Bewusstsein der Nutzer für eine möglichst optimale Beleuchtungsdauer verloren geht.

Zu beachten ist hierbei, dass die Energieeffizienz des Prozesses pro Zeiteinheit durch die Maßnahme trotz auftretenden Rebound-Effekts in der Regel gesteigert wird. Es kann auch der Fall sein, dass sich die Lebensqualität aufgrund einer gesetzten Maßnahme verbessert und damit eine Änderung des Nutzungsverhaltens erfolgt. Dies kann beispielsweise beim Umstieg auf ein effizientes, kostengünstiges Fortbewegungsmittel der Fall sein, welches dadurch deutlich öfter für Freizeitaktivitäten verwendet wird.

2.4 Statistische Grundlagen

2.4.1 Regressionsanalyse

Die Regressionsanalyse ist eine Methode der Statistik, welche das Ziel verfolgt, einen geeigneten funktionalen Zusammenhang zwischen einer abhängigen Variablen y und einer oder mehrerer erklärender Variablen x_i zu ermitteln, zu welchen Beobachtungwerte vorliegen. Die Basis der Analyse stellen die Daten einer entsprechenden Messreihe dar (vgl. [23], S.300f). In jenem Wertebereich der ermittelten Regressionsfunktion, zu welchem Daten aus dieser Stichprobe vorhanden sind, wird ein

bestehender Zusammenhang naturgemäß am besten abbildbar sein. Außerhalb dieses Bereichs ist die Regressionsfunktion zwar in der Regel definiert, wie aussagekräftig die von ihr prognostizierten Werte sind, ist aber möglicherweise ungewiss (vgl. [23], S.300).

Sofern ein Zusammenhang existiert und ermittelt werden konnte, kann man diesen auch verwenden, um mit bekannten oder geschätzten m unabhängigen Variablen $x_{i,m}$ die Größe der abhängigen Variable zu ermitteln (vgl. [24], S.107ff).

Die abhängige Variable kann beispielsweise der Treibstoffverbrauch eines Fahrzeugs sein, welcher vom Wert der m=4 unabhängigen Variablen Fahrverhalten, Fahrzeuggewicht, Verkehrsaufkommen, Motorleistung beeinflusst wird. Aus einer Stichprobe von n Wertepaaren für die m unabhängigen Variablen kann ein Regressionsmodell ermittelt werden, auf Basis dessen eine Prognose des Treibstoffverbrauchs eines Fahrzeugs berechnet werden kann, für das die abhängigen Variablen bekannt sind. Die Differenz des tatsächlich auftretenden zum prognostizierten Verbrauchswerts ist ein Maß für die Güte des ermittelten Regressionsmodells.

Formel (2.1) zeigt die allgemeine Form eines linearen oder polynomischen Regressionsmodells, wobei die Werte $\alpha_0,\ldots,\alpha_m$ als Regressionskoeffizienten bezeichnet und im Rahmen der Analyse ermittelt werden und α_0 eine Konstante darstellt.

$$y = \alpha_0 + \sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{m}\sum_{k=1}^{l}\left(\alpha_i \cdot x_{i,j}{}^{k}\right) \tag{2.1}$$

$\alpha_0,\ldots,\alpha_m$ ..... *Regressionskoeffizienten*

$x_{i,j}$ ..... *Kovariablen (Index der Wertepaare: i =1,…,n; Index der unabhängigen Variablen: j = 1,…,m)*

k ..... *Grad des polynomischen Modells*

Treten die Regressionskoeffizienten im Modell nur in linearer Form auf, so spricht man von linearer Regression. Ist die betrachtete Größe y nur von einem Modellparameter x_i abhängig und folglich der Index m=1, spricht man von einem einfachen linearen Regressionsmodell, andernfalls von einem multiplen linearen Regressionsmodell (vgl.[24], S.108). Sofern ein rein linearer Zusammenhang der Modellgrößen angenommen wird, kann der Exponentenindex k in (2.1) weggelassen werden. Neben einem linearen beziehungsweise polynomischen Zusammenhang kann gegebenenfalls auch ein logarithmischer, exponentieller, hyperbolischer oder reziproker funktionaler Zusammenhang der Modellparameter zutreffend sein (vgl. [24], S.108).

Auf Basis der vorliegenden Stichprobe mit n Wertepaaren für die m unabhängigen Variablen, kann mit Hilfe der Methode der kleinsten Quadrate für die einzelnen Regressionskoeffizienten $\alpha_0,\ldots,\alpha_m$ ein

Schätzwert $\hat{\alpha}_0, \ldots, \hat{\alpha}_m$ ermittelt werden. Die Differenz der im Rahmen der Stichprobenanalyse tatsächlich beobachteten Werte y_i zu den mit Hilfe des Regressionsmodells berechneten Werten $\hat{y}_i$ heißt Residuum u_i (vgl. Formel (2.2)) (vgl. [24], S.109). Die Streuung der Residuen bezüglich der Regressionsfunktion sollte zufällig sein und keinen einheitlichen Charakter aufweisen (beispielsweise allesamt positiv). Die Residuen sollten dabei unabhängig, das heißt unkorreliert, und identisch (im Sinne der Homoskedastizität) um den Mittelwert 0 verteilt sein. Ist ein erkennbares Muster in der Streuung der Residuen ersichtlich, so ist eine Überprüfung der Regression erforderlich ([23], S.330f).

$$u_i = y_i - \hat{y}_i \tag{2.2}$$

u_i.....Residuum zum i-ten Parameterpaar (x_{i1}, x_{i2}, … x_{im})

y_i.....tatsächlich beobachteter Wert für das Parameterpaar (x_{i1}, x_{i2}, … x_{im})

$\hat{y}_i$.....berechneter Wert mittels Regressionsmodell mit geschätzten Regressionskoeffizienten und Verwendung der tatsächlich beobachteten Werte für das Parameterpaar (x_{i1}, x_{i2}, … x_{im})

Die Methode der kleinsten Quadrate sieht nun vor, dass die Summe der quadrierten Residuen minimiert wird (vgl. [24], S.109). Die Residuen gehen hierbei quadratisch ein, nachdem sie sowohl positive, als auch negative Werte annehmen können und somit deren Summe kein geeignetes Beurteilungskriterium für die Modellgüte darstellt (vgl. [25], S.209). Formel (2.3) stellt die entsprechende Zielfunktion unter Verwendung von (2.1) und (2.2) dar. Die Lösungsfunktion ist folglich jene, welche die geringste quadratische Abweichung zu den Daten der Stichprobe aufweist (vgl. [23], S.300ff).

$$\sum_{i=1}^{n} \hat{u}_i^{\,2} = \sum_{i=1}^{n} (y_i - \hat{y}_i)^2 = \sum_{i=1}^{n} \left(y_i - \alpha_0 + \sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{m} \sum_{k=1}^{l} \left(\alpha_i \cdot x_{i,j}{}^{k} \right) \right)^2 \rightarrow Min \tag{2.3}$$

Es ist in der Regel der Fall, dass das Regressionsmodell Residuen aufweist, die von Null verschieden sind. Nachdem für die Größe y ein funktionaler Zusammenhang zu ein oder mehreren Parametern angenommen wird, werden ihre Werte aus der Stichprobe vom Umfang n eine gewisse Streuung aufweisen.

Für die lineare Regression kann die Varianz der tatsächlich beobachteten Werte gemäß Formel (2.4) als Summe zweier Summanden dargestellt werden. Der erste Summand in (2.4) gibt die Varianz der mittels Regressionsmodell berechneten Werte $\hat{y}_i$ an, der zweite gibt die Varianz der Residuen an

(vgl. [23], S.326). Dieser Residualanteil, welcher die Quadratsumme der Residuen enthält, wird, wie soeben in (2.3) angegeben, durch die Methode der kleinsten Quadrate minimiert (vgl. [24], S.111).

$$\sum_{i=1}^{n}(y_i - \bar{y})^2 \quad = \quad \sum_{i=1}^{n}(\hat{y}_i - \bar{y})^2 \quad + \quad \sum_{i=1}^{n}(y_i - \hat{y}_i)^2 \tag{2.4}$$

$$Gesamtvarianz;\ erklärte\ Varianz;\ Residualvarianz$$

Als Maßzahl für die Güte der Anpassung an die bekannten Daten und Aussagekraft der Regressionsfunktion wird häufig der so genannte Determinationskoeffizient R^2, auch Bestimmtheitsmaß genannt, verwendet. Gemäß seiner Definition nach Formel (2.5), gibt er das Verhältnis der erklärten Varianz zur Gesamtvarianz und damit jenen Anteil der Streuung, welcher durch das Regressionsmodell erklärt werden kann, an (vgl. [24], S.34).

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^{n}(\hat{y}_i - \bar{y})^2}{\sum_{i=1}^{n}(y_i - \bar{y})^2} \tag{2.5}$$

R^2.....Determinationskoeffizient

y_i.....tatsächlich beobachteter Wert für das Parameterpaar (x_{i1}, x_{i2}, … x_{im})

$\hat{y}_i$.....berechneter Wert mittels Regressionsmodell mit geschätzten Regressionskoeffizienten und Verwendung der tatsächlich beobachteten Werte für das Parameterpaar (x_{i1}, x_{i2}, … x_{im})

$\bar{y}$.....arithmetisches Mittel der beobachteten Werte y_i

Neben dem Bestimmtheitsmaß kann auch der so genannte Residuenplot zur Beurteilung der Modellgüte verwendet werden. Dabei werden die Regressionswerte gegen ihre zugehörigen Residuen aufgetragen. Weisen die Residuen im Residuenplot eine regelmäßige Struktur auf, so entspricht das ermittelte Regressionsmodell nicht dem tatsächlichen Zusammenhang der beobachteten Variablen. Liegen die Residuen nicht unregelmäßig und zufällig verteilt zueinander, so ist entweder ein anderer funktionaler Zusammenhang zu suchen (beispielsweise quadratisch, polynomisch oder exponentiell), oder aber keine tatsächliche Abhängigkeit der Variablen gegeben. Sind die Residuen normalverteilt, so spricht das für die Aussagekraft des ermittelten funktionalen Zusammenhangs ([23], S.330f).

2.4.2 p-Wert, Signifikanztests und Informationskriterien

Eine Möglichkeit, den Einfluss einzelner unabhängiger Variablen auf die abhängige Variable zu untersuchen, stellt ein Signifikanztest dar. Hat eine Variable keinen signifikanten Einfluss auf das

Regressionsmodell, kann der entsprechende Regressionskoeffizient gleich Null gesetzt werden. Dadurch wird erreicht, dass das Regressionsmodell nur Variablen enthält, welche zur Beschreibung des Sachverhalts auch tatsächlich notwendig sind. Durch die Verwendung ausschließlich relevanter Variablen wird ein Overfitting vermieden, was die Aussagekraft des Modells erhöht und den Rechenaufwand zudem in Grenzen hält. Darüber hinaus erhöht sich mit der Anzahl der Kovariaten eines Modells auch die Unsicherheit des prognostizierten Wertes.

Den Ausgangspunkt eines Signifikanztests stellt in diesem Fall die Nullhypothese H_o: $\beta_i = 0$ dar, das heißt die Annahme, dass die i-te Variable keinen signifikanten Einfluss auf die abhängige Variable hat und ihr Regressionskoeffizient daher verschwinden kann. Für den Test wird ein bestimmtes Signifikanzniveau α gewählt, welches in der Praxis häufig mit 5 % bemessen wird (vgl. z.B. [26]) und als Vergleichswert für den p-Wert dient (vgl. [24], S.114).

Der p-Wert entspricht der Wahrscheinlichkeit, dass bei angenommener Korrektheit der Nullhypothese ein Wert auftritt, der dem Signifikanzniveau oder einem extremeren Wert entspricht. Er ist die Wahrscheinlichkeit für den Fall, dass eine Nullhypothese angenommen wird, obwohl sie abzulehnen und ihre Alternativhypothese zutreffend wäre. In der Statistik spricht man in diesem Fall von einem so genannten Fehler 2. Art. Nach (2.6) erfolgt die Beurteilung über eine Annahme oder Ablehnung der Nullhypothese (vgl. [25], S.197):

$$\begin{array}{lll} p \leq \alpha & \Rightarrow & Nullhypothese\ wird\ abgelehnt \\ p > \alpha & \Rightarrow & Nullhypothese\ wird\ angenommen \end{array} \tag{2.6}$$

Die Verwendung des p-Werts hat den Vorteil, dass der Test nach Wahl eines anderen Signifikanzniveaus α leicht wiederholt werden kann. Wird für diese Testentscheidung allerdings eine Teststatistik samt Verwerfungsbereich verwendet, so ist die Testwiederholung zu einem anderen Signifikanzniveau aufwändiger (vgl. [27], S.168).

Eine Voraussetzung für die Durchführung von Signifikanztests im Rahmen der Regressionsanalyse ist, dass die Störterme normalverteilt sind. Dies kann anhand so genannter Signifikanztests überprüft werden, welche die Abweichung der Häufigkeitsverteilung der vorliegenden Daten – im konkreten Fall jene der Residuen – von der Normalverteilung untersucht. Als Beispiele seien hierfür der Lilliefors-, Kolmogorow-Smirnov- oder der Shapiro-Wilk-Test genannt (vgl. [24], S.117).

Darüber hinaus kann, wie unter 2.4.1 bereits erwähnt, auch ein Residuenplot zur grafischen Beurteilung der Residuenverteilung und möglicher Korrelationen zwischen den Residuen herangezogen werden (vgl. [24], S.117).

Ein weiteres Werkzeug zur Beurteilung der Modellgüte stellen Informationskriterien dar. Diese bewerten sowohl die Anpassungsgüte des Modells an die Daten der Stichprobe, als auch dessen Komplexität in Form der Anzahl seiner Parameter. Das AIC-Kriterium nach Hirotugu Akaike ist nach

Formel (2.7) für Regressionsmodelle nach der Methode der kleinsten Fehlerquadrate mit normalverteilten Fehlern konstanter Varianz definiert. Die Varianz der Störterme kann über die Residuen ermittelt werden. Je kleiner der Betrag des AIC, desto höher ist die Güte des Modells, sodass Modelle mit wenigen Parametern bevorzugt werden (vgl.[28], S.575).

$$AIC = n \cdot log(\hat{\sigma}^2) + 2 \cdot k \tag{2.7}$$

n..... Stichprobenumfang
k.....Anzahl der Modellparameter
$\hat{\sigma}$..... geschätzte Varianz der Störterme

Ein weiteres Informationskriterium ist das Bayessche (BIC), in welchem auch der Parameterterm vom Stichprobenumfang abhängig ist (siehe Formel (2.8)). Dadurch wird, im Gegensatz zum AIC, verhindert, dass bei großen Stichprobenumfängen die Anzahl der Parameter weniger stark gewichtet wird (vgl. [29], S.32; vgl. [30],S.64f).

$$BIC = n \cdot log(\hat{\sigma}^2) + k \cdot log\ (n) \tag{2.8}$$

n..... Stichprobenumfang
k.....Anzahl der Modellparameter
$\hat{\sigma}$..... geschätzte Varianz der Störterme

2.4.3 Korrelationskoeffizient nach Bravais-Pearson

Zur Untersuchung eines möglichen Zusammenhangs zweier statistischer Merkmale X und Y, kann eine Korrelationsanalyse durchgeführt werden. Ist eine Stichprobe aus n Wertepaaren für bestimmte Werte von X und Y, die als Ausprägungen x_i beziehungsweise y_i der jeweiligen Merkmale bezeichnet werden, bekannt, kann der Korrelationskoeffizient r nach Bravais-Pearson (Formel (2.9)) berechnet werden (vgl. [23], S.268).

$$r = \frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x}) \cdot (y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})^2 \cdot \sum_{i=1}^{n}(y_i - \bar{y})^2}}\ ,\ \ mit\ r\ \in\ [-1; 1] \tag{2.9}$$

r.....Korrelationskoeffizient nach Bravais-Pearson
x_i.....Ausprägungen des Merkmals X mit i=1,…,n
y_i.....Ausprägungen des Merkmals Y mit i=1,…,n

Sofern der Wert des Korrelationskoeffizienten ungleich Null ist, liegt je nach Vorzeichen des Betrags eine positive beziehungsweise negative lineare Korrelation der Merkmale vor. Im Rahmen der Regressionsanalyse ist der Koeffizient eine Möglichkeit, mögliche Korrelationen von Parametern

zueinander oder die Stärke der Korrelation der abhängigen und unabhängigen Variablen des Modells zu bestimmen (vgl. [24], S.30).

Es sei der Vollständigkeit halber darauf hingewiesen, dass eine positive oder negative Korrelation von gemessenen Ausprägungen nicht bedeuten muss, dass die entsprechenden Merkmale tatsächlich in einem sinnvollen Zusammenhang zueinander stehen. Zu so genannten Scheinkorrelationen finden sich einige statistische Publikationen mit Beispielen, wie etwa einer positiven Korrelation der Storchpopulation und der Geburtenrate in bestimmten Ländern (siehe etwa [31]).

2.4.4 Datendarstellung mittels Boxplot

Datensätze und deren Verteilungen können mit Hilfe der so genannten „Fünf-Punkte-Zusammenfassung“ beschrieben werden. Diese umfasst das Maximum, das Minimum, das 0,25-Quantil („unteres Quartil“), das 0,75-Quantil („oberes Quartil“) und den Median des Datensatzes. Die Differenz des oberen und unteren Quartils bezeichnet man als Interquartilsabstand (IQR). Der so genannte Boxplot stellt die Verteilung eines Datensatzes anhand dieser fünf Kennwerte grafisch anschaulich dar. Nachdem es keine eindeutige Definition für dessen Layout gibt, findet man in der Literatur entsprechend unterschiedliche Ausprägungen mit weiteren zusätzlichen Informationsmerkmalen (vgl. [27], S.38; vgl. [25], S.59ff).

Abbildung 8 zeigt den relativen Anteil erneuerbarer Energien am Bruttoinlandsverbrauch im Jahr 2013 für die 28 EU-Mitgliedstaaten als Beispiel eines Boxplots im Layout dieser Arbeit.

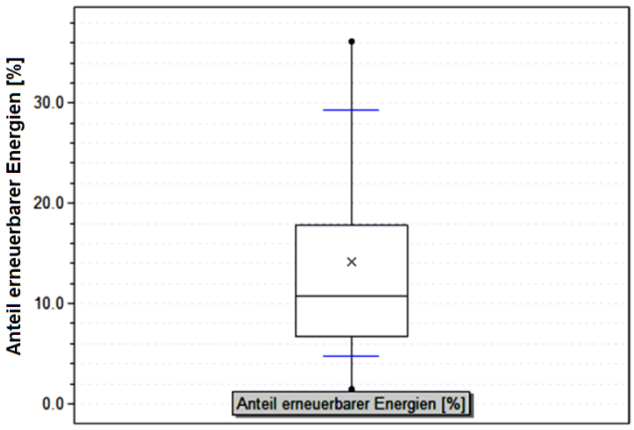

Abbildung 8: Anteil erneuerbarer Energien am Bruttoinlandsenergieverbrauch für 2013 (EU-28) [32]

Die Länge der Box wird durch die Lage des unteren und oberen Quartils bestimmt, welche sie jeweils begrenzen. Der vertikale Balken in der Box gibt die Lage des Medians, des 0,5-Quantils, an. Der Mittelwert des Datensatzes wird durch ein Kreuz symbolisiert. Die Box enthält damit 50 % der Daten des dargestellten Datensatzes, 25 % liegen jeweils über bzw. unter ihr. Aufgrund der relativen Lage

der eingezeichneten Lageparameter, kann unter anderem auch die Symmetrie der Datenverteilung qualitativ analysiert werden.

Die Extremwerte sind im Boxplot als Punkte dargestellt und mit der Box über die so genannten „Whiskers“ verbunden. Das 0,1-Quantil und das 0,9-Quantil sind auf diesen als blaue Markierung hervorgehoben, wodurch die Streuung des Datensatzes am Randbereich beurteilt werden kann.

Für das in Abbildung 8 dargestellte Beispiel lässt sich sagen, dass die dargestellte, asymmetrische Verteilung insbesondere nach oben hin relativ stark streut. Dies ist nicht nur an der Länge des Whiskers und der Lage des 0,9-Quantils erkennbar, sondern auch daran, dass der Median in der unteren Hälfte der Box liegt und die Distanz zum Minimum bzw. dem 0,1-Quantil deutlich geringer ist als der Abstand zum Maximum bzw. dem 0,9-Quantil.

2.4.5 Statistische Verteilungen

Eine der bedeutendsten statistischen Verteilungen stellt die Gaußsche Normalverteilung dar. Ihre stetige Dichtefunktion ist in Formel (2.10) dargestellt.

$$No(\mu, \sigma) = \frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot e^{-\frac{1}{2} \cdot \left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2} \tag{2.10}$$

$No(\mu, \sigma)$……*Dichtefunktion der Gaußschen Normalverteilung*
μ……..*Mittelwert oder Erwartungswert der Verteilung*
σ……..*Standardabweichung der Verteilung*

Durch die beiden Parameter Mittelwert und Standardabweichung ist die Dichtefunktion der Normalverteilung vollständig definiert. Die Verteilung ist symmetrisch um ihren Mittel- oder Erwartungswert μ, die Standardabweichung σ gibt die Lage der Wendepunkte an, welche bei μ-σ bzw. μ+σ anzutreffen sind. Nachdem der Flächeninhalt der Dichtefunktion („Gaußsche Glockenkurve“) normiert ist, führen kleine Standardabweichungen zu schmalen Verteilungen um den Mittelwert, große Standardabweichungen jedoch zu einer sehr langgestreckten, flachen Kurvenform (vgl. [27], S.108; [26], S.85). Abbildung 9 zeigt einige Beispiele von Normalverteilungen mit unterschiedlichen Standardabweichungen.

Die Normalverteilung wird im Rahmen der Arbeit beispielsweise für die Beschreibung der Unsicherheit von Temperaturwerten verwendet.

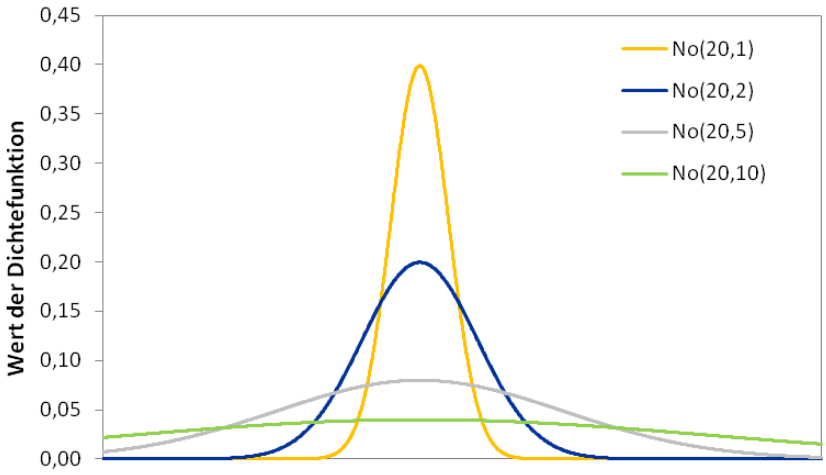

Abbildung 9: Beispiele für Normalverteilungen

Eine weitere bedeutende Verteilung ist die so genannte Gleichverteilung. Diese gibt ein bestimmtes stetiges oder diskretes Intervall an, auf welchem die Wahrscheinlichkeit eines Ereignisses konstant und durch die Länge dieses Intervalls bestimmt ist. Außerhalb dieses Intervalls ist die Wahrscheinlichkeit für das Ereignis null. Die Dichtefunktion der Gleichverteilung ist in Formel (2.11) dargestellt (vgl. [27], S.107). Ein bekanntes Beispiel für eine gleichverteilte, diskrete Zufallsvariable stellt der Würfelwurf eines perfekten, nicht-gezinkten Würfels dar. Bei der Betrachtung von Energieverbräuchen kann die Gleichverteilung beispielsweise Anwendung finden, wenn eine Reihe von Jahresenergieverbräuchen bekannt ist und zu diesen keine weiteren Informationen bekannt sind. Dann kann angenommen werden, dass zukünftige Energieverbräuche in jenem Intervall liegen werden, welches durch den kleinsten und den größten Jahresenergieverbrauch bestimmt wird.

$$f(x) = \begin{cases} \frac{1}{b-a}, & x \in [a,b] \\ 0, & sonst \end{cases} \tag{2.11}$$

Darüber hinaus sind bei der Betrachtung von Messreihen auch empirische Verteilungen interessant. Abbildung 10 zeigt als Beispiel einer empirischen Verteilung die tägliche Beleuchtungszeit eines Einkaufszentrums. Es gibt verschiedene Anpassungstests, um beurteilen zu können, ob eine vorliegende empirische Verteilungsfunktion einer bestimmten bekannten Verteilung entspricht.

Um feststellen zu können, ob eine vorliegende Verteilung einer Normalverteilung entsprechen könnte, stehen verschiedene Anpassungstests zur Verfügung. Ein Beispiel stellt der Kolmogorov-Smirnov-Test dar, welcher die vorliegende Verteilung mit einer hypothetischen Normalverteilungskurve vergleicht. Ist die Abweichung der beiden zu vergleichenden Verteilungen an einem bestimmten Punkt größer als ein kritischer Wert, so wird die Annahme einer vorliegenden Normalverteilung abgelehnt (vgl. [33]).

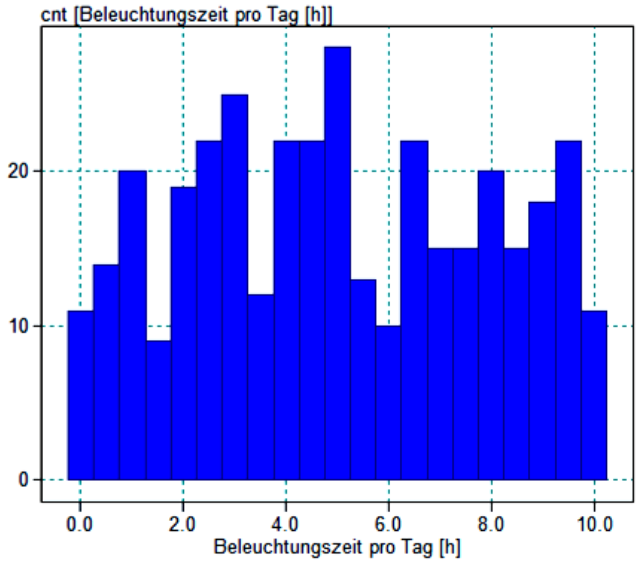

Abbildung 10: Beispiel einer empirischen Verteilung

Der Kolmogorov-Smirnov-Test dient also dem Testen der Hypothese H_0, dass die vorliegenden Daten einer bestimmten Verteilung, beispielsweise der Normalverteilung, entsprechen. Seine Teststatistik ist gegeben durch die maximale Abweichung der vorliegenden Verteilung zur hypothetischen Verteilung. Er kann nur für kontinuierliche Verteilungen angewendet werden, ist nicht über den gesamten Bereich einer Verteilung gleich sensitiv und liefert keine exakten kritischen Werte, wenn Erwartungswert und Standardabweichung einer Verteilung nicht exakt bekannt sind. Für letztgenanntes Problem kann der Lilliefors-Test Abhilfe schaffen, welcher eine Modifikation des Kolmogorov-Smirnov-Tests darstellt (vgl. [28], S.337f). Der so genannte Shapiro-Wilk-Test ist speziell für den Test auf Normalverteilung ausgelegt. Für nähere Informationen zu diesen und weiteren Anwendungstests wird auf die Literatur verwiesen (beispielsweise [28], S.338f; [30], S.64).

2.5 Monte-Carlo-Simulation

Die Monte-Carlo-Simulation ist eine stochastische Methode, welche zur numerischen Lösung von Approximationsaufgaben, beispielsweise der Berechnung von π, oder zur Analyse von Zufallsprozessen, wie etwa dem radioaktiven Zerfall oder dem zurückgelegten Weg eines Random Walkers, verwendet werden kann. Sie basiert auf der vielfachen Wiederholung eines statistischen Zufallsexperiments.

Sofern eine Zielgröße von Eingangsparametern abhängig ist, welche einer statistischen Verteilung folgen, so kann durch häufiges Wiederholen des identen Zufallsexperiments – in diesem Fall das Ziehen der Parameter aus ihrer entsprechenden Verteilung – unter denselben Bedingungen die Verteilung der Zielgröße ermittelt werden. Die Vorgangsweise der Monte-Carlo-Simulation erfolgt dabei derart, dass die Parameter aus jener Verteilung zufällig gezogen werden, welche ihnen

zugeordnet worden ist. Mit einem Set von gezogenen Parametern wird die Zielgröße berechnet, ehe dieses Prozedere beliebig oft wiederholt werden kann (vgl. [34], S.339).

Nach dem Gesetz der großen Zahlen nähert sich die beobachtete, relative Häufigkeit eines bestimmten Ereignisses seiner theoretischen Wahrscheinlichkeit an, wenn das entsprechende Zufallsexperiment für eine sehr große Anzahl an identen Wiederholungen betrachtet wird (vgl. [35]).

Nachdem die Monte-Carlo-Simulation auf dem Ziehen von Zufallszahlen aus Verteilungen basiert, bestimmt der Zufallszahlengenerator die Qualität der Zielverteilung. Insbesondere bei stetig verteilten Eingangsparametern sollte dieselbe Abfolge von Zufallszahlen erst nach unendlich vielen Durchläufen in einer Simulation vertreten sein (vgl. [36], S.50).

Als Beispiel für die Anwendung der Monte-Carlo-Simulation findet man in der Literatur häufig die Überprüfung einer gewissen Annahme, wie beispielsweise, dass ein bestimmter vorliegender Würfel nicht gezinkt ist und bei einem Wurf das Auftreten der jeweiligen Augenzahl statistisch gleichverteilt ist. Führt man nun nur wenige Würfe durch, so ist anzunehmen, dass diese Behauptung nicht sofort verifiziert bzw. falsifiziert werden kann. Mittels Monte-Carlo-Simulation kann allerdings der Zeitaufwand des Wurfversuches offensichtlich enorm reduziert werden, indem das Verhalten des Würfels in Form eines mathematischen Modells abgebildet wird. Mit Hilfe eines Zufallsgenerators kann dann eine sehr große Anzahl von Würfen durchgeführt werden. Abbildung 11 zeigt dies für eine durchgeführte Simulation auf.

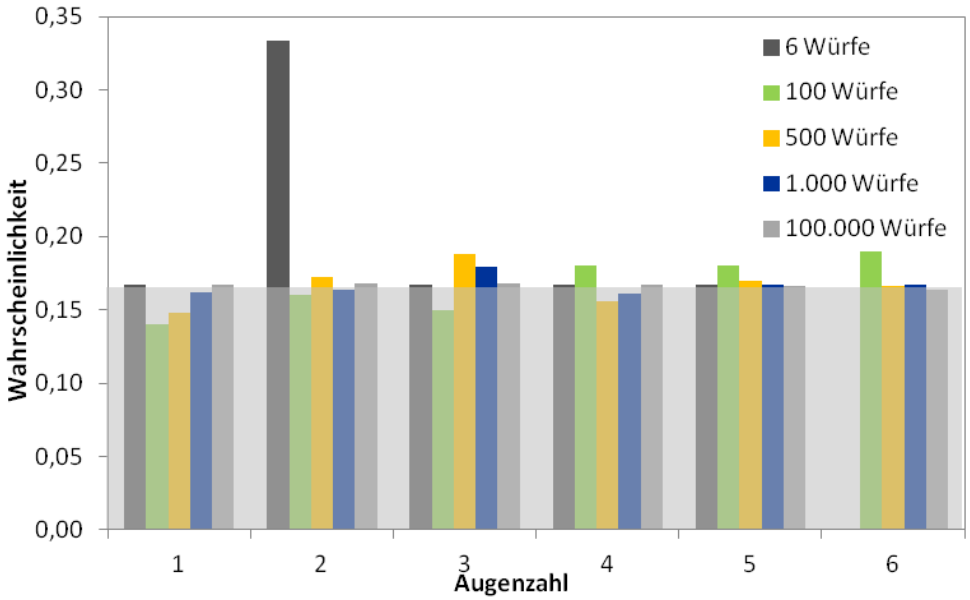

Abbildung 11: Monte-Carlo-Simulation eines Würfelwurfs

Je höher die Anzahl der Würfelwürfe in der Simulation gewesen ist, desto näher entsprechen die Wahrscheinlichkeiten für das Auftreten einer bestimmten Augenzahl dem in Abbildung 11 grau-unterlegten Wert von 1/6, sodass für den vorliegenden Würfel angenommen werden kann, dass er

nicht gezinkt ist. Dieses Beispiel illustriert auch anschaulich, dass einer der Vorteile der Monte-Carlo-Simulation darin liegt, dass eine große Anzahl von auswertbaren Werten mit verhältnismäßig geringem Zeitaufwand generiert werden kann.

Je nach betrachteter Aufgabenstellung kann ein Ziehungsvorgang aus einer definierten Anzahl von Ziehungen bestehen, etwa, wenn die Anzahl der stochastischen Parameter zum Ermitteln einer Zielgröße konstant ist, oder aber erst im Rahmen der Ziehung festgelegt werden. Letzteres ist beispielsweise bei der Betrachtung der zurückgelegten Wegstrecke eines Random Walkers der Fall, bei welcher nicht eindeutig klar ist, wie viele Stöße notwendig sind, um diesen vollständig abzubremsen.

Ein fiktives Beispiel für mehrere stochastisch unabhängige Eingangsparameter soll im Folgenden behandelt werden. Dabei wird ein Transportunternehmen betrachtet, welches 60 Fahrer mit unterschiedlichem Fahrverhalten beschäftigt. Der Fuhrpark des Unternehmens besteht aus 45 Fahrzeugen, zu welchen der Kraftstoffverbrauch pro 100 km Fahrstrecke basierend auf Erfahrungswerten bekannt sei. Dieser Kraftstoffverbrauch wird zum einen vom Fahrverhalten des Fahrers beeinflusst, zum anderen auch von der zusätzlichen Fahrzeugmasse aufgrund der transportierten Güter. Diese kann auch eine Verbrauchsverminderung bewirken, wenn beispielsweise eine Leerfahrt eines Zugfahrzeugs ohne Anhänger betrachtet wird. Zu jedem Fahrer sei eine relative Angabe bekannt, ob sein Fahrverhalten den Fahrzeugverbrauch erhöht oder vermindert. Zu den bisherigen täglichen Fahrstrecken sei ein Datensatz von 10 000 Aufzeichnungen verfügbar, zur Masse der beförderten Güter seien 5 000 Aufzeichnungen bekannt, welche die relative Veränderung des Kraftstoffverbrauchs je nach Fracht angeben.

Es soll als Zielgröße des Kraftstoffverbrauchs eines Transports ermittelt werden, welcher somit von folgenden vier Einflussgrößen abhängig ist:

- dem Kraftstoffverbrauch des verwendeten Fahrzeugs
- dem Fahrverhalten des zugewiesenen Fahrers
- der erforderlichen Fahrtstrecke
- dem Einfluss der transportierten Ladung.

Diese vier Einflussparameter sind aus empirischen Verteilungen bekannt, welche in Abbildung 12 dargestellt sind. Für den Einflussparameter „Fahrstrecke“ scheint die angegebene hypothetische Normalverteilung mit dem dargestellten Histogramm kompatibel. Es wird angenommen, dass sich die Ausgangslage für zukünftige Transporte nicht wesentlich ändert.

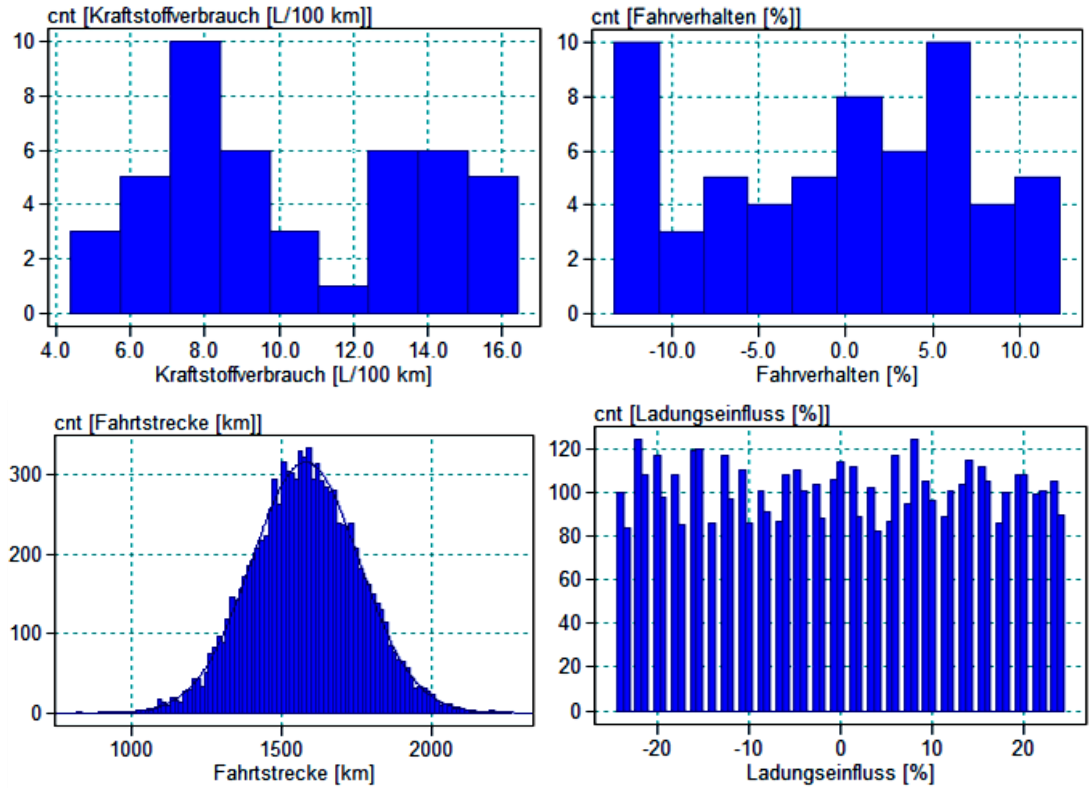

Abbildung 12: Verteilungen der Einflussgrößen auf den Kraftstoffverbrauch

Durch eine Monte-Carlo-Simulation werden nun die vier Parameter aus ihren Verteilungen gezogen und die Verteilung des resultierenden Verbrauchs einer Transportfahrt ermittelt, welche in Abbildung 13 dargestellt ist. Es zeigt sich, dass bei bekanntem Aussehen der Verteilungen der Ausgangsparameter die Verteilung der Zielgröße aufgrund der stochastischen Unabhängigkeit der Einflussparameter durch den Zufall bestimmt ist und durch die Simulation abgeschätzt werden kann.

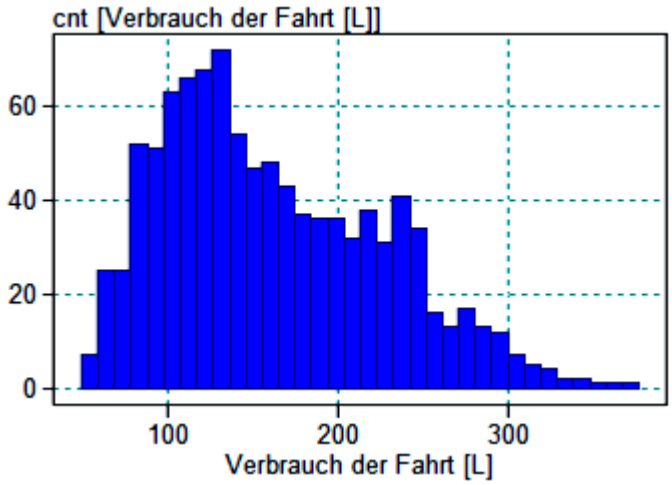

Abbildung 13: Resultierende Verteilung nach Monte-Carlo-Simulation

2.6 Klimanormalperiode und Gradtageszahl

Ein wichtiges Anwendungsgebiet der Monte-Carlo-Simulation im Rahmen dieser Arbeit betrifft die Ermittlung der Verteilung des Außentemperaturprofils eines Gebäudestandorts. Hierfür werden Messwerte der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (ZAMG), welche vom Institut für Meteorologie der Universität für Bodenkultur zur Verfügung gestellt wurden, verwendet. Mit langjährigen Messreihen von Wetterdaten können so genannte Klimanormalperioden angegeben werden, welche dem Mittelwert von 30 Jahresbeobachtungen entsprechen.

Das Außentemperaturprofil eines Gebäudestandorts stellt für die Bewertung von Energieeffizienzmaßnahmen, welche vom Heizenergie- bzw. Kühlenergiebedarf abhängig sind, eine statistisch verteilte Einflussgröße dar. Daher wird aus den messtechnisch erfassten und für ausgewählte Messstationen zur Verfügung gestellten Stundenmittelwerten für die Außentemperatur jene Normalverteilung ermittelt, welche die über den Messzeitraum aufgetretenen Temperaturwerte am besten abbildet. Wird nun eine Monte-Carlo-Simulation für eine Energieeffizienzmaßnahme durchgeführt, so wird für jeden betrachteten Tag ein Temperaturverlauf aus den ermittelten Normalverteilungen gezogen. Die dabei berücksichtigte Messperiode wird als Zeitraum von 1990 – 2015 gewählt und umfasst damit zwar nicht den vollständigen Umfang einer Klimanormalperiode, was zum einen auf die Inbetriebnahme der entsprechenden Stationen zurückzuführen ist, zum anderen ist diese Zeitspanne zur Beurteilung des Kühlenergiebedarfs am besten geeignet, nachdem diese dem Umstand tendenziell steigender Außentemperaturen am besten Rechnung trägt (vgl. [37]).

Stehen keine umfangreichen Messwerte zur Außentemperatur eines Gebäudestandorts zur Verfügung, wird häufig die so genannte Gradtageszahl zur Beurteilung des Einflusses der Außentemperatur verwendet. Dadurch wird eine gewisse Vergleichbarkeit von temperaturabhängigen Jahresenergieverbrauchsdaten ermöglicht. Dabei handelt es sich um eine Einzahlangabe, welche sich entweder auf ein einjähriges Temperaturprofil oder auf eine Klimanormalperiode beziehen kann. Je nachdem, ob die Heizsaison oder die Kühlsaison betrachtet wird, verwendet man die „Heizgradtageszahl“ (HGT) nach Formel (2.12) oder die „Kühlgradtageszahl“ (KGT) nach Formel (2.13).

$$HGT_{T_i/T_a} = \sum_n \left(T_{i,n} - T_{a,n}\right) \cdot d_n \tag{2.12}$$

$T_{i,n}$.....Mittelwert der gewünschten Raumtemperatur des n-ten Monats

$T_{a,n}$.....Mittlere Monatsaußentemperatur

d_n.....Anzahl der Tage des Monats (sofern T_a unter der Heizgrenztemperatur liegt)

$$KGT_{T_i/T_a} = \left| \sum_n \left(T_{i,n} - T_{a,n}\right) \cdot d_n \right| \tag{2.13}$$

$T_{i,n}$.....Mittelwert der gewünschten Raumtemperatur des n-ten Monats

$T_{a,n}$.....Mittlere Monatsaußentemperatur

d_n.....Anzahl der Tage des Monats (sofern T_a über der Kühlgrenztemperatur liegt)

Die Heiz- und Kühlgradtageszahl sind ein Maß für die Differenz aus jeweils gewünschter Raumtemperatur und der vorherrschenden Außentemperatur, wobei in der Regel Monatsmittelwerte zur Berechnung verwendet werden (vgl.[38], S.13; [39], S.11). Heiz- bzw. Kühlgrenztemperatur geben dabei jene Temperaturschwellenwerte an, welche bei Unterschreitung bzw. Überschreitung zur Inbetriebnahme des Heiz- bzw. Kühlsystems eines Gebäudes führen.

Zur Berechnung der Gradtageszahlen eines Gebäudestandorts können beispielsweise frei verfügbare Daten der ZAMG (siehe [40]; [41]) oder der „Klimadatenrechner“ des Bundesministeriums für Wissenschaft, Forschung und Wirtschaft (siehe [42]) verwendet werden. Tabelle 2 zeigt einen Vergleich der Heizgradtageszahl bei einer standardmäßig angenommen Heizgrenztemperatur von 12 °C und einer Rauminnentemperatur von 20 °C.

Tabelle 2: Vergleich der $HGT_{20/12}$ der Landeshauptstädte [42]

Stadt	**$HGT_{20/12}$ [K·d]**
Bregenz	3 108
Eisenstadt	3 136
Graz	3 137
Innsbruck	3 200
Klagenfurt	3 642
Linz	3 218
Salzburg	3 295
St. Pölten	3 288
Wien	2 768

3 Methodik

3.1 Darstellung der Analysemethode

In diesem Abschnitt wird die Bewertungsmethode für Energieeffizienzmaßnahmen, welche im Rahmen dieser Arbeit erarbeitet worden ist, vorgestellt. Diese umfasst im Wesentlichen drei große Arbeitsschritte, welche chronologisch beschrieben werden.

Abbildung 14 stellt den ersten Analyseschritt überblicksmäßig dar, welcher die Analyse der Ausgangssituation betrifft. Zunächst ist die aktuelle Energieverbrauchssituation zu betrachten, um anschließend mögliche Energieeffizienzsteigerungspotentiale identifizieren zu können. Die Aussagekraft der Baseline-Beschreibung hängt in hohem Maße von der Detailtiefe und Verfügbarkeit von Energieverbrauchsdaten oder der Spezifikation der vorhandenen Energieverbraucher ab.

Festlegung der Baseline

- Erhebung der Datengrundlage (Energieverbrauchsdaten)
- Auswahl der zu bewertenden Energieeffizienzmaßnahme
- Definition von Elementareinheit und Systemgrenze
- Bestimmung der Lebensdauer des aktuellen Systems

Normalisierung des Baseline-Verbrauchs

- Untersuchung des Baseline-Verbrauchs bezüglich externer Einflussgrößen
- Unterscheidung der externen Einflussgrößen in variable und statische Parameter
- Bestimmen der Verteilung der statistischen Parameter

Abbildung 14: Schritt 1, Analyse der Ausgangssituation

In der Regel beinhalten Energieverbrauchsaufzeichnungen allerdings nicht nur einzelne Verbraucher und weisen eine geringe Detailtiefe auf, wie beispielsweise die Energierechnungen von Einfamilienhäusern, welche nur einen Energiezähler besitzen („Stromrechnungen“). Sind Energieverbrauchsdaten nur auf Jahresverbrauchsbasis verfügbar, gestaltet sich die Normalisierung der Daten zur Erreichung einer ansprechenden Vergleichbarkeit entsprechend schwierig. Alternativ kann es von Vorteil sein, das Simulationsmodell für den zu erwartenden Energieverbrauch nach erfolgter Maßnahmenumsetzung bereits für die Baseline anzuwenden und die simulierten Verbrauchswerte mit den Datenaufzeichnungen zu plausibilisieren. Eine weitere Möglichkeit stellt

die messtechnische Aufzeichnung des Leistungsaufnahmeverhaltens einer Anlage über einen repräsentativen Zeitraum dar.

Die Lebensdauer der von der Maßnahme betroffenen aktuellen Gebäudeausrüstung kann beispielsweise auf Basis von Erfahrungswerten oder Herstellerangaben getroffen werden und ist letztlich für die Interpretation des Ergebnisses interessant. Je nach Anforderung an die Maßnahmenbewertung ist ein Baselinewechsel über die Lebensdauer der Maßnahme vorzunehmen.

Die Auswahl der externen Einflussgrößen, deren Auswirkung auf den Energieverbrauch analysiert werden soll, hängt zum einen von der jeweils betrachteten Gebäudekategorie und zum anderen von den verfügbaren Aufzeichnungen ab. Hierbei ist allerdings oft von einer relativ guten Datenlage auszugehen, nachdem einige mögliche Einflussparameter häufig für andere Zwecke ohnehin aufgezeichnet werden (beispielsweise Auslastung eines Hotels oder Krankenhauses, Produktionskapazitäten von Maschinen oder Anwesenheit von Mitarbeitern eines Büros). Sofern sowohl für die Energieverbrauchsdaten, als auch die möglichen externen Einflussgrößen brauchbare Aufzeichnungen in vergleichbarer Detailliertheit verfügbar sind, stellen die Regressionsanalyse oder die Korrelationsanalyse mittels Korrelationskoeffizient nach Bravais-Pearson ein geeignetes Mittel dar, um externe Einflussgrößen identifizieren zu können.

Die EN 16212 Norm sieht eine Normalisierung der Energieverbrauchsdaten über einen Anpassungsfaktor (Einzahlwert) vor (vgl. [17], S.34). Ein Beispiel, welches diesem Vorschlag folgt, stellt die Harmonisierung von temperaturabhängigen Verbrauchsgrößen mit Hilfe der Gradtageszahl dar. Im Rahmen der hier beschriebenen Methode ist jedoch eine detailliertere Normalisierung vorgesehen, sofern es die Datengrundlage erlaubt. Dieser Aspekt wird in Abschnitt 3.2 gesondert behandelt. Insbesondere werden externe Einflussparameter als variabel und statisch unterschieden, wobei ersteren eine geeignete statistische Verteilung zugeordnet wird.

Der zweite Schritt der Bewertungsmethode betrifft die Simulation des Einspareffekts der vorgeschlagenen Energieeffizienzmaßnahme und ist in Abbildung 15 dargestellt.

Auswahl eines geeigneten Simulationsmodells

- Auswahl der Elementareinheit, Systemgrenze und Detailtiefe des Modells
- Eruieren relevanter technischer Wechselwirkungen
- Unterscheidung der Modellparameter in statistische und feste Parameter

Simulation des Referenzverbrauchs

- Berücksichtigung des Effekts technischer Wechselwirkungen im Simulationsmodell
- Monte-Carlo-Simulation von 1 000 Iterationen (Ziehung der variablen Parameter aus deren Verteilungen)

Abbildung 15: Schritt 2, Bestimmung der Energieeffizienzmaßnahme

Sofern mit der betrachteten Energieeffizienzmaßnahme dieselbe Elementareinheit und Systemgrenze wie für die Baseline vereinbar ist, werden diese entsprechend übernommen. Andernfalls werden die beiden Begriffe adaptiert und deren Einfluss auf das Auftreten von technischen Wechselwirkungen berücksichtigt.

Der Energieeffizienzmaßnahme wird anschließend ein geeignetes Simulationsmodell zugewiesen, welches deren Verbrauchscharakteristik mit zufriedenstellender Genauigkeit und in Abhängigkeit der verfügbaren Datengrundlage geeignet abbildet. Die Eingangsparameter des Modells werden in Folge, analog zur Handhabung identifizierter externer Einflussgrößen, als statisch oder variabel klassifiziert. Den variablen Größen werden entsprechende statistische Verteilungen zugeordnet.

Die Verteilung des Energieverbrauchs nach Maßnahmenumsetzung wird mittels einer Monte-Carlo-Simulation von 1 000 Iterationen gewonnen. Das Modell berücksichtigt dabei bereits die externen Einflussgrößen, welche im Rahmen der Baseline-Definition eruiert worden sind, sodass die simulierten Verbrauchswerte nach Maßnahmenumsetzung keine Normalisierung erfordern.

Letztlich erfolgt im dritten und abschließenden Analyseschritt, welcher in Abbildung 16 dargestellt ist, die Bewertung des zu erwartenden Einspareffekts durch Vergleich der Baseline und des simulierten Energieverbrauchs nach Maßnahmenumsetzung. Dabei ist darauf zu achten, dass bei der Berechnung des Einspareffekts, welchem die Differenz der beiden Verbrauchswerte entspricht, die jeweils korrespondierten Verbrauchswerte der Monte-Carlo-Ziehungen verglichen werden. Es ist beispielsweise bei einem gezogenen Außentemperaturprofil entscheidend, dass sich die Baseline und der zugehörige Maßnahmenverbrauch auf dasselbe Profil beziehen.

Bewertung des zu erwartenden Einspareffekts

- Vergleich von Baseline und Maßnahmensimulation
- Bewertung der Unsicherheit des Ergebnisses und wesentlicher Einflussgrößen

Interpretation des Simulationsergebnisses

- Vergleich mit gestellten Anforderungen an den Maßnahmenerfolg
- Bewertung der Einsparung über die Lebensdauer der Maßnahme

Abbildung 16: Schritt 3, Bewertung des Maßnahmeneffekts

3.2 Baseline-Ermittlung und Normalisierung

Dieser Abschnitt behandelt den ersten Methodenschritt „Analyse der Ausgangssituation“ genauer. Die Ermittlung der Baseline steht am Beginn der Analyse zur Bewertung von Energieeffizienzmaßnahmen für ein Gebäude. Der Energieverbrauch eines Gebäudes ist in der Regel

von einer Reihe von Einflussgrößen – wie beispielsweise dem thermischen Standard der Gebäudehülle, dem Nutzerverhalten, der Außentemperatur oder dem Nutzungsgrad des Gebäudes – abhängig, welche im Rahmen einer Energieanalyse untersucht werden können. Die Detailtiefe dieser Untersuchung ist in wesentlichem Ausmaß von der verfügbaren Datenmenge und -qualität abhängig. Sind Energieverbrauchsdaten auf Tagesebene bekannt und ebenso detaillierte Aufzeichnungen zu möglichen Einflussfaktoren wie Gebäudenutzungszeit, Außentemperatur oder Belegungsdichte, so ist eine umfangreichere Normalisierung der Baseline möglich, als im Falle der bloßen Verfügbarkeit von Jahresenergieverbräuchen.

Die Auswahl der externen Einflussgrößen ist vom jeweils betrachteten Gebäude abhängig. Abbildung 17 zeigt eine beispielhafte Auflistung der externen Einflussgrößen, welche grundsätzlich für die Beispielgebäude dieser Arbeit in Frage kommen könnten.

Externe Einflussgrößen für elektrische Energieverbrauchsdaten

- Außentemperatur
- Belegungsdichte (Krankenhausbetten, Mitarbeiter vor Ort, etc.)
- Gebäudenutzungsgrad
- Wochentage und Feiertage

Externe Einflussgrößen für Wärmeenergieverbrauchsdaten

- Außentemperatur
- Warmwasserbedarf
- Wochentage und Feiertage

Abbildung 17: Externe Einflussgrößen für die Normierung der Baseline

In Abhängigkeit der verfügbaren Datengrundlage sind die folgenden beiden Fälle zu unterscheiden:

- **Geringe Datendichte der Energieverbräuche und möglicher externer Einflussgrößen**

Stehen für ein Gebäude nur eine Reihe von Jahres- oder Monatsverbrauchsdaten zur Verfügung, so ist in der Regel die verfügbare Datenstichprobe für die Durchführung einer aussagekräftigen Regressionsanalyse zu klein. Es kann allerdings versucht werden, die Energieverbrauchsdaten durch Rücksprache mit den Gebäudebetreibern zu plausibilisieren, und ihnen eine passende statistische Verteilung zu hinterlegen (siehe Abschnitt 3.2.1). Unter Umständen ist es ratsam, bei geringer Datendichte den Baseline-Energieverbrauch durch dasselbe Simulationsmodell zu ermitteln, welches auch zur Ermittlung des Verbrauchs nach Maßnahmenumsetzung verwendet wird.

- **Detaillierte Datenbasis der Energieverbräuche und möglicher externer Einflussgrößen**

Moderne Gebäude besitzen des Öfteren eine detailliertere Energiezählerinfrastruktur, sodass im Optimalfall für jede Haustechnik-Anlage ein eigener Energiezähler zur Verfügung steht. Darüber hinaus sind Monitoringsysteme verfügbar, welche den gestellten Anforderungen entsprechend detaillierte Aufzeichnungen zu Energieverbrauchsdaten bereitstellen. Dies kann die Auswahl geeigneter Energieeffizienzmaßnahmen und auch deren Bewertung entscheidend erleichtern.

Für große elektrische Energieverbraucher kann ab einer Jahresbezugsmenge von mindestens 100 000 kWh/a elektrischer Energie das Lastprofil des Gebäudes beim Energieversorger angefordert werden. Dadurch sind ohne organisatorischen Aufwand auch Tagesenergieverbräuche bekannt, welche aus dem Lastprofil errechnet werden können. Im Fall der Verfügbarkeit umfangreicher Datenaufzeichnungen zu Energieverbräuchen und möglichen externen Einflussparametern, kann eine Regressionsanalyse durchgeführt werden, um einen funktionalen Zusammenhang des Energieverbrauchs in Abhängigkeit seiner tatsächlichen Einflussgrößen ermitteln zu können.

3.2.1 Normalisierung von Energieverbrauchsdaten bei geringem Datenbestand

Im Folgenden soll nun der erste der beiden geschilderten Fälle, nämlich das Vorliegen von wenig detaillierten Daten zum Energieverbrauch eines zu analysierenden Gebäudes, anhand eines konkreten Beispiels näher behandelt werden. Dieser kommt in der Praxis beispielsweise bei Wärmeverbrauchsdaten des Öfteren vor. Den Gebäudebetreibern ist im Extremfall nur die in einem Jahr erworbene Brennstoffmenge bekannt, aus welcher über deren Energieinhalt der Energieverbrauch nur abgeschätzt werden kann. Daher ist es aus praktischen Gründen von Interesse, sich mit diesem Fall auseinanderzusetzen und eine Möglichkeit zu diskutieren, um Monats- oder Jahresverbrauchsdaten normalisieren zu können.

Ein gängiges Verfahren zur Normalisierung von Jahresverbrauchsdaten, welche von der Außentemperatur abhängig sind, basiert auf der Verwendung der Gradtageszahl (vgl. Abschnitt 2.6). Hierbei ist darauf zu achten, dass nur jener Anteil des Wärme- bzw. Kälteenergiebedarfs normalisiert wird, welcher auch tatsächlich von der Außentemperatur abhängig ist. So ist beispielsweise die Wärmemenge, welche zur Bereitstellung des Warmwasserbedarfs eines Gebäudes anfällt, in der Regel nicht von der Außentemperatur abhängig. Der Anteil des Wärme- bzw. Kälteenergiebedarfs, welcher nicht durch die Außentemperatur beeinflusst ist, kann im Fall von bekannten Monatsenergieverbräuchen mit Hilfe jener Monate abgeschätzt werden, für welche die Heizgradtageszahl bzw. die Kühlgradtageszahl gleich null ist. Die Normalisierung von Wärmeverbrauchsdaten kann mit Hilfe von Formel (3.1) erfolgen, wobei als Heizgrenztemperatur 12 °C und als Raumzieltemperatur 20 °C angenommen werden, was standardmäßig üblich ist.

$$Q_{Norm} = Q_0 \cdot \frac{HGT_{[TRY]}}{HGT_{[0]}} + Q_{WW} \tag{3.1}$$

Q_{NORM}..... Temperaturbereinigter Wärmeverbrauch

Q_0..... Gemessener Wärmeverbrauch

$HGT_{[TRY]}$..... Heizgradtageszahl [20/12] der Klimanormalperiode 1990-2015

$HGT_{[0]}$..... Heizgradtageszahl [20/12] des zum gemessenen Verbrauch gehörigen Jahres

Abbildung 18 zeigt die Entwicklung des Wärmeenergieverbrauchs eines sehr großen Bürogebäudes in Wien, wobei sowohl die abgelesenen Verbrauchsdaten, als auch die über Formel (3.1) temperaturbereinigten Verbräuche dargestellt sind. Die Berechnung der Heizgradtageszahl erfolgte auf Tagesebene und basierte auf zur Verfügung gestellten Messdaten der ZAMG für den Gebäudestandort. Es zeigt sich insbesondere für die Jahre 2007, 2008 und 2014 eine deutliche Abweichung von gemessenem und bereinigtem Wärmeenergieverbrauch.

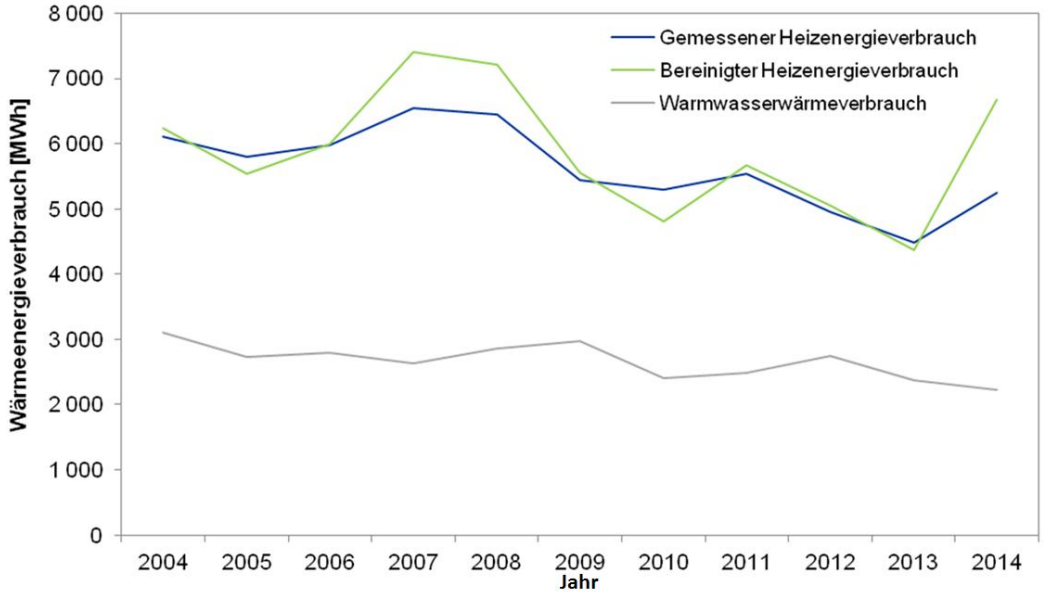

Abbildung 18: Beispiel eines temperaturbereinigten Verbrauchsverlaufs

Das Modell der HGT-Temperaturbereinigung ermöglicht zwar den Vergleich von Verbrauchsdaten, welche bei unterschiedlichen klimatischen Bedingungen aufgetreten sind, bietet jedoch nicht die Möglichkeit der Ableitung einer Baseline für die Bewertung von Energieeffizienzmaßnahmen. Aufgrund der Tatsache, dass zu den einzelnen Jahresverbrauchswerten aus Abbildung 18 keine weiteren Informationen verfügbar sind, ist für längerfristige Maßnahmenbewertungen die Frage interessant, welcher Jahresverbrauchswert am besten als Baseline-Wert herangezogen werden sollte. Die Verbräuche weisen allerdings eine sichtlich große Schwankungsbreite auf, zwischen dem geringsten und höchsten gemessenen Jahresenergieverbrauch liegen rund 2 000 MWh. Ursachen

hierfür können auf unbekannte Einflüsse wie das thermische Trägheitsverhalten der Gebäudestruktur, die tatsächlich verwendete Heizkurve (Raumsolltemperatur in Abhängigkeit der Außentemperatur und der Tageszeit), der solare Wärmeeintrag durch die Fensterflächen oder Wechselwirkungen der über 50 vorhandenen haustechnischer Anlagen zurückzuführen sein. Gerade in solchen Fällen ist die Berücksichtigung von Unsicherheiten für die Konstruktion der Baseline interessant. Ist man beispielsweise an der Betrachtung der Amortisationszeit einer bestimmten Energieeffizienzmaßnahme interessiert, so wird diese entsprechend unterschiedlich ausfallen, je nachdem, ob man als Baseline etwa den geringsten oder größten Jahresenergieverbrauch wählt.

Um dieser Schwankung trotz des geringen Wissens über die Zusammensetzung des tatsächlich auftretenden Energieverbrauchs Rechnung zu tragen, kann versucht werden, den in Formel (3.1) auftretenden Größen eine geeignete statistische Verteilung zuzuweisen. Anschließend kann eine Monte-Carlo-Simulation durchgeführt werden, welche eine Verteilung der Zielgröße liefert. Bezieht man nun die Bewertung einer Energieeffizienzmaßnahme beispielsweise auf die Quartile dieser erhaltenen Verteilung, kann für den zu erwartenden Einspareffekt der Maßnahme und folglich auch für deren Amortisationszeit ein Intervall anstelle eines Einzahlwerts angegeben werden. Dieses Vorgehen wird im Folgenden für drei verschiedene Szenarien demonstriert.

Für die Wahl der statistischen Verteilung der Größen Warmwasserwärmeverbrauch und Heizenergieverbrauch können verschiedene Annahmen getroffen werden. Ist beispielsweise zu einer Größe keinerlei Information über mögliche Einflüsse bekannt und können diese nur geschätzt werden, so kann eine Gleichverteilung des Parameters sinnvoll sein. Hierfür sind nur realistische Annahmen für die anzunehmende Intervalllänge gefordert, welche in Rücksprache mit den Gebäudebetreibern festgelegt werden können. In der Regel ist der Umfang der verfügbaren Daten zu gering, um aussagekräftige empirische Verteilungen ermitteln zu können.

Die Heizgradtageszahl für die Klimanormalperiode wird für die folgenden Beispiele als statischer Parameter gewählt, nachdem sich die Monte-Carlo-Simulation auf die Klimanormalperiode bezieht. Die Berechnung der Gradtageszahl erfolgt auf Tagesebene, sodass jeder Tag mit einer mittleren Temperatur kleiner der Heizgrenztemperatur einen Beitrag zur Gradtageszahl liefert.

Zur Ermittlung der Heizgradtageszahl des betrachteten Jahres wird ein Temperaturprofil aus einer Normalverteilung gezogen, welche auf den 25 Temperaturprofilen der Jahre der Klimanormalperiode basiert. Interessant ist hierbei die Frage, ob eine Abhängigkeit der auftretenden Heizgradtageszahl eines Jahres und dem unbereinigten Heizenergieverbrauch für den jeweiligen Beispielfall anzunehmen ist. Dies ist beispielsweise aufgrund von technischen Wechselwirkungen, ineffizienten Anlagenregelungen oder einem bestimmten Nutzungsverhalten (etwa häufige Fensterlüftung in der Heizperiode, sehr hohe Raumsolltemperatur) nicht zwangsweise der Fall. Auch für das vorliegende Beispiel ist aus der sehr kleinen Datenstichprobe keine Notwendigkeit erkennbar, die Ziehung des unbereinigten Heizenergieverbrauchs an die Ziehung der Heizgradtageszahl zu koppeln (vgl. Abbildung 19). Der Bravais-Pearson-Korrelationskoeffizient der beiden Größen liegt bei -0,2434. Zum

Zwecke der Vergleichbarkeit der Heizenergieverbräuche unterschiedlicher Jahre ist eine Temperaturbereinigung aber dennoch interessant.

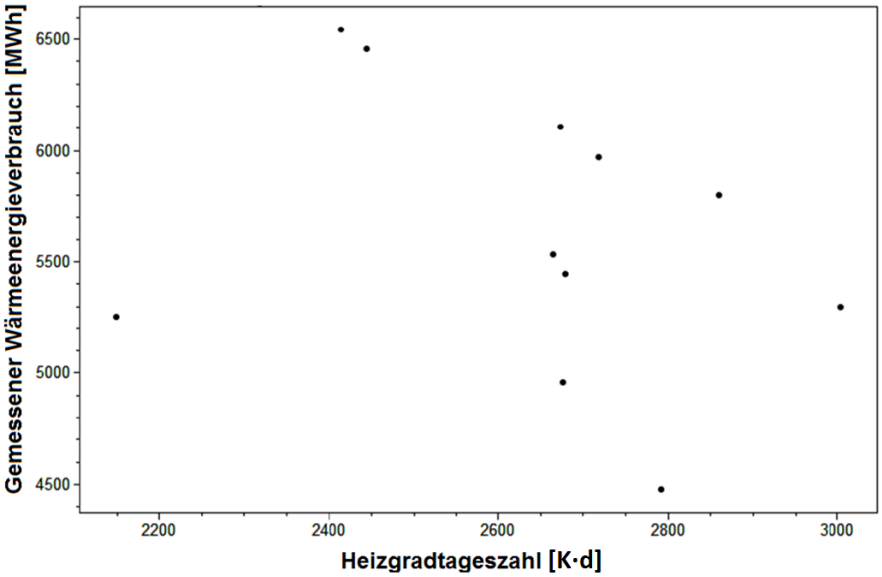

Abbildung 19: Korrelationsanalyse der Heizgradtageszahl und des gemessenen Wärmeenergieverbrauchs [MWh]

Die folgenden Szenarien werden für die Ermittlung möglicher Schwankungsbreiten des Baseline-Verbrauchs beispielhaft diskutiert:

- **Szenario 1**

Für diese Monte-Carlo-Simulation wird der Warmwasserwärmeverbrauch durch eine Gleichverteilung beschrieben, welche durch seinen minimal und maximal aufgetretenen Wert bestimmt ist. Dasselbe gilt auch für den Heizwärmeverbrauch. Abbildung 20 zeigt die Verteilung des normierten Gesamtwärmeverbrauchs, welche nach 1 000 Iterationen resultiert ist.

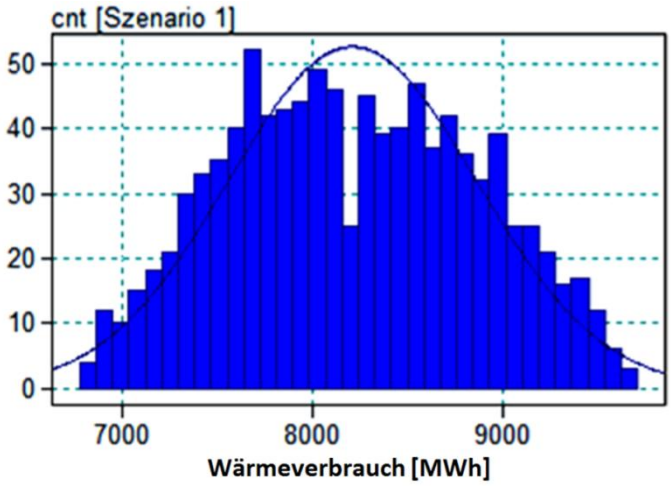

Abbildung 20: Szenario 1, Verteilung des Wärmeverbrauchs [MWh], Monte-Carlo-Simulation (1 000 Iterationen)

- **Szenario 2**

Für die zweite Betrachtung wird der Warmwasserwärmeverbrauch durch eine zu Szenario 1 analogen Gleichverteilung beschrieben. Der Heizwärmeverbrauch wird nun allerdings durch eine Normalverteilung beschrieben, deren Parameter Mittelwert und Standardabweichung aus den zehn bekannten Verbrauchswerten ermittelt werden. Abbildung 21 zeigt die Verteilung der 1 000 Ziehungen umfassenden Monte-Carlo-Simulation.

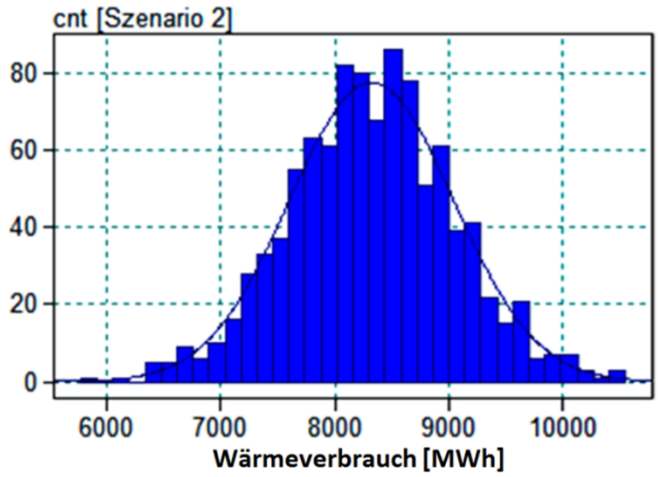

Abbildung 21: Szenario 2, Verteilung des Wärmeverbrauchs [MWh], Monte-Carlo-Simulation (1 000 Iterationen)

- **Szenario 3**

Letztlich wird noch die Annahme getestet, dass sowohl der Warmwasserwärmeverbrauch, als auch der Heizwärmeverbrauch einer Normalverteilung unterliegen. Dabei werden deren Mittelwert und Standardabweichung aus den jeweiligen Werten der Stichprobe berechnet. Abbildung 22 stellt das Histogramm der 1 000 simulierten Gesamtwärmeverbräuche dar.

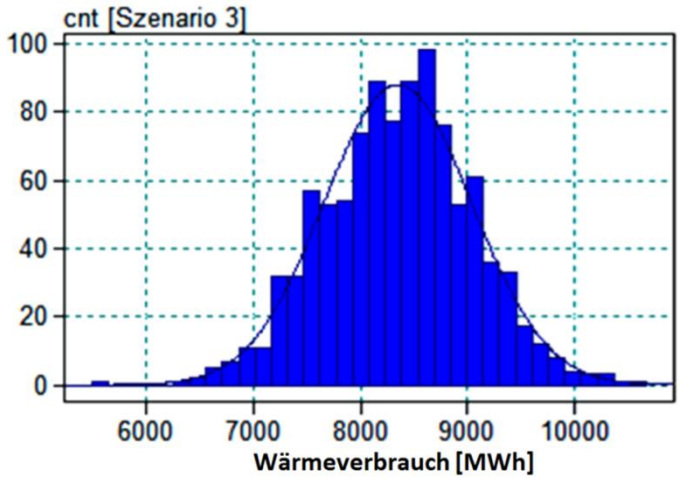

Abbildung 22: Szenario 3, Verteilung des Wärmeverbrauchs [MWh], Monte-Carlo-Simulation (1 000 Iterationen)

Abbildung 23 vergleicht die Verteilungen der drei untersuchten Szenarien mittels Boxplotdarstellung. Tabelle 3 stellt zum Vergleich Kenngrößen der Datenstichprobe zur Schau, wobei sowohl deren Absolutwerte, als auch ein relativer Vergleich gegenüber den Datenmittelwerten angegeben ist.

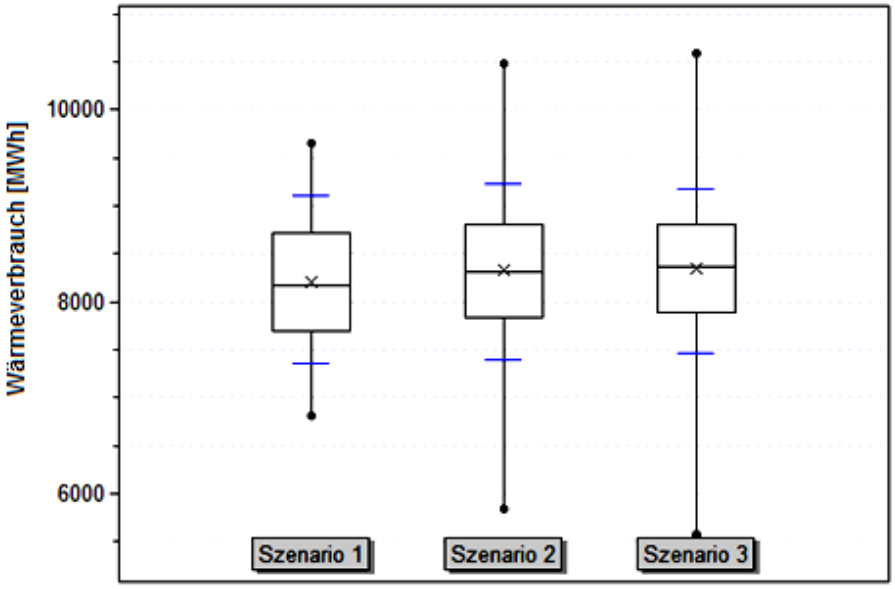

Abbildung 23: Vergleich der Simulationsergebnisse der drei angenommenen Szenarien

Es zeigt sich, dass die Größe und Lage der Boxen in Abbildung 23 relativ ähnlich zueinander sind. Ähnliches trifft auch auf die blau dargestellten 0,1- bzw. 0,9-Quantile zu, die verbleibende Länge der Whiskers ist allerdings für Szenario 2 und Szenario 3 sehr groß, was auf eine Große Streuung der Sample im Randbereich hinweist. Für die weitere Betrachtung der Baseline scheinen die unteren und oberen Quartile der Verteilungen als Intervallbegrenzung für eine realistische Schwankungsbreite der Baseline geeignet. In Abbildung 20, Abbildung 21 und Abbildung 22 ist jeweils die zum Histogramm passende hypothetische Normalverteilung dargestellt, nachdem die Temperaturprofile der Simulationen aus Normalverteilungen basierend auf den 25-jährigen Messaufzeichnungen stammen und auf Basis des gezogenen Profils die Heizgradtageszahl berechnet wird.

Szenario 2 und Szenario 3 sind aufgrund der verwendeten Normalverteilung nicht als Baseline-Szenario über den gesamten Intervallbereich geeignet, nachdem die Verwendung einer derart großen Schwankungsbreite nicht zweckdienlich ist. Basierend auf den bekannten Informationen zum betrachten Beispielgebäude, scheint Szenario 1 am praktikabelsten zu sein, nachdem die gesamte Unsicherheit des Verbrauchs aufgrund der verwendeten Gleichverteilungen in realistischem Ausmaß auftritt, während dies bei den anderen beiden Annahmen nicht der Fall ist.

Tabelle 3: Kenngrößen der Datenstichprobe

	Gemessener Wärmeenergieverbrauch	Warmwasser-wärmebedarf	Gesamtwärme-verbrauch
Absolutwerte [MWh]			
Minimum	4 477	2 225	6 702
Mittelwert	5 622	2 668	8 291
Maximum	6 545	3 102	9 647
Standardabweichung	629	272	901
Relative Werte bezüglich der Mittelwerte			
Minimum	79,6%	83,4%	80,8%
Maximum	116,4%	116,3%	116,4%
Standardabweichung	11,2%	10,2%	10,9%

Grundsätzlich kann angemerkt werden, dass die Monte-Carlo-Simulation in diesem Kontext den Vorteil mit sich bringt, die Schwankungsbreite der Baseline zu quantifizieren, selbst wenn aus den vorhandenen Daten nur wenig Information über das Verbrauchsverhalten hervorgeht. Im behandelten Beispiel konnten die Quartile der Verteilungen der Zielgröße als brauchbare Eingrenzung des zukünftig erwartbaren Wärmeverbrauchs angenommen werden. Dadurch ist eine solidere Grundlage für die Schätzung der Schwankungsbreite der Baseline gegeben, als dies für eine willkürliche Auswahl einer relativen Schwankung der Fall wäre.

Eine ähnliche Normalisierung wie die hier dargestellte kann auch für Abhängigkeiten von anderen externen Einflussgrößen erfolgen. Hierfür kann analog zum Verhältnis der Gradtageszahl vorgegangen werden, wobei ein längerfristiger Mittelwert der identifizierten Einflussgröße und ihr Wert im jeweiligen Betrachtungsjahr zueinander ins Verhältnis zu setzen sind. Hierbei ist es analog zum beschriebenen Vorgehen sinnvoll, basierend auf realistischen Annahmen den unsicheren Modellparametern geeignete statistische Verteilung zuzuordnen.

3.2.2 Normalisierung von Energieverbrauchsdaten durch ein Regressionsmodell

Sofern zu einem Gebäude Energieverbrauchsdaten in sehr guter Detailtiefe (beispielsweise auf Tagesebene) vorliegend sind, kann der Einfluss externer Einflussgrößen auf den Energieverbrauch mit Hilfe einer Regressionsanalyse untersucht werden. Dies soll im Folgenden anhand eines Beispielgebäudes erläutert werden, bei welchem es sich um ein Hotel in Wien handelt. Der elektrische Jahresenergieverbrauch der betrachteten Periode betrug 2 931 695 kWh.

Abbildung 24 zeigt ein Histogramm und die Boxplotdarstellung der elektrischen Tagesenergieverbräuche, aus welchem bereits ein breites Wertespektrum erkennbar ist. Gemäß der in Abbildung 17 angeführten Auflistung, wird der Einfluss der externen Einflussparameter

Außentemperatur, Belegungsdichte bzw. Hotelauslastung und des Wochentags auf den Energieverbrauch im Rahmen der Regressionsanalyse getestet.

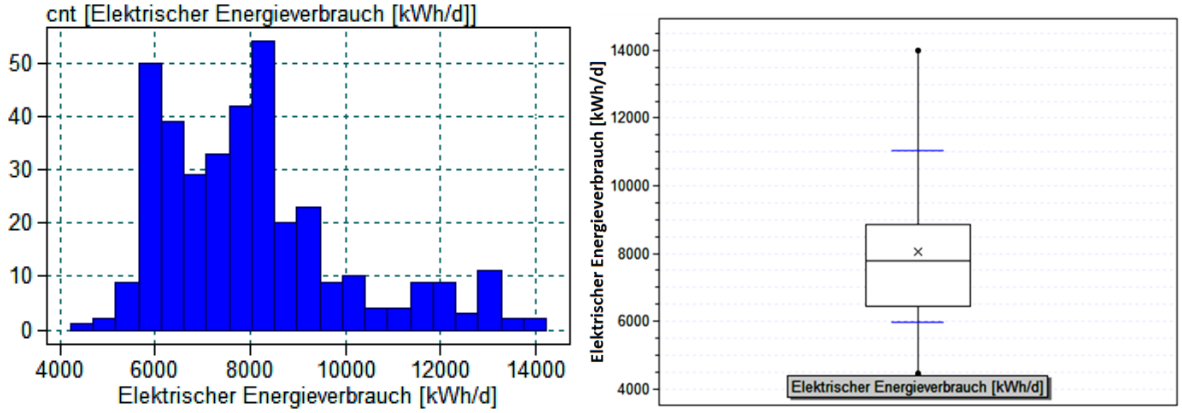

Abbildung 24: Histogramm und Boxplot der Tagesenergieverbräuche des Beispielgebäudes

Bevor die Regressionsanalyse begonnen wird, wird die Datenstichprobe bezüglich möglicher Ausreißer überprüft. Im vorliegenden Fall wurde über einen Zeitraum von circa zwei Wochen für die Garagenanlage des Hotelgebäudes ein Heizsystem getestet, welches letztlich jedoch nicht angeschafft wurde. In der Testphase kam es zu einem täglichen Mehrverbrauch von rund 2 000 kWh. Diese Werte werden für die Regressionsanalyse als Ausreißer betrachtet und ausgeschlossen. Ist eine erkennbare Verbrauchsanomalie einer Datenstichprobe jedoch nicht erklärbar, so sollte der Ausschluss der betroffenen Daten nur dann erfolgen, wenn dieser argumentierbar ist.

Für das hier untersuchte Hotelgebäude stehen Werte auf Tagesbasis für den Energieverbrauch, die Belegungsdichte der Zimmer, den jeweiligen Wochentag und die Außentemperatur zur Verfügung. Um herauszufinden, welche Parameter den Tagesenergieverbrauch tatsächlich beeinflussen, wird zunächst ein multilineares Regressionsmodell mit den Einflussvariablen Außentemperatur, Wochentag und Auslastung des Hotels untersucht. Durch schrittweise Modellselektion werden all jene Parameter ausgeschieden, welche keinen signifikanten Einfluss auf den auftretenden Tagesenergieverbrauch haben. Für die entsprechenden Hypothesentests lautete die Nullhypothese H_0: $\beta_i = 0$, dass also der Parameter i keinen signifikanten Einfluss auf die Zielgröße des Regressionsmodells hat. Das Konfidenzintervall wird mit 95 % festgelegt, sodass das Signifikanzniveau α 5 % beträgt. Darüber hinaus liefern die Werte des Akaikeschen (AIC) bzw. des Bayesschen (BIC) Informationskriteriums weitere Anhaltspunkte zur Modellbeurteilung. Ist die Annahme eines linearen Zusammenhangs der betrachten Größen nicht zielführend zur Auswahl der tatsächlichen Einflussparameter, so muss ein anderer funktionaler Zusammenhang untersucht werden.

Tabelle 4 zeigt die Werte des AIC- und BIC-Informationskriteriums sowie des Bestimmtheitsmaßes in Abhängigkeit der unterschiedlichen Kombinationen betrachteter Einflussparameter. Dabei wird deutlich, dass nur Kombinationen, welche die Außentemperatur beinhalten, ein hohes

Bestimmtheitsmaß aufweisen. Während eine reine Berücksichtigung des Bestimmtheitsmaßes die Auswahl des Falls bevorzugen würde, bei welchem alle drei Einflussgrößen im Modell vertreten sind, ist bei Mitberücksichtigung der beiden Informationskriterien jener mit ausschließlicher Berücksichtigung des Außentemperatureinflusses am vielversprechendsten.

Tabelle 4: Informationskriterien und Bestimmtheitsmaß je nach Einflussparametern

Berücksichtigte Einflussparameter			**AIC**	**BIC**	**Bestimmtheitsmaß**
Außentemperatur	**Wochentag**	**Auslastung**			
x	x	x	4 128	4 139	0,7584
x	x		4 128	4 136	0,7567
x		x	4 128	4 136	0,7568
	x	x	4 546	4 553	0,0023
x			4 128	4 131	0,7556
	x		4 544	4 548	0,0017
		x	4 545	4 548	0,0003

Die Annahme, dass nur die Außentemperatur den Tagesenergieverbrauch signifikant beeinflusst, soll mittels Signifikanztests überprüft werden. Nach Auswahl der signifikanten Einflussparameter wird jener funktionale Zusammenhang gesucht, der das höchste Bestimmtheitsmaß aufweist bzw. die beste Beschreibung liefert.

Zunächst wird ein Signifikanztest unter Berücksichtigung aller drei Einflussparameter durchgeführt, deren jeweilige p-Werte in Tabelle 5 aufgelistet sind. Der Parameter „Wochentag“ weist dabei den höchsten p-Wert auf und es gilt $p > \alpha$, sodass für diesen die Nullhypothese angenommen und der Parameter aus dem Modell entfernt wird.

Tabelle 5: Signifikanztest, 3 Einflussparameter

Einflussparameter	**p-Wert**
Außentemperatur	0,0000
Auslastung	0,1572
Wochentag	0,1752

Abbildung 25 zeigt die Abweichung der tatsächlichen Werte der Datenstichprobe zu den mit Hilfe des Modells errechneten sowie die Verteilung der Residuen.

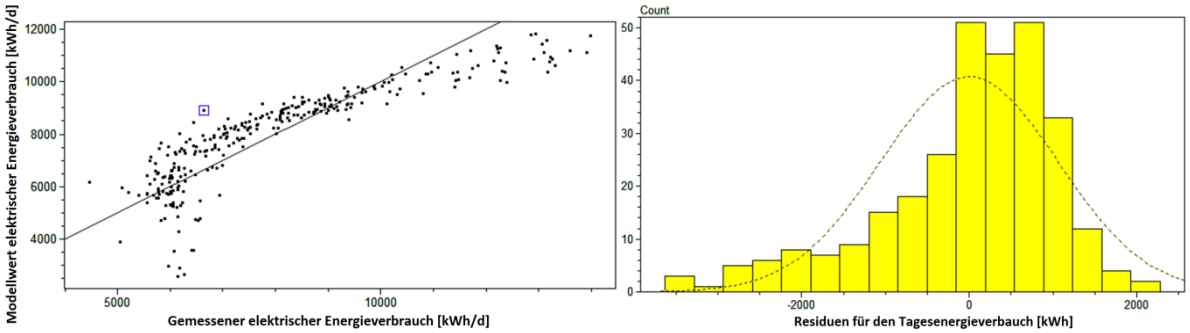

Abbildung 25: Abweichung der Modelldaten zu den tatsächlichen Werten (l.) und Verteilung der Residuen (3 Parameter)

Der Signifikanztest wird für die beiden übrigen Einflussgrößen wiederholt, Tabelle 6 zeigt deren zugehörige p-Werte. Für den Einflussparameter „Auslastung“ ist die Bedingung $p > \alpha$ erfüllt, sodass auch dieser als nicht signifikant angenommen wird. Dies ist eine interessante Beobachtung, nachdem eine Unabhängigkeit des Energieverbrauchs des Hotels von dessen Auslastung auf eine eher unökonomische Betriebsweise hinweist.

Tabelle 6: Signifikanztest, 2 Einflussparameter

Einflussparameter	p-Wert
Außentemperatur	0,0000
Auslastung	0,2190

Abbildung 26 zeigt die Abweichung der tatsächlichen Werte der Datenstichprobe zu den mit Hilfe des Modells errechneten sowie die Verteilung der Residuen für die beiden betrachteten Einflussparameter.

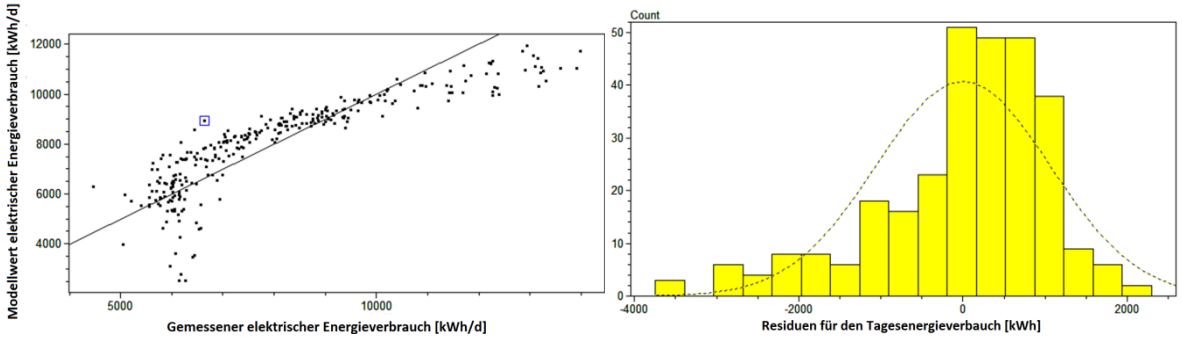

Abbildung 26: Abweichung der Modelldaten zu den tatsächlichen Werten (l.) und Verteilung der Residuen (2 Parameter)

Für den letztlich verbleibenden Einflussparameter „Außentemperatur“ wird abschließend eine lineare Regression durchgeführt. Der entsprechende Signifikanztest liefert für diesen Fall einen p-Wert von 0,0000, sodass die Nullhypothese abgelehnt und ein signifikanter Einfluss der Außentemperatur auf den Energieverbrauch angenommen wird.

Es zeigt sich, dass die Abhängigkeit des Energieverbrauchs von der Außentemperatur am besten durch eine quadratische Funktion beschrieben werden kann, welche in Abbildung 27 dargestellt ist. Das Bestimmtheitsmaß R^2 des in Formel (3.2) angegebenen parabolischen Modells entspricht einem Wert von 0,9237. Verwendet man dieses Modell zur Berechnung des tatsächlich gemessenen Energieverbrauchs, indem man die beobachteten Temperaturwerte einsetzt, so beträgt die Abweichung zum abgelesenen Jahresenergieverbrauch rund 5,1 %. Berücksichtigt man den Mehrverbrauch an den Tagen, welche als Ausreißer in der Modellbildung ausgeschlossen worden sind, so beträgt die Abweichung nur noch 3,8 %. Der Mehrverbrauch der Ausreißer wird in der weiteren Betrachtung jedoch nicht berücksichtigt, nachdem die dafür verantwortliche Anlage auch in Zukunft nicht im Gebäude zum Einsatz kommen wird und damit uninteressant ist.

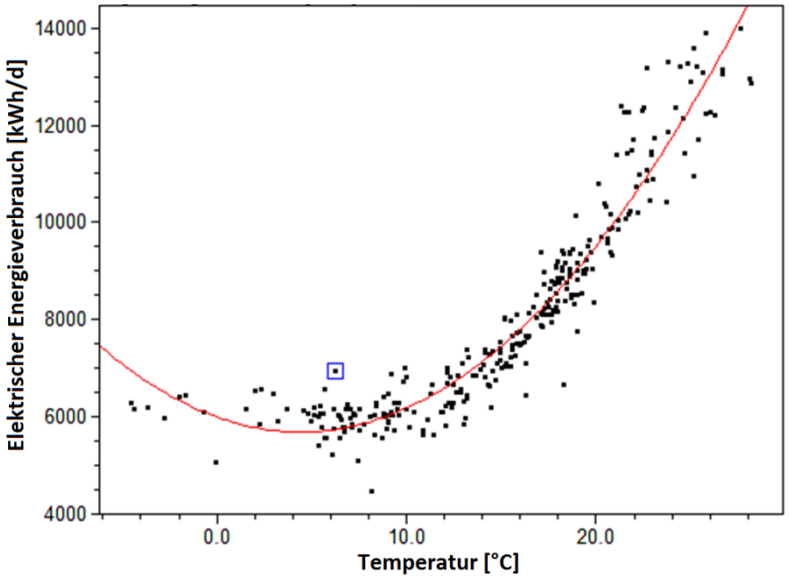

Abbildung 27: Regressionsmodell (l., rot), Residuenplot (r.)

$$E(T) = 15{,}8397 \cdot T^2 - 140{,}320 \cdot T + 5987{,}11 \qquad (3.2)$$

E(T)…….Energieverbrauch in Abhängigkeit der Außentemperatur [kWh]

T……..Außentemperatur [°C]

Abbildung 28 zeigt den Residuenplot und die Verteilung der Residuen, welche mit der angedeuteten hypothetischen Normalverteilung qualitativ beschreibbar ist. Die Residuen zeigen im Residuenplot zumindest bis zu einer Außentemperatur von 20 °C eine zufällige Streuung und kein erkennbares Muster. Damit kann die Verteilung der Residuen näherungsweise als Normalverteilung angenommen und damit die Zulässigkeit der Anwendung der Regressionsanalyse qualitativ argumentiert werden.

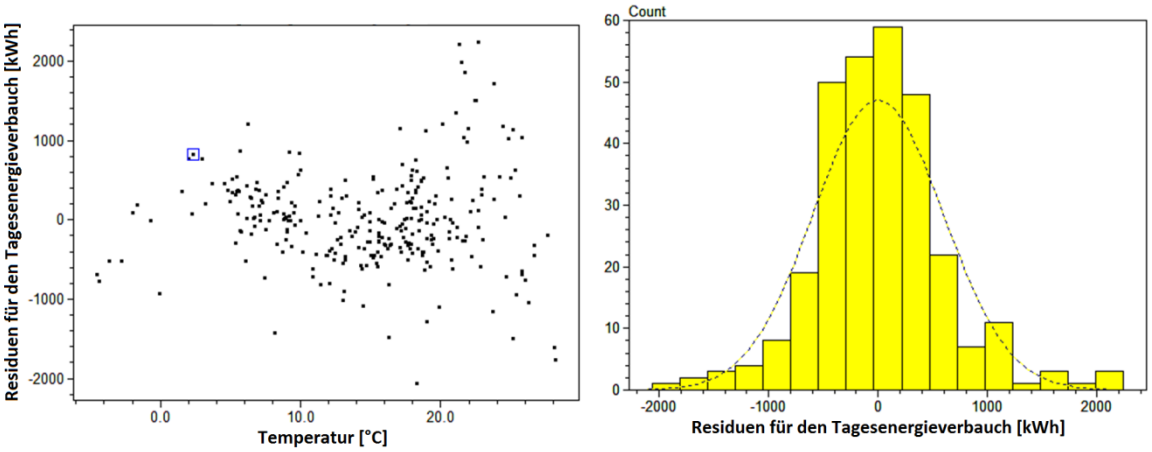

Abbildung 28: Residuenplot (l.) und Verteilung der Residuen (r.) des ermittelten Modells

Nachdem für das betrachtete Beispielgebäude ein geeignetes Regressionsmodell zur Beschreibung des Tagesenergieverbrauchs in Abhängigkeit des identifizierten externen Einflussparameters Außentemperatur ermittelt werden konnte, wird eine Monte-Carlo-Simulation zur Normalisierung der Baseline durchgeführt. Aus der Klimanormalperiode, welche aus den von der ZAMG zur Verfügung gestellten Daten errechnet worden ist, ist die Verteilung der Außentemperatur für jeden Tag eines Kalenderjahres bekannt. Aus diesen Tagesverteilungen wird jeweils ein Temperaturwert gezogen, mit dem der Energieverbrauch des entsprechenden Tages nach (3.2) errechnet wird. Die Summe der Tagesenergieverbräuche über das Kalenderjahr ergibt letztlich den zum gezogenen Temperaturprofil erwartbaren Baseline-Jahresverbrauch.

Zur Beurteilung des Einflusses der Anzahl von Iterationen auf die Verteilung des simulierten Baseline-Verbrauchs, wird die Monte-Carlo-Simulation für das betrachtete Beispielgebäude dreimal mit unterschiedlichem Umfang durchgeführt. Die Anzahl der Iterationen beträgt dabei 1 000, 10 000 und 500 000. Abbildung 29 stellt die entsprechenden Verteilungen des Baseline-Energieverbrauchs und die zugehörigen Boxplots gegenüber. Erwartungsgemäß nimmt die Breite der Histogramm-Balken mit zunehmendem Stichprobenumfang ab. Für eine Anzahl von 500 000 Iterationen der Monte-Carlo-Simulation ist das entsprechende Histogramm kaum mehr von der hypothetischen Normalverteilung der Werte unterscheidbar. Je höher die Anzahl der Iterationen gewählt wird, desto weiter sind die auftretenden Extremwerte vom Mittelwert entfernt, was ebenso zu erwarten gewesen ist. Die Ausdehnung der Boxen sowie die Lage der 0,1- bzw. 0,9-Quantile ist für die drei unterschiedlichen Ziehungsumfänge vergleichbar ausgeprägt.

Dieser Vergleich zeigt, dass eine gewählte Anzahl von 1 000 Iterationen für die Monte-Carlo-Simulationen der weiteren Arbeit ausreichend und zweckmäßig ist. Die Wahl eines besonders großen Umfangs der Ziehungen ist nicht empfehlenswert und für den eigentlichen Zweck nicht dienlich.

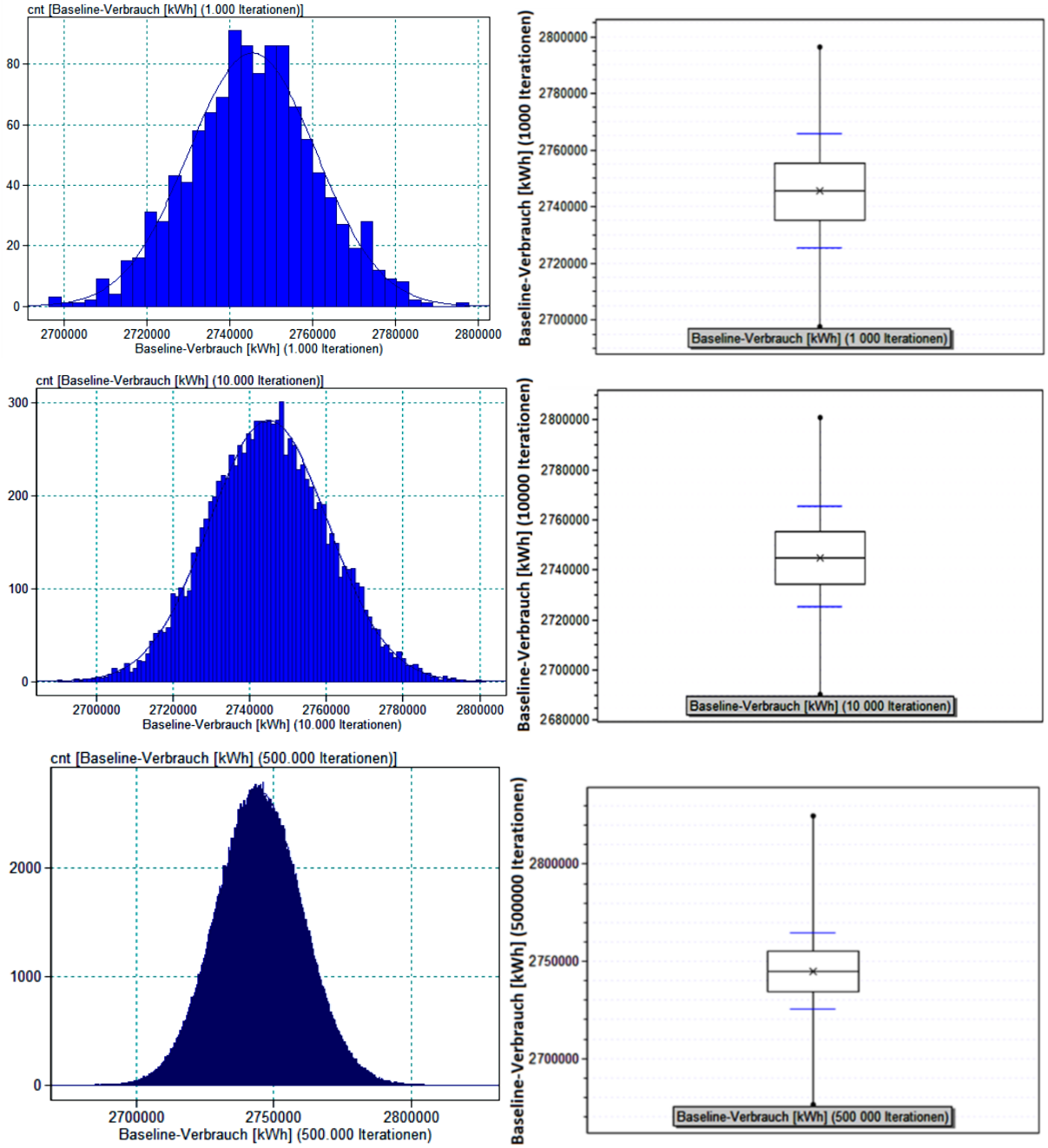

Abbildung 29: Vergleich der Verteilung des Baseline-Verbrauchs bei unterschiedlicher Anzahl von Iterationen

Abbildung 30 zeigt ein weiteres Beispiel eines Regressionsmodells zur Ermittlung des Wärmeenergieverbrauchs in Abhängigkeit von externen Einflussgrößen. Bei dem betrachteten Gebäude handelt es sich dabei um ein Krankenhaus. Die Analyse der externen Einflussgrößen verlief analog zum vorangegangen Beispiel. Auch in diesem Fall ist die Außentemperatur die einzige signifikante Einflussgröße für den Energieverbrauch. Das Bestimmtheitsmaß R^2 für das quadratische Regressionsmodell liegt bei 0,8778, die Abweichung von tatsächlich gemessenem und prognostiziertem Verbrauch beträgt 1,4 %.

In Abbildung 30 sind neben dem Regressionsmodell (blau) auch jene Funktionen dargestellt und angegeben, welche das 95-%-Konfidenzintervall begrenzen. Sofern es durch die Streuung der Residuen zum Regressionsmodell sinnvoll erscheint, kann nicht nur der mittels Regressionsfunktion errechnete Wert, sondern auch die durch die Residuen bedingte Schwankungsbreite zu diesem Wert angegeben werden. Die Darstellung des „Konfidenzbandes“ um die Regressionsfunktion verdeutlicht zudem die Bereiche, in welchen die Residuen besonders klein bzw. groß sind.

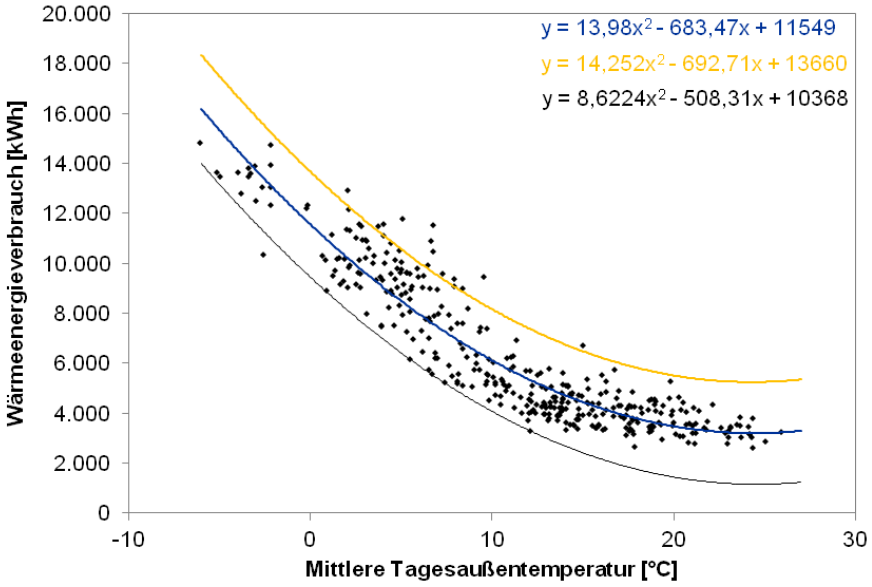

Abbildung 30: Konfidenzintervall eines Regressionsmodells

3.3 Simulationsmodelle für die Berechnung des Einspareffekts ausgewählter Maßnahmen

In diesem Abschnitt werden zu drei ausgewählten Verbrauchsbereichen in Gebäuden Bewertungen von Energieeffizienzmaßnahmen durchgeführt, um die Anwendbarkeit der vorgestellten Methode zu demonstrieren. Die Auswahl der betrachteten Gewerke basiert dabei zum einen auf deren praktischer Bedeutung, zum anderen auf der Verfügbarkeit verwendbarer Daten im Rahmen der Arbeit. Bei den ausgewählten Beispielen wird darauf geachtet, dass zumindest Jahresverbrauchswerte zur Verfügung stehen, mit welchen die simulierten Einspareffekte verglichen und plausibilisiert werden können, um letztlich auch die zu erwartende Qualität der Bewertung nach der vorgestellten Methode beurteilen zu können. Für die betrachteten Beispielgebäude wird auch der Baseline-Verbrauch simuliert, um die verwendeten Simulationsmodelle durch den Vergleich mit den tatsächlich gemessenen Verbrauchsdaten verifizieren zu können.

Für bewertete Beispielmaßnahmen in diesem Abschnitt, zu welchen in der Anlage 1 der „Verordnung des Bundesministers für Wissenschaft, Forschung und Wirtschaft über die Richtlinien für die Tätigkeit

der nationalen Energieeffizienz-Monitoringstelle (Energieeffzienz-Richtlinienverordnung)“ eine Bewertungsmethode angegeben ist, erfolgt ein Vergleich der beiden Methoden.

Die Bewertung der behandelten Beispiele fokussiert dabei auf die Reduktion des Energieeinsatzes zur Erfüllung bestimmter Anforderungen. Die Möglichkeit der Bewertung einer Steigerung der Energieeffizienz durch eine Erhöhung des Outputs bei gleichem Energieeinsatz wird dabei nicht betrachtet, nachdem diese Bewertung in manchen Fällen nicht nach objektiven Kriterien möglich ist. Ein Beispiel für eine derartige Bewertung ist der Vergleich des Lichtstroms bzw. der Lichtausbeute bei Leuchtmitteln gleicher elektrischer Anschlussleistung.

3.3.1 Beleuchtung

In praktisch jedem Gebäude kommen elektrische Leuchtmittel zum Einsatz, mit deren Hilfe Innenräume oder Außenbereiche künstlich beleuchtet werden können. Für Innenräume war jahrzehntelang die Glühbirne ein bedeutender Vertreter zur Beleuchtung, welche sich unter anderem durch ein allgemein als angenehm empfundenes Leuchtspektrum auszeichnete. Allerdings wird bei ihrer Verwendung der Großteil des elektrischen Energieeinsatzes in Wärme umgewandelt und nur ein geringer Restanteil für den eigentlichen Zweck verwertet. In Folge verschiedener Energieeffizienzbemühungen zur Reduktion des elektrischen Energieeinsatzes für Beleuchtungszwecke, befindet sich der Beleuchtungssektor in den letzten Jahren in einer Umstrukturierung, welche sich durch den verstärkten Einsatz energieeffizienter Leuchtmittel, insbesondere von Leuchtdioden (LED), bemerkbar macht. Daher ist die Behandlung von entsprechenden Energieeffizienzmaßnahmen an dieser Stelle interessant.

3.3.1.1 Maßnahmenauswahl und Simulationsmodelle

Mögliche Maßnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz der Gebäudebeleuchtung sind beispielsweise die folgenden:

- **Optimierung der Leuchtmittel**

Wie eingangs erwähnt, ist die Leistungsaufnahme, welche zur Bereitstellung der gewünschten Beleuchtungsverhältnisse erforderlich ist, vom jeweiligen Leuchtmittel und dessen Effizienz abhängig. Es ist daher vom Standpunkt der Energieeffizienz empfehlenswert, abhängig vom gewünschten Lichtstrom jenen Leuchtkörper zu wählen, welcher diesen bei geringster elektrischer Leistungsaufnahme bereitstellt.

- **Optimierung der Beleuchtungszeit**

Die Regelung der Leuchtmittel kann auf unterschiedliche Arten erfolgen. Ein häufiger Vertreter ist dabei die simple Regelung mittels manuell bedienbarer Lichtschalter, wobei deren Energieeffizienz in erster Linie von der Umsicht der Gebäudenutzer abhängig ist. Weitere Möglichkeiten stellen Präsenzmelder oder Tageslichtsensoren dar, welche externe Einflüsse entsprechend berücksichtigen und dadurch zur Vermeidung unnützer Beleuchtungszeit beitragen. Durch Zeitprogramme kann zudem erreicht werden, dass außerhalb der Gebäudenutzungszeit die Beleuchtung in jedem Fall vom Netz genommen wird.

- **Anpassung der Beleuchtungsstärke**

Wird die Beleuchtungsstärke eines Raumes an den tatsächlichen Bedarf angepasst, so kann eine Energieeffizienzsteigerung erreicht werden, wenn in weiterer Folge entweder Leuchtmittel mit geringerer Leistungsaufnahme zum Einsatz kommen bzw. deren Anzahl reduziert werden kann. Hierbei kann auch die Einteilung von Leuchtmitteln in unterschiedliche Gruppen vorteilhaft sein. Dies trifft beispielsweise auf ein Großraumbüro zu, dessen Beleuchtung unterschiedlich zoniert ist und somit der Beleuchtungseinsatz auf die Anzahl der tatsächlich anwesenden Personen abgestimmt werden kann.

- **Einsatz dimmbarer Leuchtmittel**

Durch die Verwendung von dimmbaren Leuchtmitteln kann deren elektrische Leistungsaufnahme reduziert werden, wenn dies aufgrund der natürlichen Lichtverhältnisse möglich ist. Dies kann in Kombination mit Tageslichtsensoren vollautomatisch passieren, was beispielsweise für Außenbeleuchtungen interessant ist, oder mit manuellen Lichtschaltern umgesetzt werden.

Die passende Kombination dieser Konzepte kann bezüglich der gewünschten Ausleuchtung und der Energieeffizienz zu einem optimalen Ergebnis führen. Letztlich führen Maßnahmen im Bereich der Beleuchtung entweder zu einer Reduktion der Beleuchtungszeit oder bzw. und zu einer Verminderung der elektrischen Leistungsaufnahme. Das Bewertungsmodell der folgenden Beispiele basiert hierbei auf Viertelstundenebene und somit auf rund 34 200 Verbrauchswerten, aus welchen der Jahresenergieverbrauch für die Beleuchtung ermittelt wird. Je nach Datenbasis sind für die einzelnen Wochentage und Tageszeiten empirische Verteilungsfunktionen direkt bekannt oder aufgrund von Annahmen der Gebäudebetreiber konstruierbar.

3.3.1.2 Anwendungsbeispiele für Maßnahmenbewertungen

Zur Bewertung von Energieeffizienzmaßnahmen, welche den Bereich Beleuchtung betreffen, werden im Folgenden vier Beispiele behandelt. Diese unterscheiden sich auch in der Detailliertheit der für die Analyse verfügbaren Daten. Sind Energieverbräuche zumindest auf Tagesebene bekannt, so wird die Datendichte als „hoch“ bezeichnet.

Beispiele mit hoher Datendichte

- **Beispiel 1: Leuchtmitteltausch und Betriebszeitoptimierung**

Für ein Bürogebäude, welches von 20 Personen genutzt wird, soll eine Energieeffizienzmaßnahme im Bereich Beleuchtung bewertet werden. Kenndaten zur Gebäudecharakterisierung sind in Tabelle 7 angegeben. Im Rahmen einer Gebäudesanierung wurde ein Tausch der Leuchtmittel vorgenommen, dessen Auswirkungen ebenso bewertet werden wie die weitere Optimierung der Beleuchtungszeit. Die tatsächliche Energieeinsparung aufgrund des Leuchtmitteltausches dient zudem als Vergleichswert für das Simulationsergebnis.

Tabelle 7: Kenndaten des Beispielgebäudes 1

Gebäudetyp	Büro
Fläche [m²]	520
Nutzeranzahl	20
Baujahr	1990
Sanierungsjahr	2014
Bauweise	Betonbau
Fassadentyp	einschalig
Energietechnischer Standard	sehr gut
Gesamter Energieverbrauch [kWh/a]	71 480
Energiekosten [€/a]	9 400

Ausgangssituation und Maßnahmenbeschreibung

Die Gesamtleistung der ursprünglich eingesetzten Leuchtstoffröhren betrug 4,62 kW, welche im Rahmen einer Gebäudesanierung durch LED ersetzt wurden. Im Rahmen der Maßnahmenumsetzung wurden die Leuchtmittel neu positioniert, sodass die Arbeitsplätze der Gebäudenutzer optimal ausgeleuchtet werden und die Leistungsaufnahme der Beleuchtung an den Belegungsgrad des Gebäudes angepasst werden kann. Die maximale Leistungsaufnahme der neuen LED-Leuchtmittel beträgt 1,2 kW. Der Energieverbrauch der Beleuchtung ist auf Basis von Viertelstundenwerten für ein Jahr bekannt. Abbildung 31 zeigt den Mittelwert der elektrischen Leistungsaufnahme der neuen Leuchtmittel, wobei man erkennt, dass diese im Mittel auch nachts nicht unter den Wert von 0,1 kW sinkt. Dies motiviert eine weitere Energieeffizienzmaßnahme, nämlich die Verhinderung der Gebäudebeleuchtung in den Nachtstunden. Dies wird durch einen zentralen Regler erreicht, welcher jeweils vom ersteintreffenden Mitarbeiter morgens bzw. vom letzten Mitarbeiter abends betätigt wird und die gesamten Leuchtmittel samt deren Regelungseinheiten stromlos macht. Der aktuelle Nachtverbrauch ist zum einen dadurch bedingt, dass die Beleuchtung manuell geregelt wird und es vorkommt, dass diese aus Unachtsamkeit der Gebäudenutzer auch nachts in Betrieb bleibt. Zum anderen liegt das Gebäude in einem dünn bebauten Gebiet, in welchem häufig Wildtiere

anzutreffend sind, welche die außen angebrachten Bewegungsmelder auslösen. Eine Beleuchtung des Gebäudes ist nach Rücksprache mit den Benutzern ausdrücklich nur dann erforderlich, wenn das Gebäude in Verwendung ist.

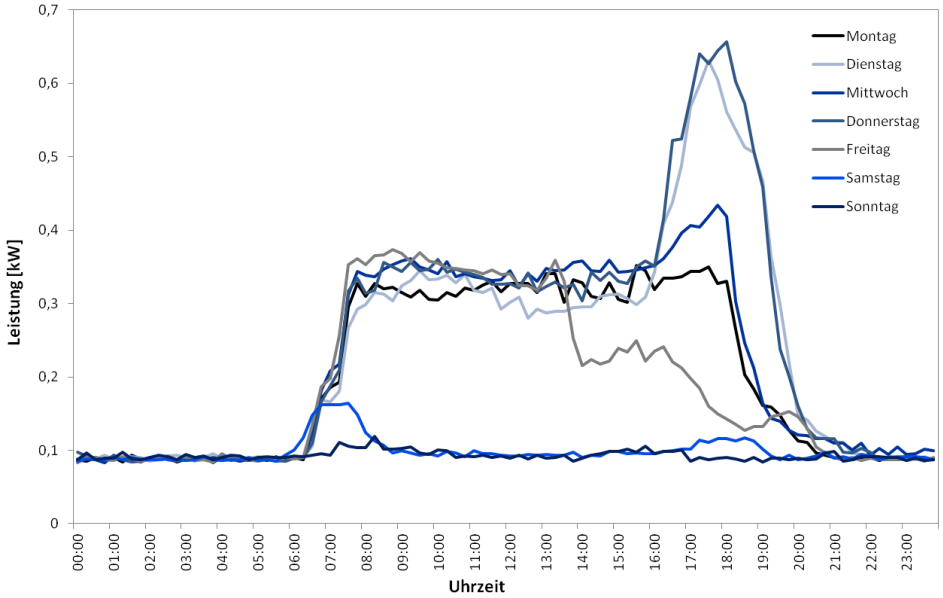

Abbildung 31: Mittelwert der Leistungsaufnahme in Abhängigkeit des Wochentags, Gebäude 1

Abbildung 32 zeigt den Carpet-Plot der elektrischen Leistungsaufnahmen des Beleuchtungssystems für das Kalenderjahr 2015. Diese Rasterdarstellung wird im Rahmen von Energieanalysen sehr häufig verwendet, um einen qualitativen Gesamtüberblick über das Verbrauchsmuster eines Gebäudes oder einer Anlage zu erhalten. Jede Zeile entspricht in der Darstellung den zeitlich aneinandergereihten Leistungswerten eines Tages. Dadurch können zusätzliche Informationen über das Verbrauchsverhalten gewonnen werden. Die Abbildung verdeutlicht beispielsweise auch erhöhte Leistungsaufnahmen in jenen Zeiten, in welchen das Gebäude nicht genutzt wird.

Für die Bewertung des Energieeinspareffekts der beiden Maßnahmen ist die Untersuchung möglicher externer Einflussparameter auf den Beleuchtungsbedarf interessant. Aus Abbildung 31 ist ersichtlich, dass eine Abhängigkeit des Beleuchtungsverbrauchs vom Wochentag und insbesondere von der Tageszeit gegeben ist. Als mögliche externe Einflussparameter kommen insbesondere die natürlichen Lichtverhältnisse in Frage. Zur Untersuchung von deren Einfluss auf den Beleuchtungsenergieverbrauch, wurden von der ZAMG Stundendaten zur Sonnenscheindauer und zur Niederschlagsmenge, welche als Indikator für den Bewölkungsgrad angenommen werden kann, für die zum Gebäudestandort nächstgelegene Wetterstation zur Verfügung gestellt.

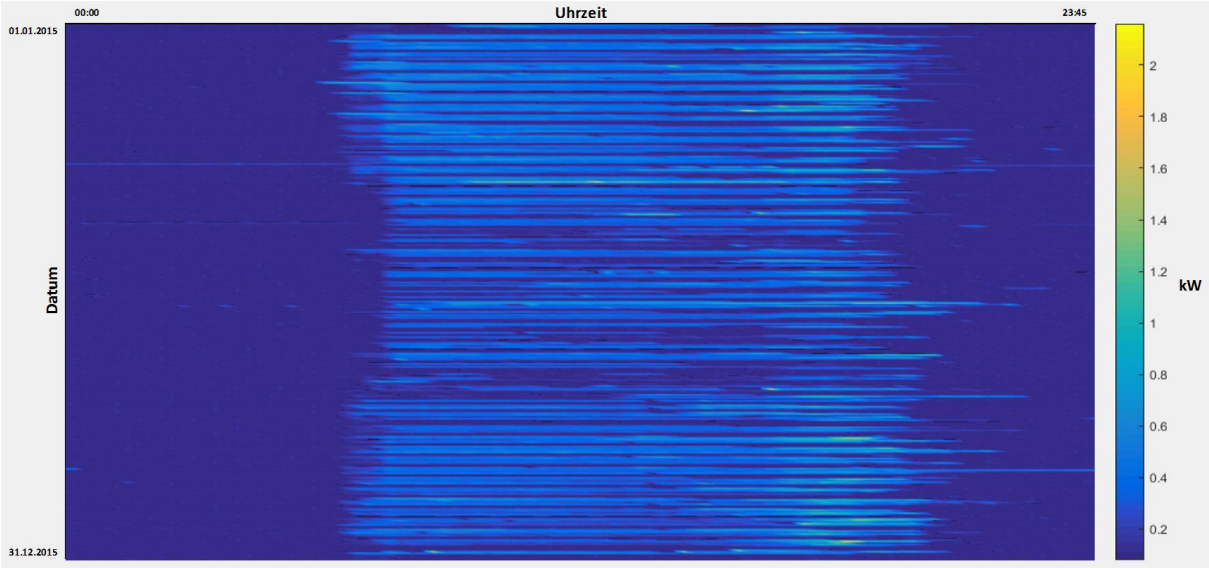

Abbildung 32: Carpet-Plot der Leistungswerte, Gebäude 1

Abbildung 33 und Abbildung 34 stellen die zugehörigen Regressionsmodelle für die beiden untersuchten Einflussparameter dar. Die entsprechenden Residuenverteilungen weichen deutlich von der dargestellten hypothetischen Normalverteilung der Daten ab. Zudem ist bereits anhand der beiden Datenplots ersichtlich, dass keine Abhängigkeit des Tagesenergieverbrauchs der Beleuchtung von den beiden Einflussgrößen angenommen werden kann.

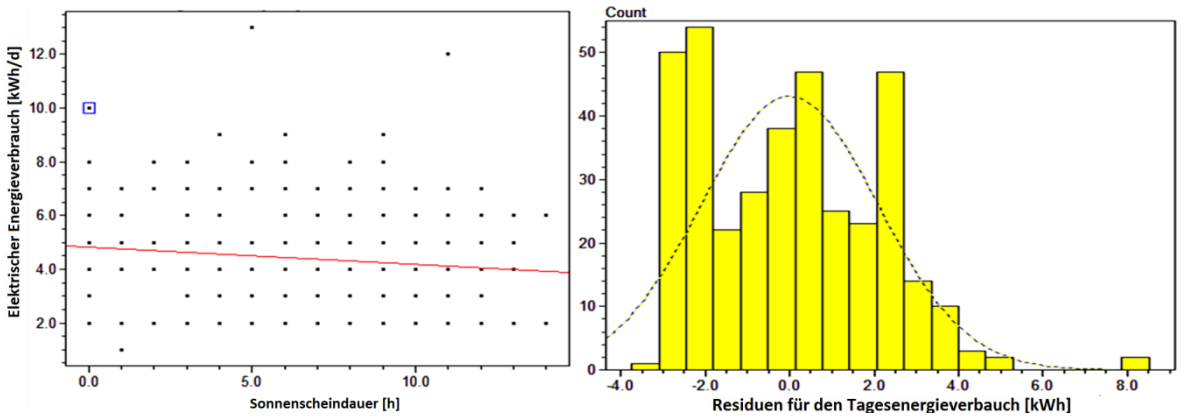

Abbildung 33: Regressionsanalyse zur Sonnenscheindauer mit Residuenverteilung

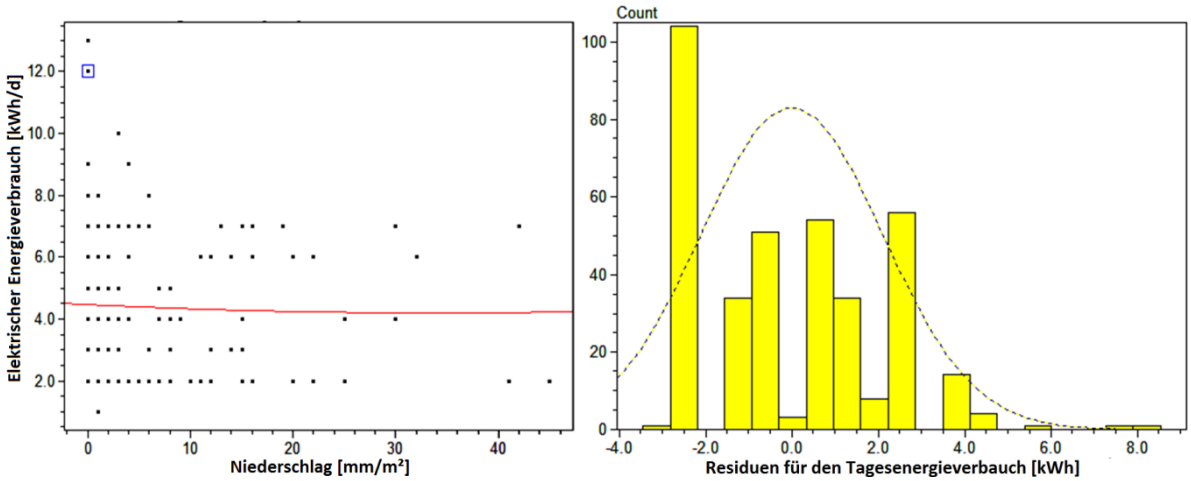

Abbildung 34: Regressionsanalyse zur Niederschlagsmenge mit Residuenverteilung

Maßnahmenbewertung

Zu jedem Viertelstundenwert ist eine empirische Verteilung aus den Messdaten bekannt, welche unter Berücksichtigung des Wochentags für die Monte-Carlo-Simulation verwendet wird. Nachdem die Regelung der Beleuchtungszeit im Rahmen des Leuchtmitteltausches nicht verändert worden ist, wird für die Bewertung seines Einspareffekts für das alte Beleuchtungssystem (Baseline-Situation) und die neuen Leuchtkörper dieselbe Betriebszeit angenommen.

Der Baseline-Verbrauch der alten Leuchtmittel ist nur näherungsweise mit 7 900 kWh bekannt, im ersten Jahr nach Tausch der Leuchtmittel lag der Jahresverbrauch nur noch bei 1 755 kWh. Aus der Differenz der beiden Werte erfolgt unter gerechtfertigter Annahme keiner Auswirkung auf die Beleuchtungsdauer ein Einsparerfolg der Maßnahme von 6 145 kWh.

Für die Bewertung der Maßnahme „Betriebszeitoptimierung“ wird der Jahresenergieverbrauch von 1 755 kWh als empirischer Richtwert und die unveränderte Verteilung der Beleuchtungszeit als Baseline-Verbrauch angenommen.

Abbildung 35 zeigt die Simulationsergebnisse zur Bewertung der bereits umgesetzten Maßnahme Leuchtmitteltausch, Abbildung 36 jene für die vorgeschlagene Betriebszeitoptimierung. Der geschätzte Baseline-Verbrauch, der gemessene Verbrauch nach Maßnahmenumsetzung und der daraus resultierende Einspareffekt für den Leuchtmitteltausch spiegeln sich allesamt in den entsprechenden Verteilungen in Abbildung 35 wider. Die Schwankungsbreite der Bewertung ist sehr gering, selbst der Abstand von minimalem zu maximalem Einspareffekt beträgt nur 3,5 %.

Der Baseline-Verbrauch in Abbildung 36 zeigt ebenfalls eine geringe Abweichung, was mit der Verwendung derselben Verteilungen für die Betriebszeit kompatibel ist. Die Schwankungsbreite für den Einspareffekt ist hier mit rund 15 % zwischen den Extremwerten höher als für den Leuchtmitteltausch, allerdings aufgrund der relativ geringen absoluten Schwankung nicht von großer Bedeutung. Der Erfolg der Betriebszeitoptimierung, das heißt die Höhe der absoluten Einsparung, ist

insbesondere davon abhängig, wie oft die Gebäudenutzer „unachtsames“ Verhalten zeigen würden und wie stark der Wildwechsel vor dem Gebäude ist – beide Einflussgrößen sind insbesondere vom Zufall abhängig. Durch die relativ geringe Leistungsaufnahme der LED-Beleuchtung wirkt sich eine Schwankung in der Betriebszeit zudem nicht allzu stark auf den Energieverbrauch aus.

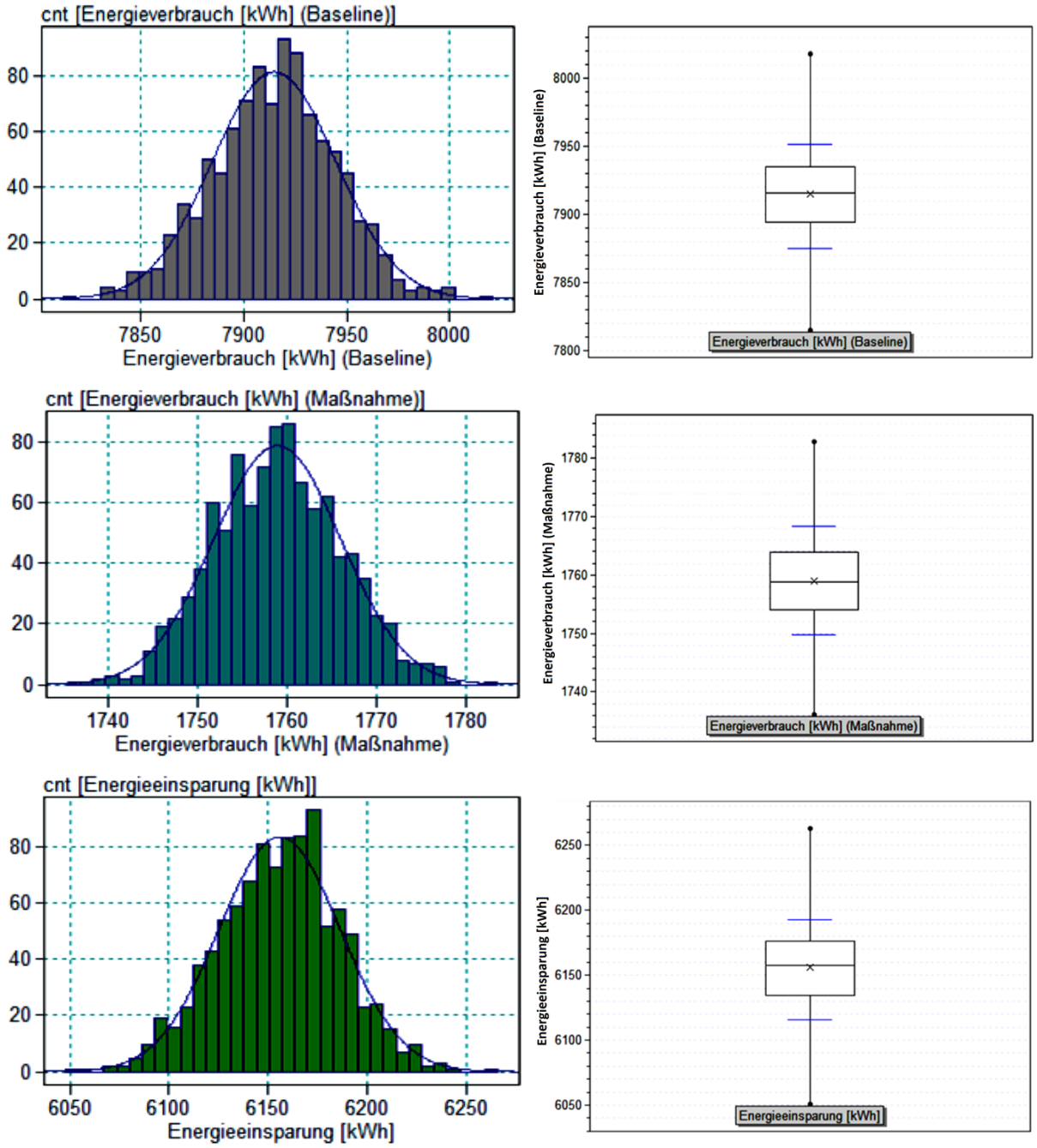

Abbildung 35: Maßnahmenbewertung Leuchtmitteltausch, Gebäude 1

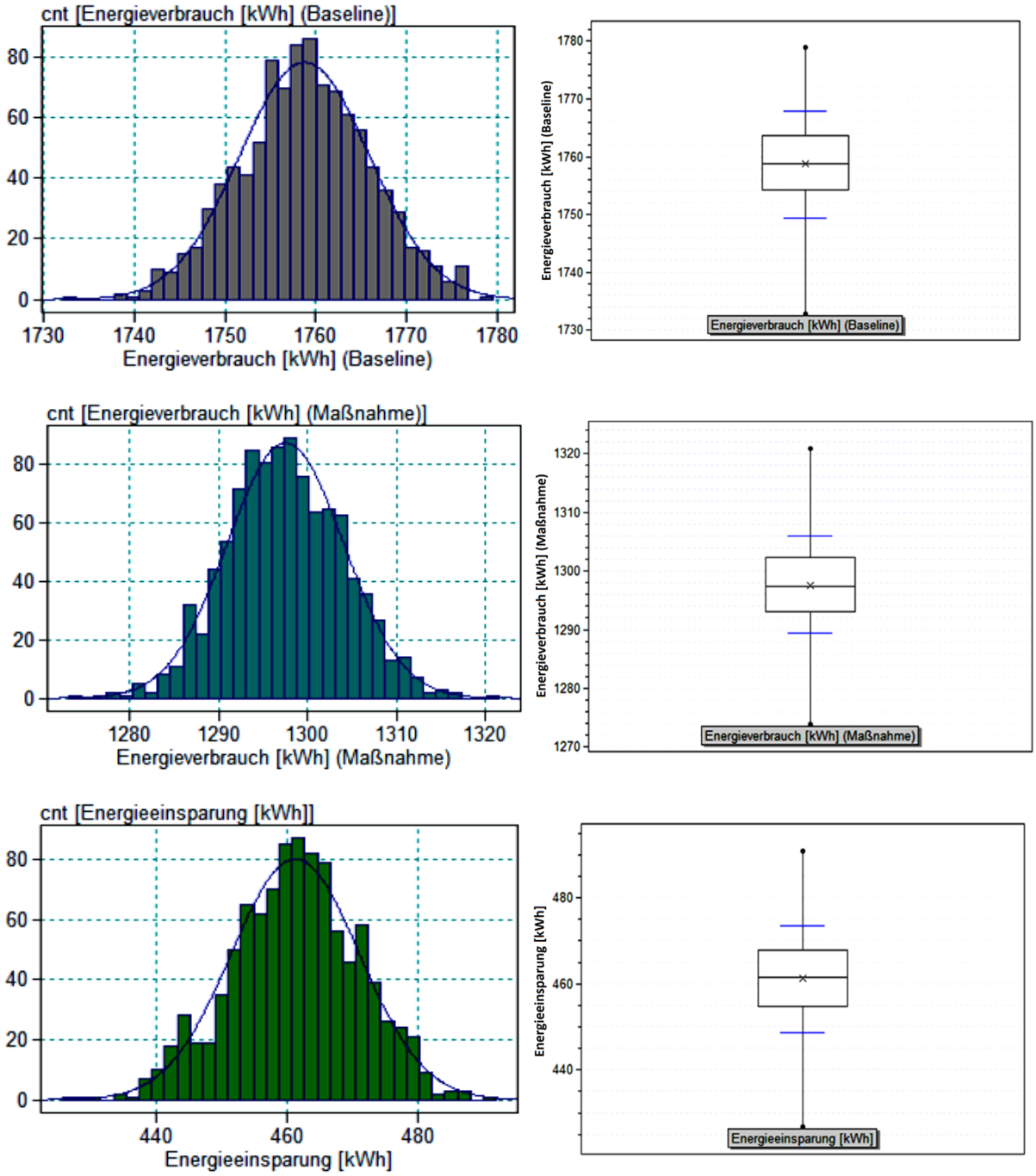

Abbildung 36: Maßnahmenbewertung Betriebszeitoptimierung, Gebäude 1

Interessant ist bei dieser Betrachtung, dass Histogramme der Verteilungen mit den jeweils approximierten Normalverteilungen durchaus gut beschrieben werden, obwohl die empirischen Verteilungen der Beleuchtungszeit dies nicht vermuten ließen.

Ebenso zeigt sich anhand dieses Beispiels die Bedeutung der Baseline-Definition auf den errechneten Einspareffekt. Wäre die vorgeschlagene Betriebszeitoptimierung bereits mit dem Leuchtmitteltausch erfolgt, so wäre der absolute Einspareffekt dieses Maßnahmenpakets deutlich umfangreicher

ausgefallen als in der zweistufigen, zeitlich getrennten Betrachtung, bei welcher ein Wechsel der Baseline auftritt.

- **Beispiel 2: Leuchtmitteltausch und Betriebszeitoptimierung**

Für ein Schulgebäude ist der Energieverbrauch der Beleuchtung auf Basis von Viertelstundenwerten für ein Schuljahr detailliert bekannt. Die Steuerung der Leuchtmittel, bei welchen es sich um „Energiesparlampen“ einer Leistung von 80 W pro Stück handelt, erfolgt manuell. Als Maßnahme wird sowohl der Umstieg auf effizientere Leuchtkörper, als auch eine Optimierung der Beleuchtungszeit vorgeschlagen. Tabelle 8 zeigt Kenndaten zur weiteren Beschreibung der Gebäudecharakteristik.

Tabelle 8: Kenndaten des Beispielgebäudes 2

Gebäudetyp	Schule
Fläche [m²]	1 650
Nutzeranzahl	185
Baujahr	1970
Sanierungsjahr	2014
Bauweise	Ziegelbau
Fassadentyp	einschalig
Energietechnischer Standard	sehr gut
Gesamter Energieverbrauch [kWh/a]	78 500
Energiekosten [€/a]	11 010

Ausgangssituation und Maßnahmenbeschreibung

Das Gebäude wurde im Rahmen einer Sanierung derart umgestaltet, dass eine möglichst gute Tageslichtausnutzung erreicht werden kann. Bei den Leuchtmitteln handelt es sich allerdings um Leuchtstoffröhren mit einem Reflektor mit relativ hoher elektrischer Leistungsaufnahme, wie aus den in Abbildung 37 dargestellten Mittelwerten erkennbar ist. Zu den vorhandenen Fassungen der Leuchtstoffröhren sind passende LED-Röhren verfügbar, welche bei einem Lichtstrom von rund 2 750 lm eine Leistungsaufnahme von 22 W aufweisen. Es wird daher zu einem sukzessiven Tausch der Leuchtmittel geraten.

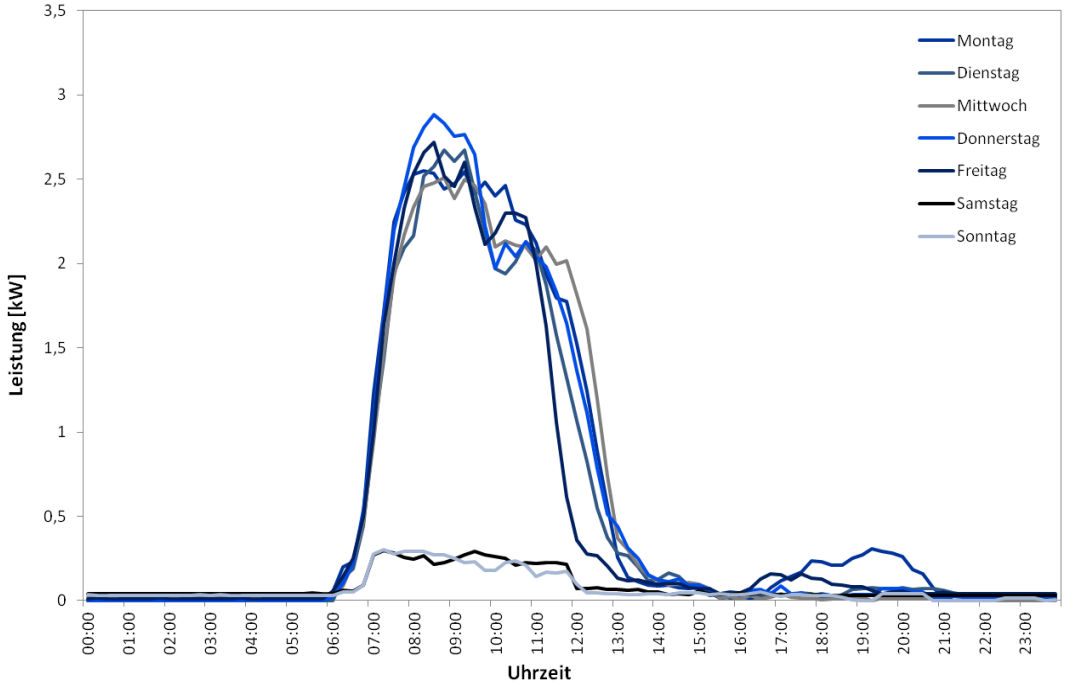

Abbildung 37: Mittelwerte der Leistungsaufnahme in Abhängigkeit des Wochentags, Gebäude 2

Abbildung 38 zeigt den Carpet-Plot der Leistungswerte, wobei erkennbar ist, dass die Beleuchtung des Öfteren nachts bzw. über Wochenenden durchgehend in Betrieb gewesen ist. Daher wird zusätzlich vorgeschlagen, die Beleuchtungszeit entweder durch eine Adaption der Regelung in der Leerzeit zu reduzieren, bzw. das Schulpersonal dazu anzuhalten, geeignete organisatorische Schritte zu setzen.

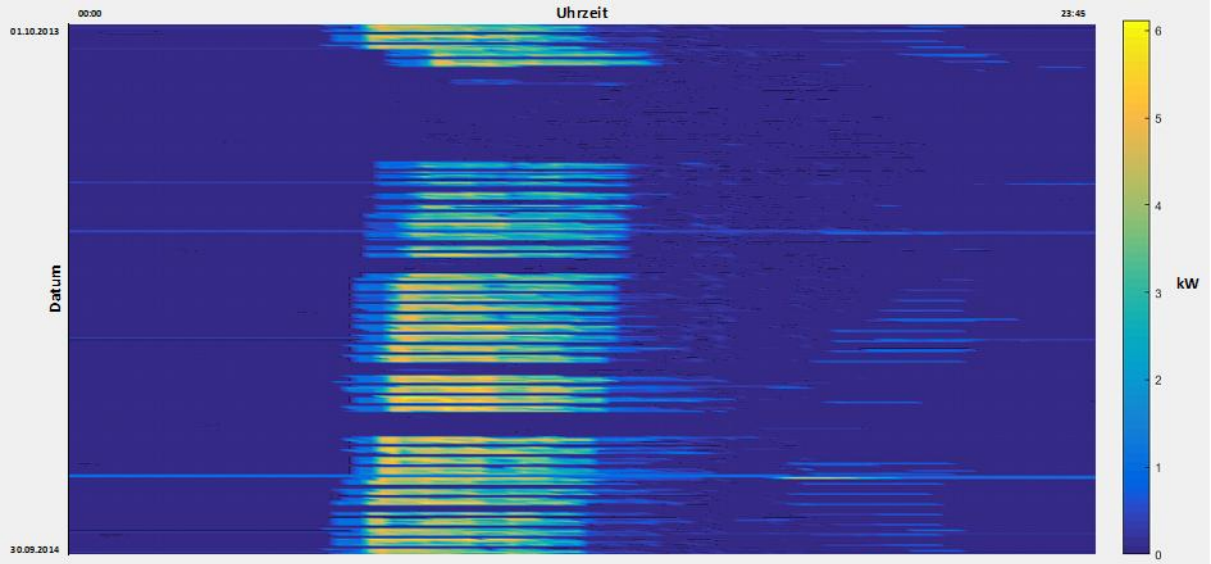

Abbildung 38: Carpet-Plot der Leistungswerte, Gebäude 2

Die Untersuchung nach externen Einflussparametern für den Beleuchtungsbedarf kann aufgrund der hohen Datendichte auch für dieses Beispiel in Form einer Regressionsanalyse erfolgen. Dazu stehen Datensätze der ZAMG für die Sonnenscheindauer und die Globalstrahlung zur Verfügung. Zunächst wurde die Stärke der Abhängigkeit der beiden Datensätze untersucht, welche in Abbildung 39 dargestellt ist. Die Verteilung der Residuen entspricht qualitativ zwar nicht einer Normalverteilung, ein Trend zu einer linearen Abhängigkeit ist allerdings, wie zu erwarten gewesen ist, deutlich erkennbar. Daher kann für beide Datensätze unabhängig voneinander eine Regressionsanalyse anstelle einer multilinearen Regressionsanalyse durchgeführt werden. Die Verwendung der Globalstrahlung als unabhängigen Modellparameter hat dabei den Vorteil, dass ihr Wertebereich gegenüber der Sonnenscheindauer wesentlich umfangreicher ist. Dies zeigt sich auch daran, dass für einen Wert von null Sonnenstunden eine große Streuung der Globalstrahlungs- bzw. Energieverbrauchswerte auftritt, was die Grenzen der Verwendung dieser Größe aufzeigt.

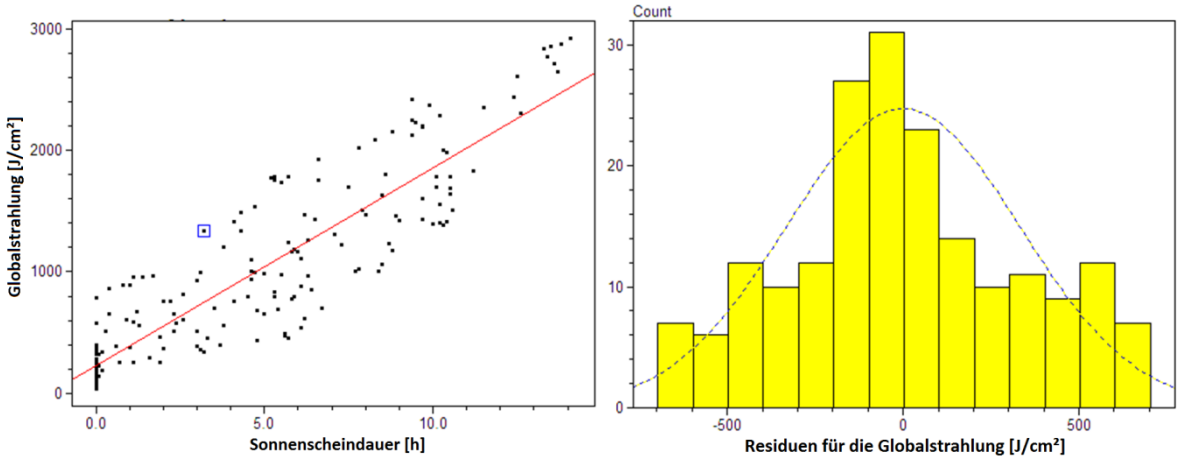

Abbildung 39: Abhängigkeit der Globalstrahlung und der Sonnenscheindauer (l.) und Residuenverteilung (l.)

In Abbildung 40 und Abbildung 41 sind die entsprechenden Regressionsmodelle dargestellt, welche das jeweils höchste Bestimmtheitsmaß aufweisen, sowie die zugehörigen Verteilungen der auftretenden Residuen. Es ist für beide Untersuchungen erkennbar, dass an sonnigen Tagen der Beleuchtungsenergieverbrauch zurückgeht.

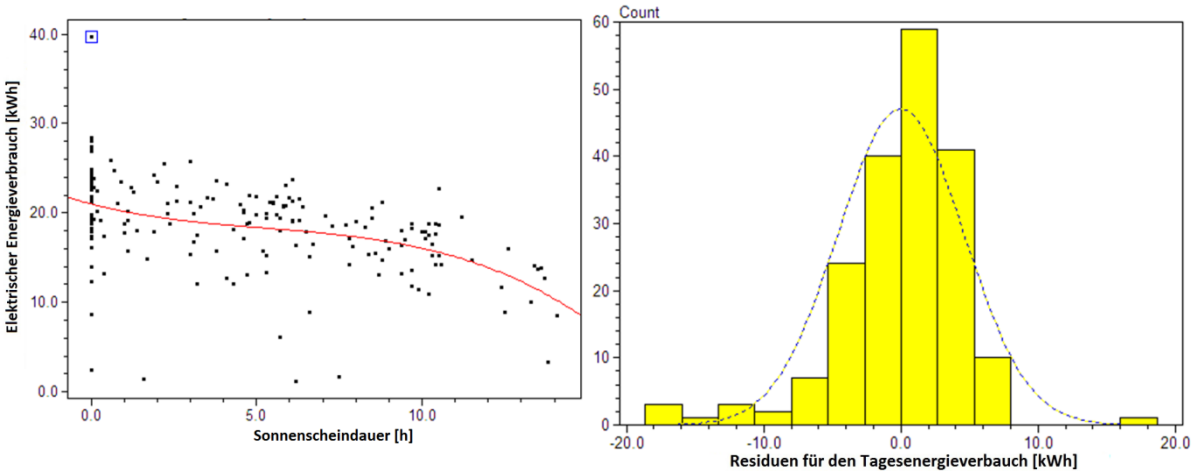

Abbildung 40: Regressionsanalyse zum Parameter Sonnenscheindauer

Die Bestimmtheitsmaße für beide Modelle liegen allerdings unter einem Wert von 0,5, sodass der Einfluss der Sonnenstrahlung offenbar durch das Nutzungsverhalten deutlich überlagert wird. Ein weiterer Grund für die erkennbare Tendenz kann darüber hinaus auch schlichtweg darauf zurückzuführen sein, dass es sich bei dem Beispielgebäude um ein Schulgebäude handelt, welches in den Sommermonaten – in der Regel jene mit der höchsten Sonnenscheindauer bzw. Globalstrahlung – in deutlich geringerem Umfang genutzt wird.

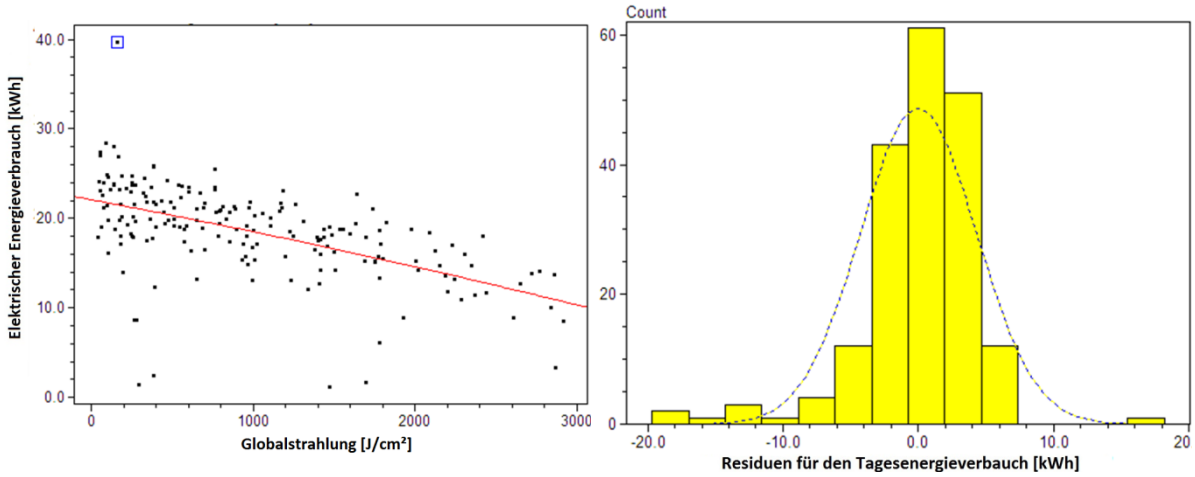

Abbildung 41: Regressionsanalyse zum Parameter Globalstrahlung

Maßnahmenbewertung

Nachdem für die Bewertung des Einspareffekts der Umsetzung der beiden vorgeschlagenen Maßnahmen keine externen Einflussfaktoren zu berücksichtigen ist, basiert die Monte-Carlo-Simulation auf der empirischen Verteilungsfunktion der jeweiligen Viertelstundenwerte der einzelnen Wochentage. Dadurch wird auch berücksichtigt, dass eine gewisse Wahrscheinlichkeit dafür besteht, dass das Schulgebäude in den Sommerwochen bzw. außerhalb der Unterrichtsstunden, beispielsweise für Veranstaltungen, genutzt wird. Für die betrachtete Baseline-

Periode betrug der gemessene Energieverbrauch der Beleuchtungsanlage 3 559 kWh. Abbildung 42 zeigt die Ergebnisse der durchgeführten Monte-Carlo-Simulation, wobei in der Verteilung des Baseline-Verbrauchs der gemessene Wert knapp kleiner als der Mittelwert der Verteilung von 3 573 kWh ist.

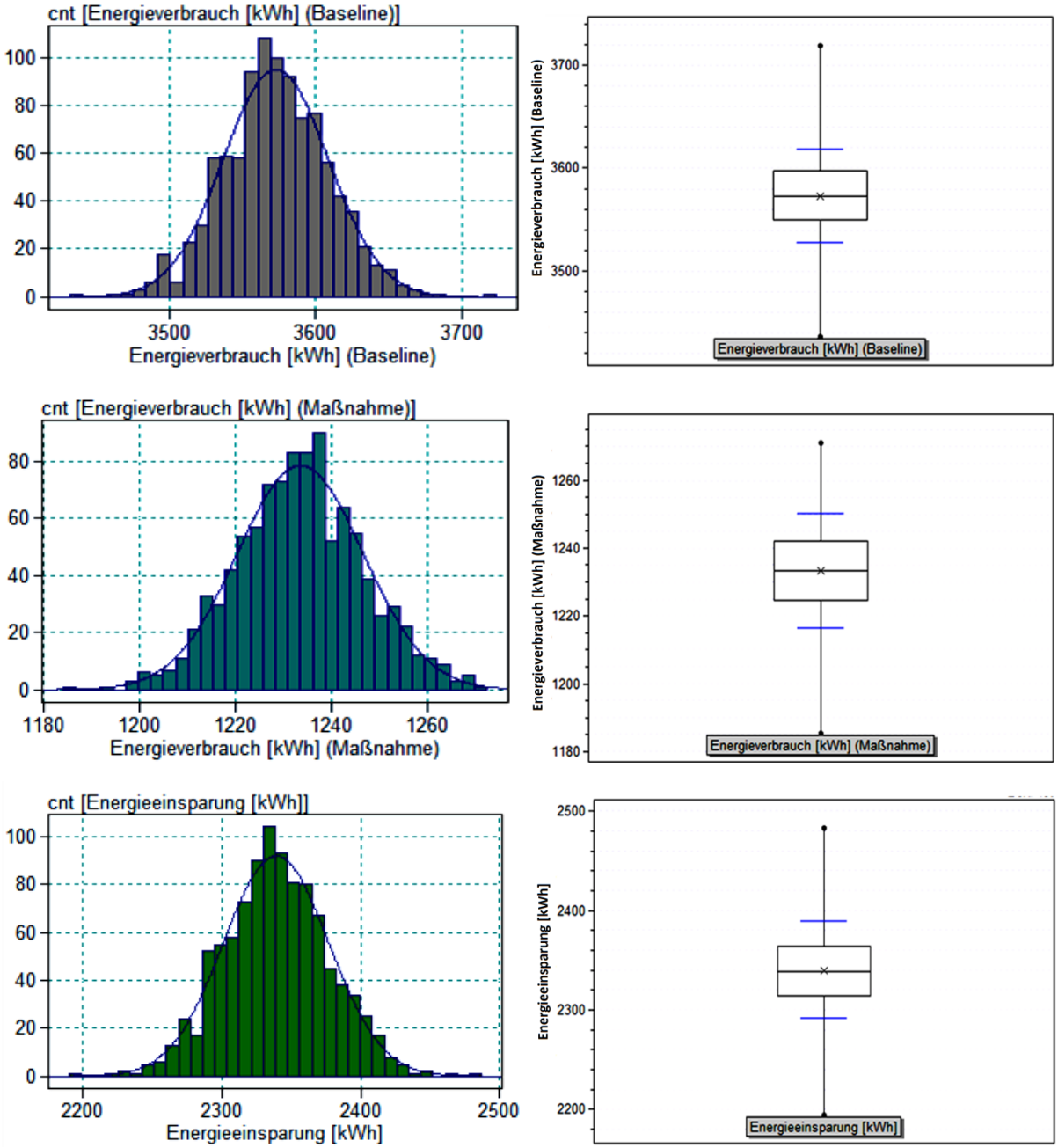

Abbildung 42: Maßnahmenbewertung der beiden vorgeschlagenen Maßnahmen, Gebäude 2

Beispiele mit geringer Datendichte

- **Beispiel 3: Leuchtmitteltausch**

Bei diesem Beispiel wird der Restaurantbereich eines Hotels betrachtet, wobei dieser eine Fläche von 890 m² einnimmt. Die tägliche Anzahl von Gebäudenutzern ist einer natürlichen Schwankung unterworfen, wird von den Gebäudebetreibern aber auf rund 500 Personen geschätzt.

Tabelle 9: Kenndaten des Beispielgebäudes 3

Gebäudetyp	Hotel
Fläche [m²]	890
Nutzeranzahl	500
Baujahr	2010
Sanierungsjahr	-
Bauweise	Beton-Skelettbau
Fassadentyp	Vorhangfassade
Energietechnischer Standard	sehr gut
Gesamter Energieverbrauch [kWh/a]	496 750
Energiekosten [€/a]	41 780

Ausgangssituation und Maßnahmenbeschreibung

Der betrachtete Bereich hat eine Öffnungszeit von 19,5 Stunden pro Tag, sodass aufgrund der relativ hohen Gesamtleistung der verwendeten Leuchtmittel von 47,3 kW der jährliche Energiebedarf für die Beleuchtung relativ hoch ist, wie anhand der Monatsverbrauchswerte in Tabelle 10 ersichtlich ist.

Tabelle 10: Bekannte Monatsverbrauchswerte der Beleuchtungsanlage

Monat	2012	2013	2014	2015
1	21 630	20 728	19 896	13 368
2	20 139	19 006	21 637	12 431
3	20 197	19 897	21 988	13 063
4	21 924	23 217	20 926	13 757
5	21 773	19 874	19 632	12 926
6	17 086	19 434	21 288	12 014
7	17 187	16 543	16 429	10 522
8	16 551	15 233	14 557	9 491
9	18 170	17 908	19 835	11 316
10	18 572	17 883	16 834	11 475
11	17 437	16 123	18 423	10 774
12	14 966	14 732	12 932	8 546
Summe	225 633	220 576	224 377	139 683

Die Schwankungsbreite der gemessenen Monatsverbräuche ist in erster Linie darauf zurückzuführen, dass die einzelnen Leuchtmittel in unterschiedliche Gruppen zusammengefasst sind und individuell geschaltet werden können. Ende des Jahres 2014 wurde daher eine neue Beleuchtungsanlage bestehend aus LED-Röhren mit einer Gesamtleistung von 33,4 kW installiert. Zum Vergleich des simulierten Einspareffekts steht damit ein tatsächlich gemessener Jahresenergieverbrauch nach Maßnahmenumsetzung zur Verfügung.

Maßnahmenbewertung

Nach Rücksprache mit den Gebäudebetreibern wurde versucht, die Schaltung der einzelnen Leuchtmittelgruppen im Tagesverlauf zu simulieren. Mit Hilfe dieser Angaben konnte eine entsprechende Verteilung der verwendeten Beleuchtungsleistung in Abhängigkeit der Tageszeit angenommen werden.

Auf Basis dieser Angaben wurde die Monte-Carlo-Simulation durchgeführt, deren Ergebnisse in Abbildung 43 dargestellt sind. Die drei bekannten Jahresenergieverbräuche vor Maßnahmenumsetzung sind jeweils in der Verteilung des Baseline-Verbrauchs enthalten, was als Zeichen dafür gesehen werden kann, dass die Gebäudebetreiber die Situation vor Ort gut einschätzen können und die getroffenen Annahmen realistisch sind. Die Reduktion des gemessenen Energieverbrauchs im Jahr 2015 beträgt gegenüber dem Mittelwert der drei vorangehenden Jahre rund 84 000 kWh, was dem Mittelwert der Verteilung des Einspareffekts sehr gut entspricht.

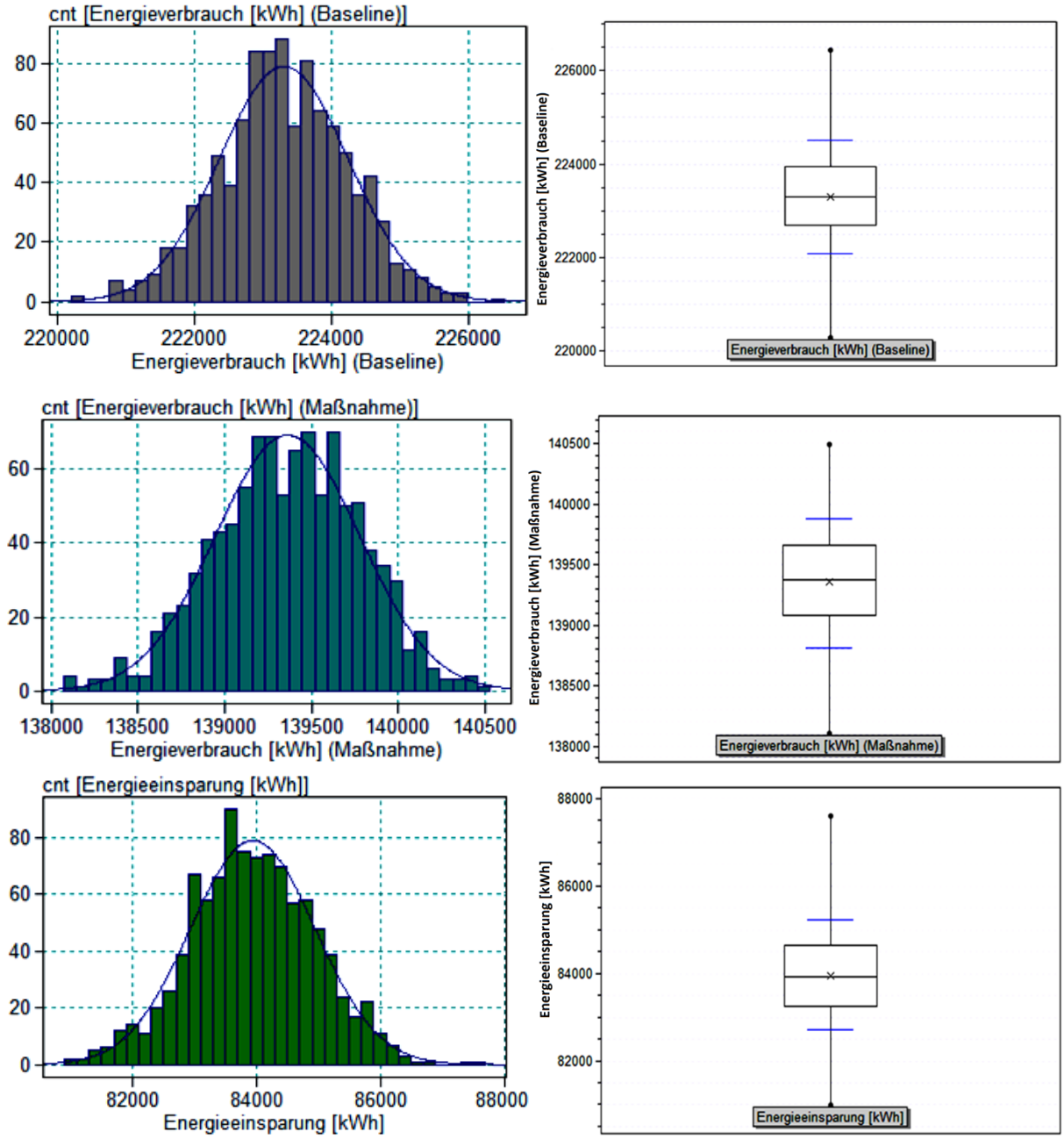

Abbildung 43: Maßnahmenbewertung Leuchtmitteltausch, Gebäude 3

- **Beispiel 4: Leuchtmitteltausch**

In der Praxis ist es häufig der Fall, dass sich die Energieverbrauchsanalyse auf bloße Jahresverbrauchsdaten stützen muss. Für das hier betrachtete Beispielgebäude, zu welchem Tabelle 11 Kenndaten angibt, sind nur die Leistungswerte der Leuchtmittel bekannt, sodass die empirische Verteilung der auftretenden Leistungswerte in Abhängigkeit der Tageszeit basierend auf Erfahrungsangaben geschätzt werden muss.

Tabelle 11: Kenndaten des Beispielgebäudes 4

Gebäudetyp	Büro
Fläche [m²]	3 435
Nutzeranzahl	135
Baujahr	1996
Sanierungsjahr	-
Bauweise	Ziegelbau
Fassadentyp	einschalig
Energietechnischer Standard	mittel
Gesamter Energieverbrauch [kWh/a]	792 590
Energiekosten [€/a]	74 500

Ausgangssituation und Maßnahmenbeschreibung

Die maximale Gesamtleistungsaufnahme der aktuellen Leuchtstoffröhren und Glühbirnen beträgt 8,7 kW. Es wurde zu einem Tausch der Leuchtmittel gegenüber passenden LED-Röhren einer Gesamtleistung von 3,7 kW geraten. Diese Maßnahme ist auch tatsächlich umgesetzt worden, es liegen allerdings noch keine gemessenen Verbrauchswerte für einen Vergleich mit den Simulationsergebnissen vor.

Maßnahmenbewertung

Der simulierte Baseline-Verbrauch beträgt rund 25 % des elektrischen Gesamtverbrauchs des Gebäudes, was nach Angaben der Gebäudebetreiber den eigenen Hochrechnungen gut entspricht. Die Ergebnisse der Monte-Carlo-Simulation der beschriebenen Maßnahme sind in Abbildung 44 dargestellt.

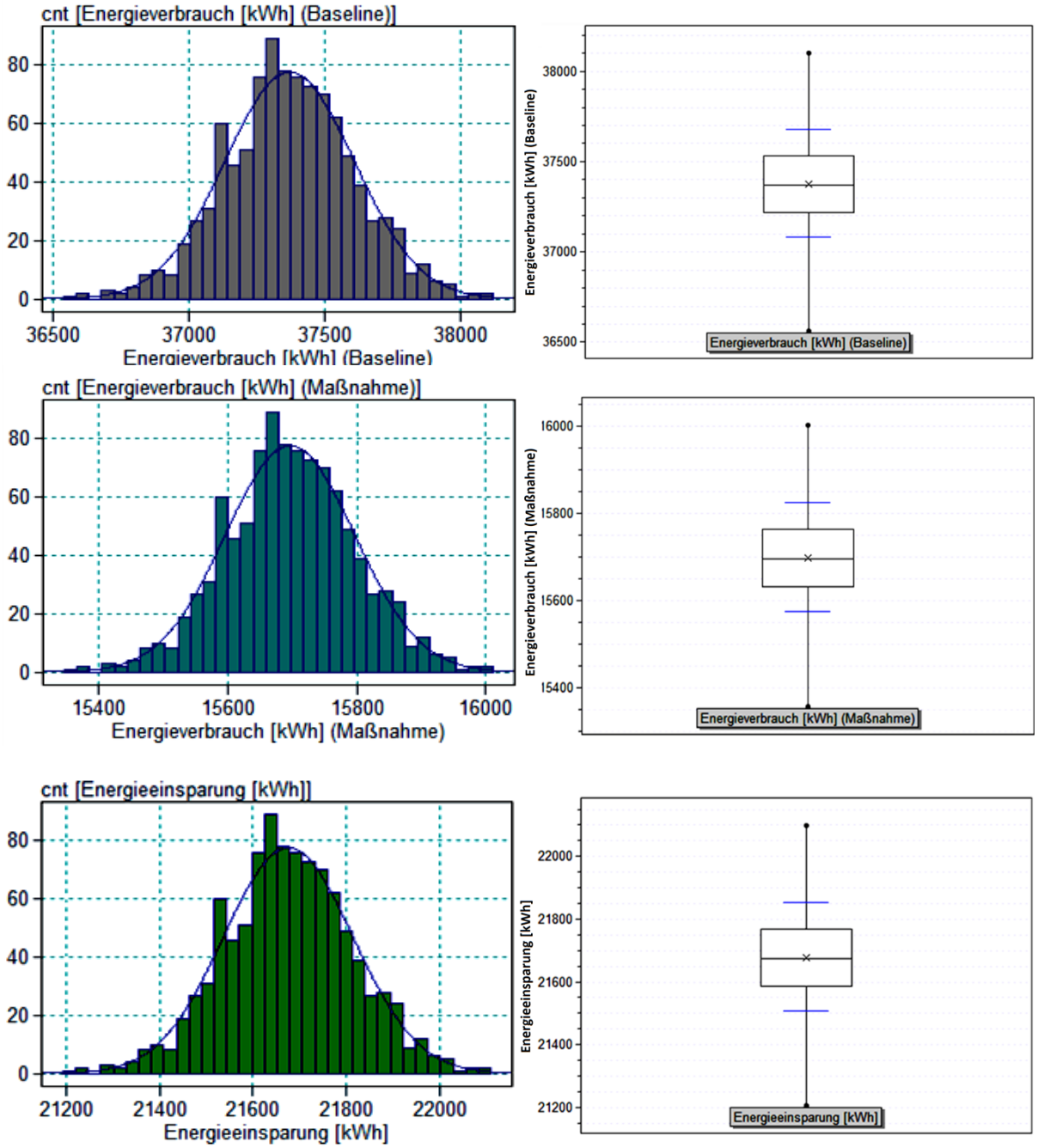

Abbildung 44: Maßnahmenbewertung Leuchtmitteltausch, Gebäude 4

3.3.1.3 Vergleich der Methodik mit der Bewertung gemäß Richtlinienverordnung

In der Anlage 1 "Verallgemeinerte Methoden zur Bewertung von Energieeffizienzmaßnahmen“ zur „Energieeffizienz-Richtlinienverordnung“ findet sich auch ein Abschnitt mit Methoden zur Bewertung von Energieeffizienzmaßnahmen im Beleuchtungsbereich für verschiedene Anwendungsfälle, unter anderem auch für Bürogebäude und Hotelleriebetriebe (vgl. [43], S.111ff). Faktoren für Rebound-

bzw. Multiplikatoreffekte sowie einen „Sicherheitszu- bzw. Sicherheitsabschlag“ werden hierbei jeweils angeführt, jedoch nicht näher quantifiziert.

Für Bürogebäude wird dabei die flächenspezifische Reduktion der elektrischen Anschlussleistung mit der jährlichen Einschaltdauer und der betroffenen Raumfläche multipliziert. Wird der Leuchtmitteltausch mit einer weiteren Maßnahme zur Steuerung der Beleuchtungszeit (Bewegungssensoren, Teilabschaltungen, Zeitprogramme, Tageslichtsensoren) kombiniert, so ist die Verwendung eines Korrekturfaktors zur Erhöhung der Leistungsdifferenz vorgesehen. Die Default-Werte betragen für das ineffiziente System 11,52 W/m² (T8-Leuchtmittel), für das effiziente System 7,8 W/m² (T5-Leuchtmittel bzw. LED) (vgl. [43], S.111ff).

Für Hotellerie-Betriebe wird insbesondere der Ersatz von „Standard-Halogenlampen“ durch „Energiesparlampen“ oder LED betrachtet (vgl. [43], S.114ff), ein Korrekturfaktor für eine zusätzliche Effizienzsteigerung der Beleuchtungssteuerung ist hier nicht vorgesehen. Die Leistungsreduktion bezieht sich zudem auf die Lampenanzahl und nicht wie im Fall von Bürogebäuden auf die betroffene Raumfläche. Die angegebenen Default-Werte der Energieeinsparung betragen 87 kWh/a je Energiesparlampe bzw. 89,9 kWh/a für LED mit einem Lichtstrom zwischen 700 und 900 lm (vgl. [43], S.115).

Tabelle 12 vergleicht die Mittelwerte der Verteilungen der Energieeinsparungen, welche mit der Methodik dieser Arbeit ermittelt wurden, mit den Werten gemäß der Methode der Anlage der Richtlinienverordnung. Es zeigt sich, dass die Abweichungen doch erheblich sind und deutlich außerhalb des Wertebereichs, der durch die Monte-Carlo-Simulation gewonnen worden ist, liegen. Die Einsparungen gemäß Richtlinienverordnung fallen allesamt niedriger aus. Für die behandelten Beispiele wäre somit eine vereinfachte Bewertung mittels Default-Wert-Verwendung nicht sinnvoll gewesen, obwohl Größen wie die Beleuchtungsdauer nicht näher bekannt gewesen sind.

Tabelle 12: Vergleich der Abweichung der Einsparungen je nach Methode

Gebäudetyp	Mittelwert Energieeinsparung (Simulation) [kWh]	Energieeinsparung (Richtlinienverordnung) [kWh]	Abweichung der Bewertungen [%]
Büro	6 156	4 991	18,9%
Büro	21 676	15 836	26,9%
Hotel	83 940	40 455	51,8%

3.3.2 Lüftung

Die Versorgung von Räumen mit Frischluft spielt sowohl aus hygienischen, als auch aus Komfortgründen eine große Rolle im Gebäudebereich. Diese kann entweder über natürliche Lüftung

durch Öffnen von Fenstern, oder mittels mechanischer Lüftungsanlagen erfolgen, welche im Rahmen dieser Arbeit betrachtet werden.

Mechanische Lüftungsanlagen unterscheiden sich hinsichtlich verschiedener Eigenschaften und verfügbarer Funktionen, welche einzelne Anlagenkomponenten übernehmen, voneinander. Erfolgt durch die Anlage ein Luftaustausch der Raumluft mit der Außenluft, so kann die angesaugte Außenluft sowohl thermodynamisch, als auch feuchtetechnisch aufbereitet werden, wenn die betrachtete Anlage die entsprechenden Komponenten aufweist. Je nach Anlagenanzahl und –größe, befördertem Volumenstrom, notwendiger Ventilatorleistung zum Erreichen der erforderlichen Druckdifferenz und Vorhandensein von Heiz- bzw. Kühlregistern und Feuchtebehandlungsanlagen, kann der Energieverbrauch von Lüftungsanlagen sehr hoch ausfallen. Für nähere Informationen zu unterschiedlichen Anlagenausführungen und technischen Komponenten wird auf die Literatur verwiesen (beispielsweise auf [44], S.137ff; [45], S.255ff; [46]). Anforderungen an die Luftqualität und den notwendigen stündlichen Luftvolumenstrom sowie Klassifizierungen von Anlagen, sind in entsprechenden Normen angegeben, wie beispielsweise der ÖNORM EN 13779 „Lüftung von Nichtwohngebäuden – Allgemeine Grundlagen und Anforderungen für Lüftungs- und Klimaanlagen und Raumkühlsysteme“ (siehe [47]).

Bemerkenswert ist, dass dieses gesamte Gewerk trotz seiner unbestreitbaren Wichtigkeit im Gebäudesektor keine Erwähnung in der Anlage 1 der „Energieeffizienz-Richtlinienverordnung“ findet. Daher entfällt für diesen Abschnitt auch der entsprechende Methodenvergleich.

3.3.2.1 Maßnahmenauswahl und Simulationsmodell

In Abhängigkeit des Aufbaus und der Betriebsweise einer Lüftungsanlage, können verschiedene Potentiale zur Steigerung der Anlagenenergieeffizienz vorhanden sein. Folgende Energieeffizienzmaßnahmen für Lüftungsanlagen werden im Rahmen der Arbeit betrachtet:

- **Betriebsoptimierung**

Ist die Betriebsweise einer Lüftungsanlage nicht an den tatsächlichen Bedarf angepasst, so ergeben sich in weiterer Folge entsprechende Energieeffizienzsteigerungspotentiale. Dies ist beispielsweise der Fall, wenn Anlagen in der Leerzeit des Gebäudes (etwa an Feiertagen oder außerhalb der Nutzungszeit) intensiv betrieben werden, ohne dass entsprechender Bedarf gegeben ist.

Darüber hinaus kann eine Anpassung des genutzten Volumenstroms an den tatsächlichen Bedarf eine sinnvolle Maßnahme darstellen, wenn dieser zum Beispiel falsch eingeschätzt oder nicht erhoben worden ist. Lüftungsanlagen verfügen in der Regel über eine bestimmte Steuerungsart, wie etwa eine Stufenregelung, welche entsprechend zur optimalen Betriebsoptimierung genutzt werden kann. Die Raumluftqualität wird in 4 Klassen eingeteilt (vgl. [47], S.19), welchen ein bestimmter Mindestvolumenstrom pro Stunde in Abhängigkeit der im Raum anwesenden Personenzahl

zugewiesen wird (vgl. [44], S.312). Bei der Umsetzung der Energieeffizienzmaßnahme müssen diese Anforderungen entsprechend berücksichtigt werden.

Ebenso kann durch die Anpassung der Betriebsparameter der Temperatur- und Feuchteregister die Anlageneffizienz erhöht werden. Die Auswahl der gewünschten Raumtemperatur- und Feuchtewerte der einströmenden Frischluft kann anhand so genannter „Behaglichkeitsfenster“ erfolgen, welche jenen Bereich der beiden Komfortparameter angeben, der im Allgemeinen von Nutzern als angenehm empfunden wird. Abbildung 45 stellt zwei dieser Behaglichkeitsfenster dar, welche in Abhängigkeit der Tätigkeit der Nutzer unterschiedlich ausfallen.

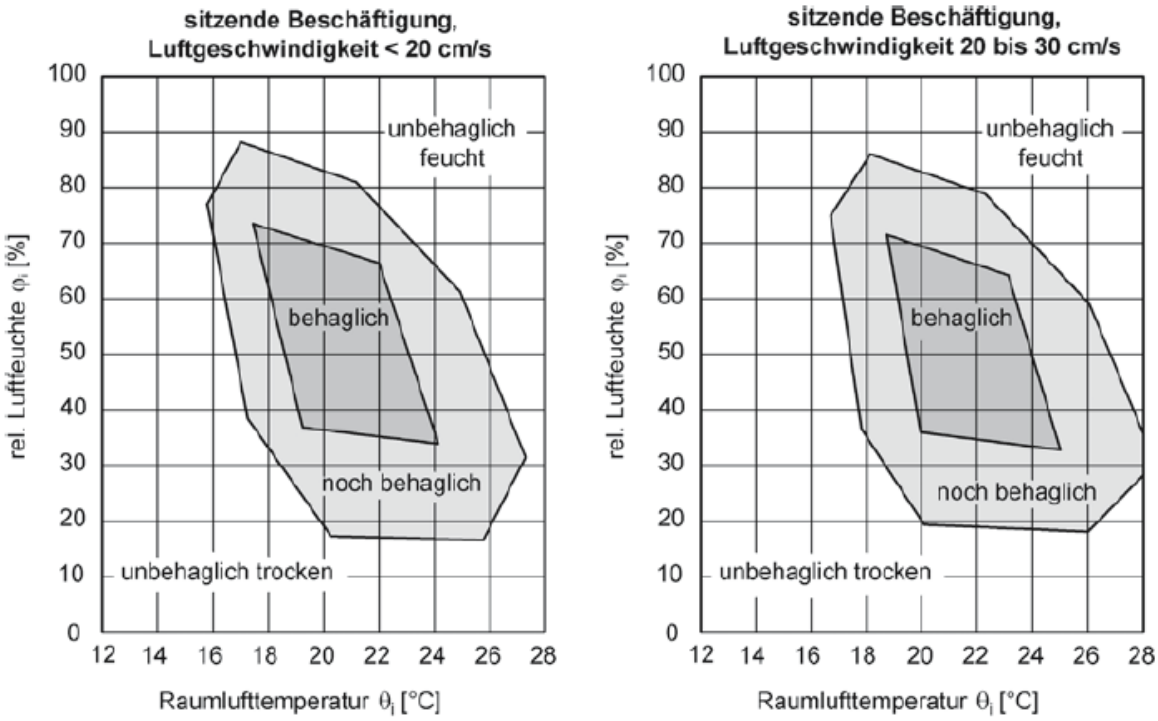

Abbildung 45: Behaglichkeitsfenster für komfortable Raumparameter ([48], S.379)

- **Einsatz von Energierückgewinnungssystemen**

Um den Austrag von Wärmeenergie in der Heizperiode bzw. deren Eintrag in der Kälteperiode zu verhindern, können Wärmetauscher eingesetzt werden. Diese sind in verschiedenen Ausführungen erhältlich, beispielsweise als Platten- oder Kreuzwärmetauscher, und führen im Wesentlichen zu einem Wärmeaustausch von Zu- und Abluftstrom. Die Rückwärmezahl gibt dabei an, wie effizient dieser Wärmeübertrag funktioniert. Die kalte Außenluft wird dabei in der Heizperiode vorgewärmt, in der Kühlsaison wird die heiße Außenluft im Wärmetauscher vorgekühlt.

Im Rahmen der praktischen Methodenanwendung hat sich gezeigt, dass die verbreitete Bezeichnung „Wärmerückgewinnung“ bei einigen Anlagenbetreibern für Verwirrung sorgte und daher der Wärmetauscher in der Kühlsaison grundsätzlich über einen Bypass umgangen wird. Daher scheint die Bezeichnung „Energierückgewinnung“ gegenüber „Wärmerückgewinnung“ besser geeignet.

- **Tausch einzelner Komponenten**

Insbesondere bei Lüftungsanlagen, welche bereits seit Langem in Betrieb sind und damit ein gewisses Anlagenalter erreicht haben, kann der Tausch einzelner Komponenten eine interessante Energieeffizienzmaßnahme darstellen. Der Gesamtwirkungsgrad der Lüftungsanlage ist nach Formel (3.3) gegeben (vgl. [47], S.25) und wird folglich durch die ineffizienteste Komponente bestimmt.

$$\eta_{ges} = \eta_{Ventilator} \cdot \eta_{Motor} \cdot \eta_{Antrieb} \cdot \eta_{Regelung} \tag{3.3}$$

η_{ges}..... *gesamter Anlagenwirkungsgrad*
$\eta_{Ventilator}$.....*Ventilatorwirkungsgrad*
η_{Motor}..... *Motorwirkungsgrad*
$\eta_{Antrieb}$.....*Antriebswirkungsgrad*
$\eta_{Regelung}$..... *Wirkungsgrad der Anlagenregelung*

Neben dem Druckabfall, dem Motor und dem Antrieb, bestimmt der Ventilatorwirkungsgrad die spezifische Ventilatorleistung (SFP, specific fan power), welche die elektrische Leistungsaufnahme des Ventilators ins Verhältnis zum dabei erreichten, beförderten Luftvolumenstrom setzt. Tabelle 13 zeigt die Klassifizierung von Ventilatoren nach ihrem SFP-Wert (vgl. [47], S.24). Diese ist bei Betrachtung der Energieeffizienzmaßnahme „Ventilatortausch“ ein nützliches Auswahlkriterium.

Tabelle 13: Klassifizierung der spezifischen Ventilatorleistung ([47], S.24)

SFP-Klasse	Spezifische Ventilatorleistung [W·s/m³]
1	<500
2	500 – 750
3	750 – 1 250
4	1 250 – 2 000
5	2 000 – 3 000
6	3 000 – 4 500
7	> 4 500

- **Nutzung von Free-Cooling-Potentialen**

Lüftungsanlagen können dazu genutzt werden, durch Einbringung kühler Außenluft den Einsatz von Kältemaschinen zu reduzieren. Dies kann beispielsweise der Fall sein, wenn die Innenraumtemperatur in Folge von hohen inneren Lasten oder solarem Wärmeeintrag über der Außentemperatur liegt. Eine interessante Anwendungsmöglichkeit stellt die Nachtlüftung dar, wobei die Lüftungsanlage in der Leerzeit kühle Außenluft einbringt, welche das Gebäude und dessen

Speichermasse derartig kühlt, dass am Folgetag kein bzw. nur ein verkürzter Einsatz der Kühlanlagen notwendig ist.

Abbildung 46 zeigt das im Rahmen der Arbeit verwendete Simulationsmodell zur Bewertung von Energieeffizienzmaßnahmen bei Lüftungsanlagen. Die Pfeile in der schematischen Darstellung geben die Richtung der Luft an, folglich ist der untere Kanal der Frischluft, der obere der Abluft zugeordnet. Luftfilter sind aus Gründen der Übersicht nicht dargestellt. Für die Bewertung wird angenommen, dass diese rechtzeitig getauscht werden und damit eine Verbrauchserhöhung aufgrund überfüllter Filter nicht eintritt. Der Energieeinsatz, welcher bei Anlagen mit Feuchtebehandlungssystemen und ohne Feuchterückgewinnung zusätzlich anfällt, wird nicht explizit berücksichtigt.

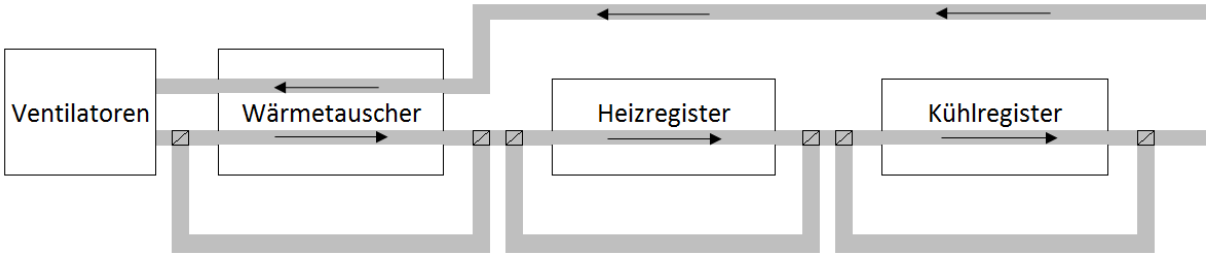

Abbildung 46: Schematische Darstellung des Simulationsmodells

Zu jeder bewerteten Anlage muss das gewünschte Temperaturintervall für die Raumzieltemperatur bekannt sein. Liefert das Passieren des Wärmetauschers eine gewünschte Vorkonditionierung der Frischluft, so läuft die angesaugte Luft durch den Wärmetauscher. Ist aber beispielsweise die Abluft wärmer als die gewünschte Höchsttemperatur, so wird die Frischluft über einen Bypass umgeleitet, um nicht zusätzlichen Kühlbedarf zu erfordern. Der Rauminnentemperatur kann in der Bewertung als unsichere Einflussgröße angenommen und eine passende statistische Verteilung zugeordnet werden.

Nach Passieren des Wärmetauschers erfolgt eine erneute Messung der Frischlufttemperatur. Befindet sich diese bereits im gewünschten Temperaturfenster, so werden Heiz- und Kühlregister über deren Bypässe umgangen. Andernfalls wird entweder das Heiz- oder Kühlregister passiert, um die Luft auf die gewünschte Raumtemperatur zu konditionieren.

Der elektrische Energiebedarf der Ventilatoren wird nach Formel (3.4) berechnet. Das Resultat entspricht der zum Betrieb erforderlichen Endenergie.

$$E_{el} = (P_{ZU} + P_{AB}) \cdot t \tag{3.4}$$

E_{el}.....*elektrischer Energieverbrauch der Anlage [kWh]*
P_{ZU}.....*elektrische Leistungsaufnahme Zuluftventilator [kW]*
P_{AB}.....*elektrische Leistungsaufnahme Abluftventilator [kW]*
t.....*Betriebszeit [h]*

Die zum Konditionieren des Luftvolumenstroms zu- bzw. abzuführende Wärmeenergie wird nach Formel (3.5) berechnet und entspricht der aufzubringenden Nutzenergie. Sind zu den entsprechenden Heiz- und Kühlregistern Wirkungsgrade in Abhängigkeit der Temperaturdifferenz bekannt, so kann eine Umrechnung auf Endenergieniveau erfolgen.

$$Q = V_L \cdot \rho_L \cdot c_P^L \cdot (T_R - T_A) \tag{3.5}$$

Q..... zu- bzw. abzuführende Wärmeenergie [kWh]
V_L..... Volumenstrom [m³/s]
ρ_L..... Dichte von Luft [kg/m³]
c_P^L..... spezifische Wärmekapazität von Luft [kJ/kg]
T_R..... Raumtemperatur [K]
T_A..... Außentemperatur [K]

3.3.2.2 Anwendungsbeispiele für Maßnahmenbewertungen

Im Folgenden werden fünf Beispiele von Maßnahmenbewertungen von Energieeffizienzmaßnahmen, welche Lüftungsanlagen betreffen, behandelt. Im Fall von Lüftungsanlagen ist eine Abhängigkeit des Energieverbrauchs von der Außenlufttemperatur offensichtlich gegeben.

- **Beispiel 1: Betriebszeitoptimierung**

Bei diesem Beispielgebäude handelt es sich um ein Bürogebäude, dessen Lüftungsanlage nicht dem tatsächlichen Bedarf entsprechend betrieben wird. Als Energieeffizienzmaßnahme wird daher eine Optimierung der Betriebsbedingungen betrachtet. Tabelle 14 listet zur näheren Gebäudecharakterisierung einige Kenndaten auf. Zur Anlage sind Messdaten auf Viertelstundenebene bekannt. Das Heizregister der Anlage wird über die zentrale Heizungsanlage versorgt, das Kälteregister über eine integrierte Kältemaschine.

Tabelle 14: Kenndaten des Beispielgebäudes 5

Gebäudetyp	Büro
Fläche [m²]	485
Nutzeranzahl	45
Baujahr	1988
Sanierungsjahr	-
Bauweise	Beton-Skelettbau
Fassadentyp	Vorhangfassade
Energietechnischer Standard	mittel
Gesamter Energieverbrauch [kWh/a]	438 089
Energiekosten [€/a]	35 870

Ausgangssituation und Maßnahmenbeschreibung

Abbildung 47 zeigt die Mittelwerte der gemessenen elektrischen Leistungswerte, welche sowohl die Leistung der Ventilatoren, als auch jene des integrierten Kälteregisters enthalten. Die Anlage ist sichtlich von 04:30 bis 20:00 Uhr an Werktagen in Betrieb. Diese Betriebszeit wird gemäß der tatsächlichen Anwesenheit der Büromitarbeiter angepasst und auf 07:00 bis 18:00 Uhr geändert. Durch eine Adaption der Programmierung der Regeleinheit wird zusätzlich verhindert, dass die Anlage wie bisher an Feiertagen und geschlossenen Tagen betrieben wird. An den Raumzieltemperaturen wird im Rahmen der Maßnahme keine Veränderung vorgenommen. Das Temperaturfenster der Sollwerte liegt standardmäßig bei 20 bis 24 °C.

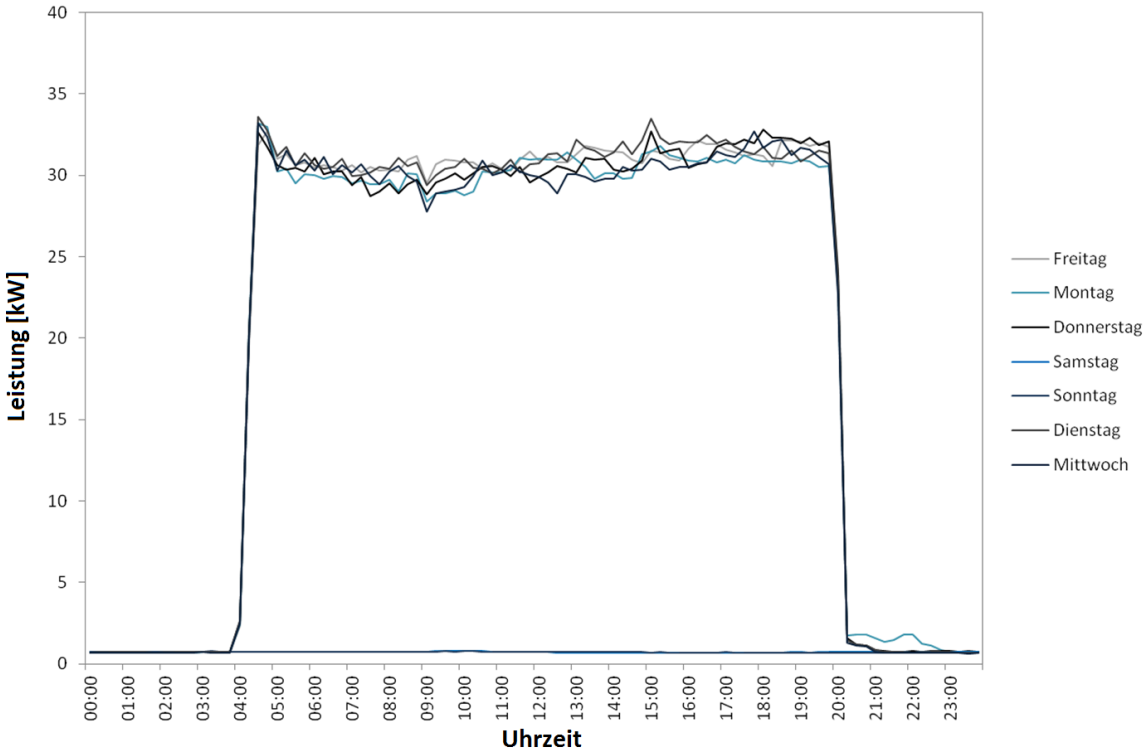

Abbildung 47: Mittelwerte der Leistungsaufnahme der Anlage, Gebäude 5

Abbildung 48 zeigt den Carpet-Plot der Leistungswerte, aus welchem ein leicht schwankendes Betriebsverhalten entnommen werden kann. Interessant ist auch die deutliche Erhöhung der Leistungsaufnahme in der Kühlsaison gegenüber den übrigen Lastverläufen.

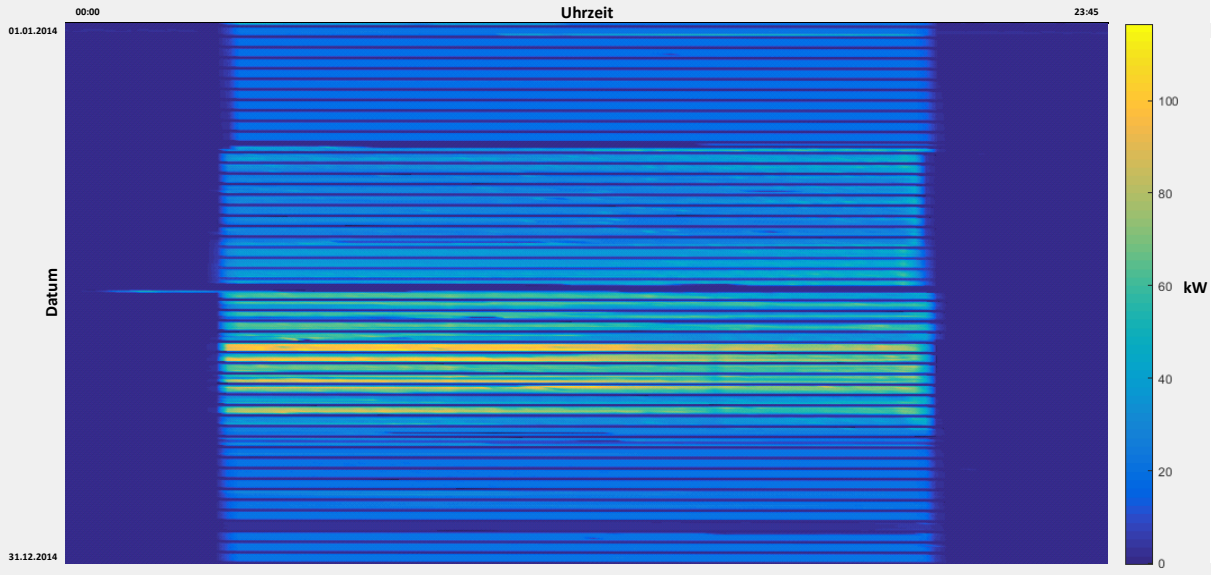

Abbildung 48: Carpet-Plot der Leistungswerte der Anlage, Gebäude 5

Nachdem neben der Leistungsaufnahme der Anlage auch die Außentemperatur aufgezeichnet worden ist, kann das entsprechende Stundentemperaturprofil verwendet werden, um den bekannten gemessenen Jahresenergieverbrauch mit jenem zu vergleichen, welcher durch Anwendung des Simulationsmodells eruiert wird. Der reale Energieverbrauch lag dabei um 4,2 % über jenem Wert, welchen das Simulationsmodell liefert. Eine Ursache dieser Differenz kann in der unbekannten Kennlinie des Kälteregisters liegen, für welche im Modell eine lineare Kennlinie angenommen wird.

Maßnahmenbewertung

Abbildung 49 zeigt die Verteilungen der normierten Baseline, des Verbrauchs nach Maßnahmenumsetzung und der resultierenden Einsparung für den Bereich elektrische Energie. Diese entspricht der Summe aus Ventilator- und Kühlenergieverbrauch. Abbildung 50 zeigt die entsprechenden Ergebnisse für den Heizenergieverbrauch. Als unsichere Einflussgröße tritt hierbei jeweils die Temperatur auf, für welche eine Normalverteilung aus den von der nächstgelegenen ZAMG-Wetterstation aufgezeichneten Daten ermittelt worden ist. Dies erklärt, warum die einzelnen Verteilungen den angegebenen hypothetischen Normalverteilungen anschaulich gut entsprechen. Aus den Boxplots ist ersichtlich, dass die Verteilungen zudem näherungsweise symmetrisch sind. Es zeigt sich, dass die Unsicherheit der Ergebnisse und damit die erkennbare Breite der Verteilungen relativ gering ausfallen.

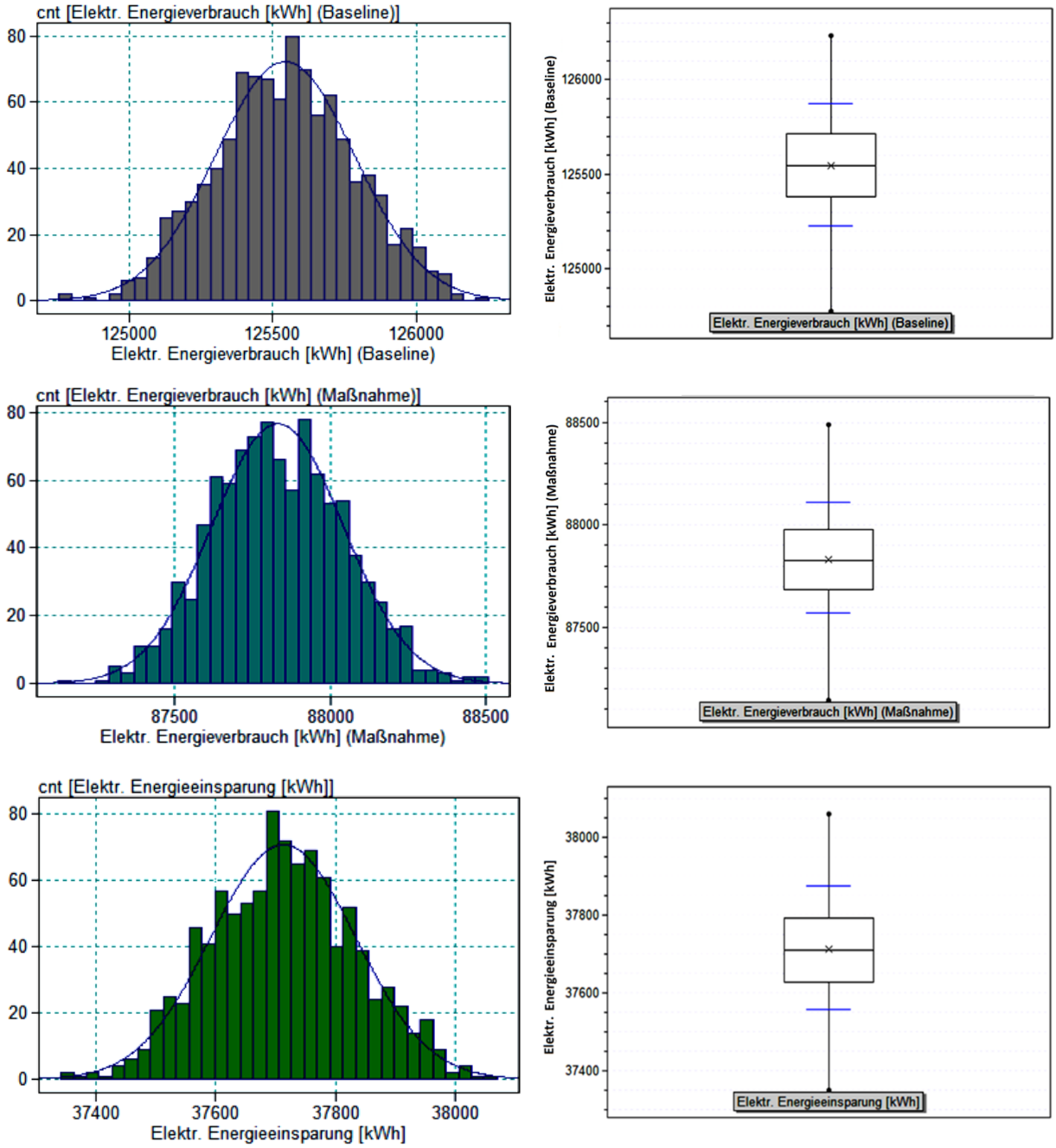

Abbildung 49: Maßnahmenbewertung Betriebsoptimierung, elektrische Energieeinsparung, Gebäude 5

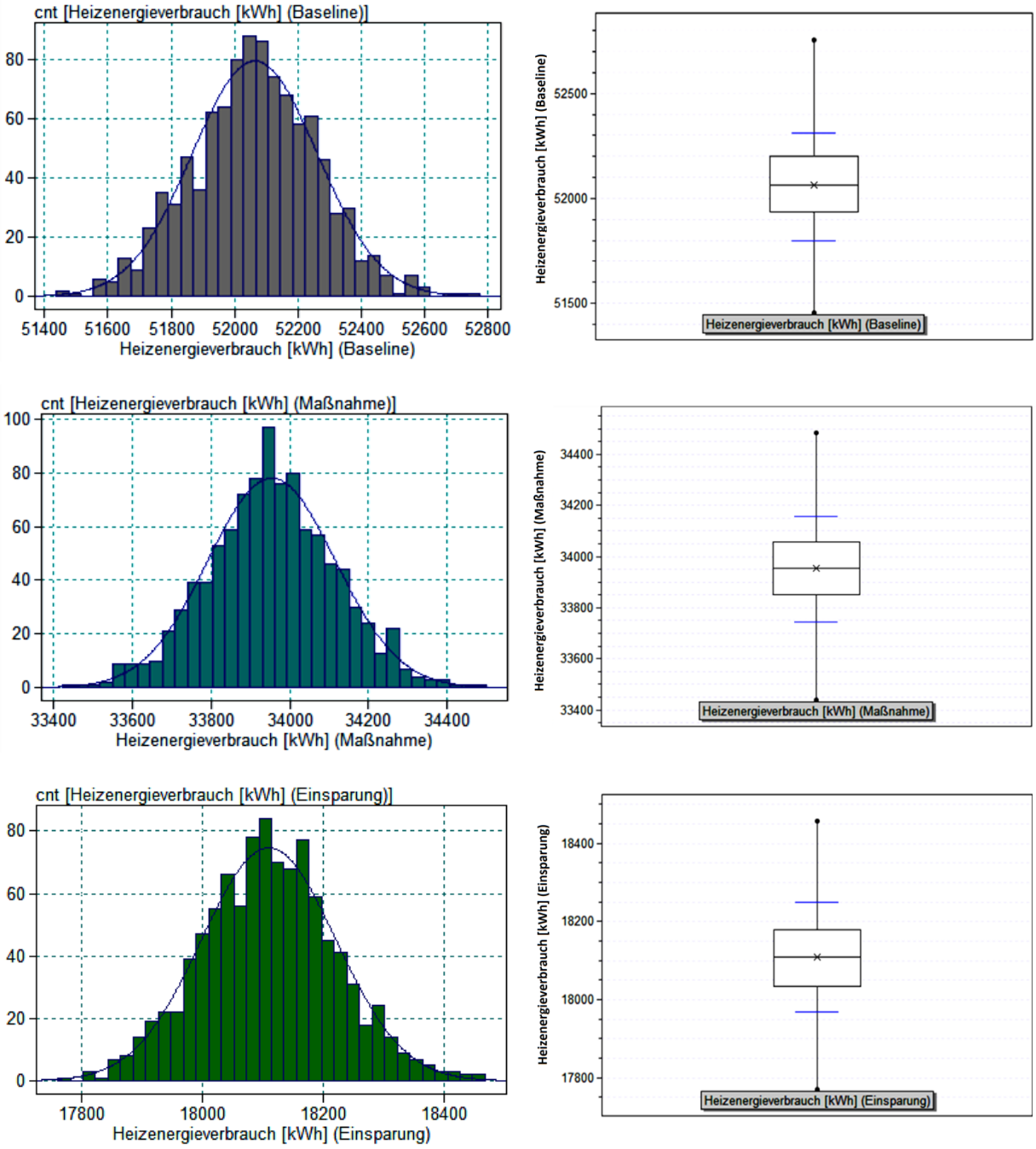

Abbildung 50: Maßnahmenbewertung Betriebsoptimierung, Einsparung Heizenergieverbrauch, Gebäude 5

- **Beispiel 2: Betriebsoptimierung und Einbau einer Energierückgewinnung**

Das hier betrachtete Bürogebäude wird von 167 Personen genutzt und von drei mechanischen Lüftungsanlagen mit Frischluft versorgt. Zwei der Anlagen verfügen über zwei Betriebsstufen, welche allerdings bei der aktuellen Programmierung nicht ausgenutzt werden. Die dritte Anlage kann nur einstufig betrieben werden und besitzt aktuell keine Energierückgewinnung.

Tabelle 15: Kenndaten des Beispielgebäudes 6

Gebäudetyp	Büro
Fläche [m²]	1 278
Nutzeranzahl	167
Baujahr	1997
Sanierungsjahr	-
Bauweise	Betonbau
Fassadentyp	einschalig
Energietechnischer Standard	gering
Gesamter Energieverbrauch [kWh/a]	585 997
Energiekosten [€/a]	76 830

Ausgangssituation und Maßnahmenbeschreibung

Die beiden zweistufigen Anlagen haben eine elektrische Ventilatorleistung von 16,6 kW bzw. 26,4 kW bei einem maximalen Volumenstrom von 8 770 m³/h bzw. 10 650 m³/h und werden auf maximaler Betriebsstufe an Werktagen von 05:00 bis 20:00 Uhr betrieben. An Sonntag startet der Anlagenbetrieb um 05:00 Uhr und erfolgt bis Montag 05:30 durchgehend bei maximalem Volumenstrom. Die einstufige Anlage hat eine Ventilatorleistung von 2 kW bei einem Volumenstrom von 2 200 m³/h und wird analog zu den anderen Anlagen betrieben.

Es stellte sich bei der Nutzerbefragung heraus, dass die Auswirkungen der aktuellen Betriebszeiten auf den Energieverbrauch nicht bekannt gewesen und unterschätzt worden waren. Folglich wird die Änderung der Betriebszeiten an Werktagen auf ein einheitliches Zeitfenster von 07:00 bis 19:30 Uhr unter Ausnutzung der Betriebsstufen sowie die Anschaffung einer Energierückgewinnungsanlage mit einer Rückwärmezahl von 0,9 für die dritte Anlage als Energieeffizienzmaßnahme bewertet. Zudem wird die Programmierung der Anlagen um ein Feiertagsprogramm erweitert, sodass an Feiertagen kein Betrieb erfolgt. Am Wochenende sind die Anlagen nach Maßnahmenumsetzung nicht mehr in Betrieb, da an diesen das Gebäude grundsätzlich leer steht. Nachdem mit Wechselwirkungen der einzelnen Anlagen zu rechnen ist, erfolgt die Bewertung für alle einheitlich in einer Betrachtung.

Maßnahmenbewertung

Abbildung 51 zeigt die Verteilungen der Bewertung in Bezug auf den elektrischen Energieverbrauch, welcher der Summe aus Ventilator- und Kühlenergieverbrauch entspricht. Abbildung 52 gibt diese für den Heizenergieverbrauch der Anlagen an.

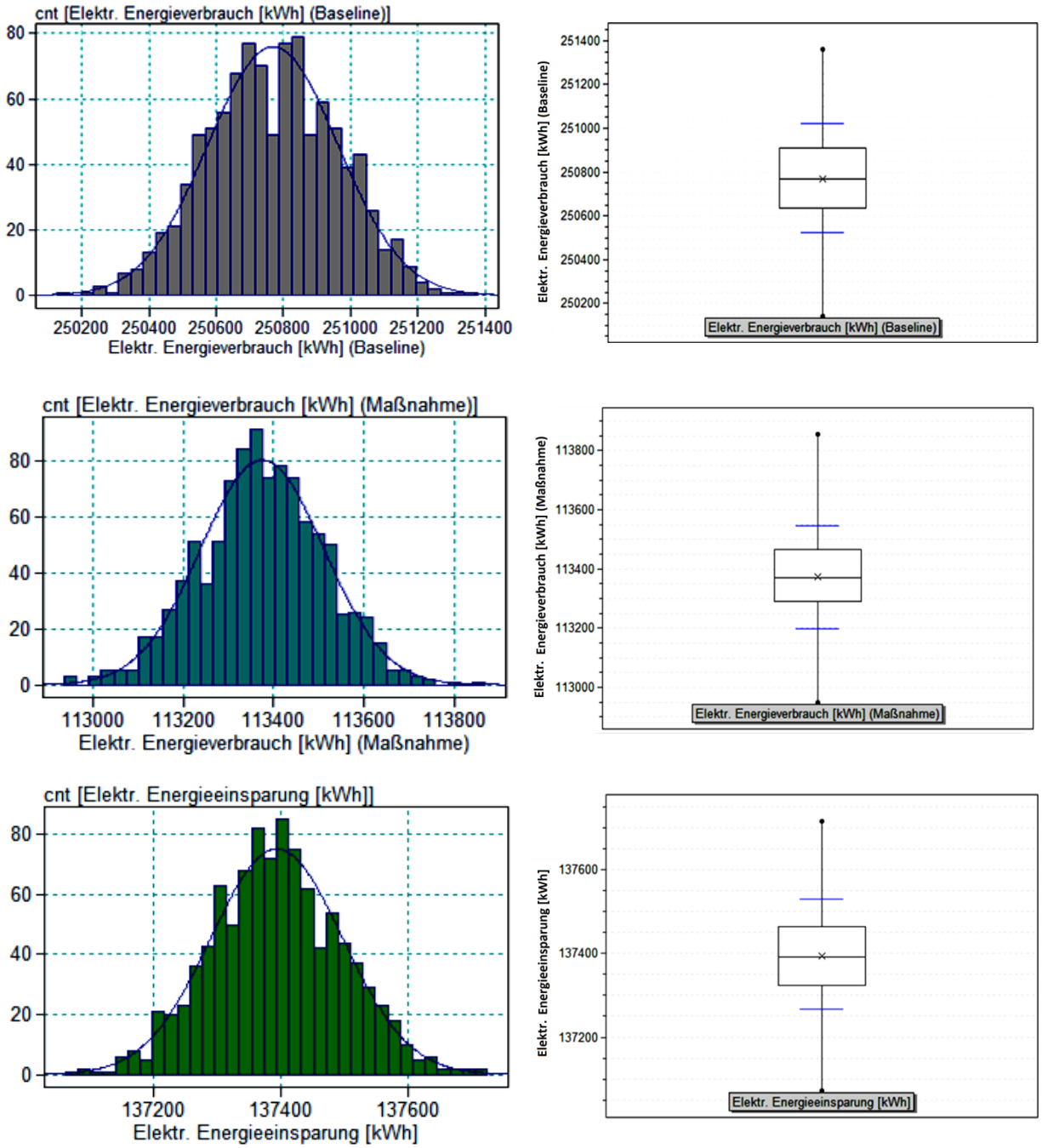

Abbildung 51: Maßnahmenbewertung Betriebsoptimierung und ERG, elektrische Energieeinsparung, Gebäude 6

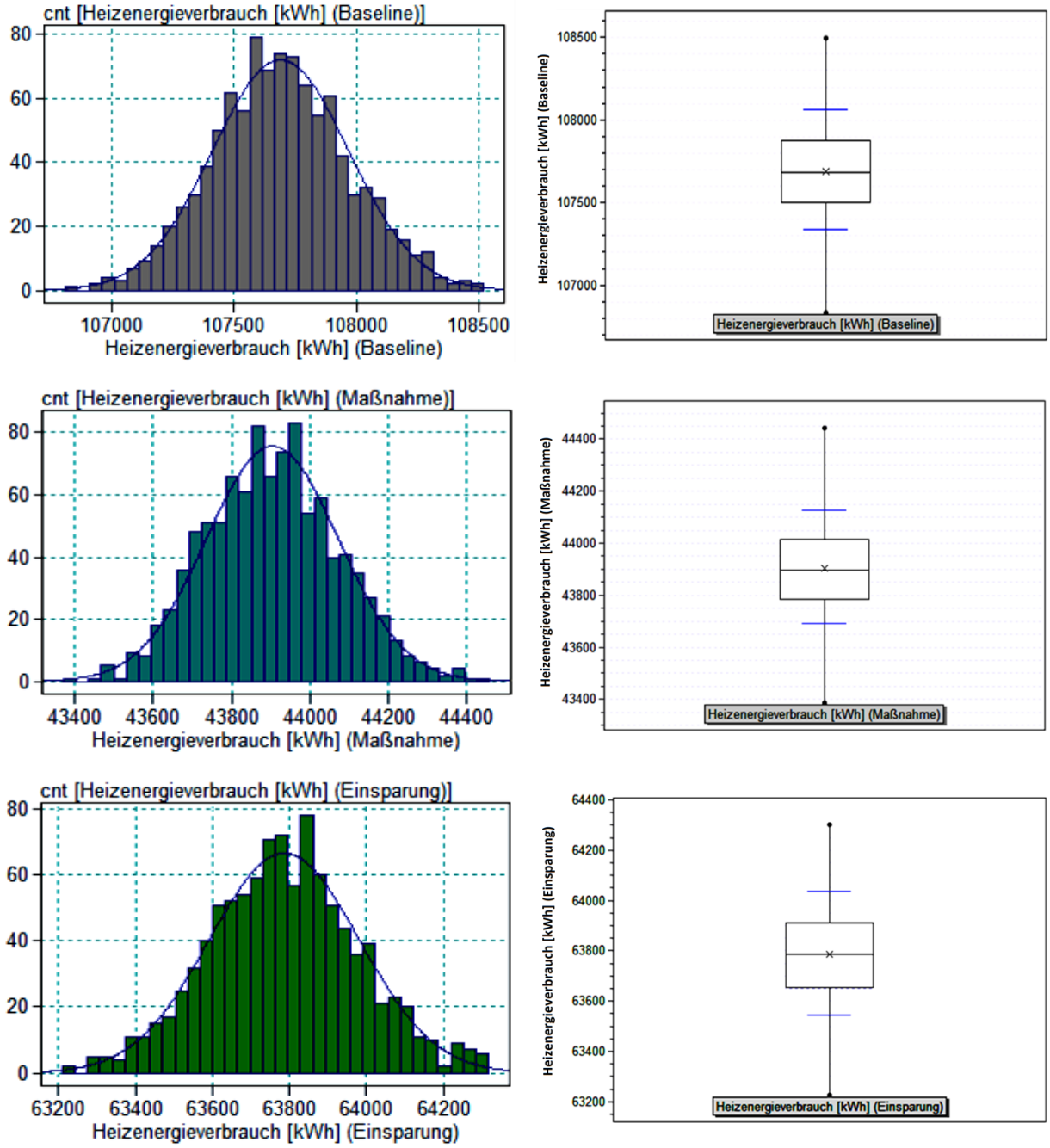

Abbildung 52: Maßnahmenbewertung Betriebsoptimierung und ERG, Einsparung Heizenergieverbrauch, Gebäude 6

Analog zu den Gründen aus Beispiel 1 ist auch hier die Breite und Form der Verteilung durch die Normalverteilung der Temperaturwerte bedingt. Insbesondere die mittlere Einsparung elektrischer Energie ist mit einem relativen Anteil von 23,5 % sehr hoch, der Wärmeenergieverbrauch würde im Mittel um 10,9 % reduziert werden. Die jährliche Kosteneinsparung würde bei den aktuellen Energietarifen des Gebäudebetreibers bei rund 26 000 € liegen.

Als Konsequenz wurde als erster Schritt die Abschaltung der zweitgrößten Lüftungsanlage am Sonntag veranlasst, um die Auswirkungen der Maßnahme zu überprüfen. Abbildung 53 zeigt die Mittelwerte der Lastkurven des Gebäudes an Sonntagen für einen Zeitraum von 12 Monaten vor der Maßnahmenumsetzung und für 3 Monate nach Maßnahmenumsetzung. Ein direkter Vergleich der simulierten Einsparung mit der aus der Lastreduktion ermittelbaren ist nicht möglich, nachdem sich die Simulation auf das jeweils gezogene Testreferenztemperaturprofil stützt, die gemessenen Lastgangwerte sich jedoch auf das tatsächlich eingetretene Temperaturprofil beziehen, und darüber hinaus keine Informationen für eine Normalisierung der gemessenen Lastkurven verfügbar sind.

Die aus der Simulation zu erwartende elektrische Energieeinsparung kann jedoch zum qualitativen Vergleich mit der Verbrauchsdifferenz der Mittellastgänge herangezogen werden, wobei eine Abweichung von rund 6,7 % zu verzeichnen ist.

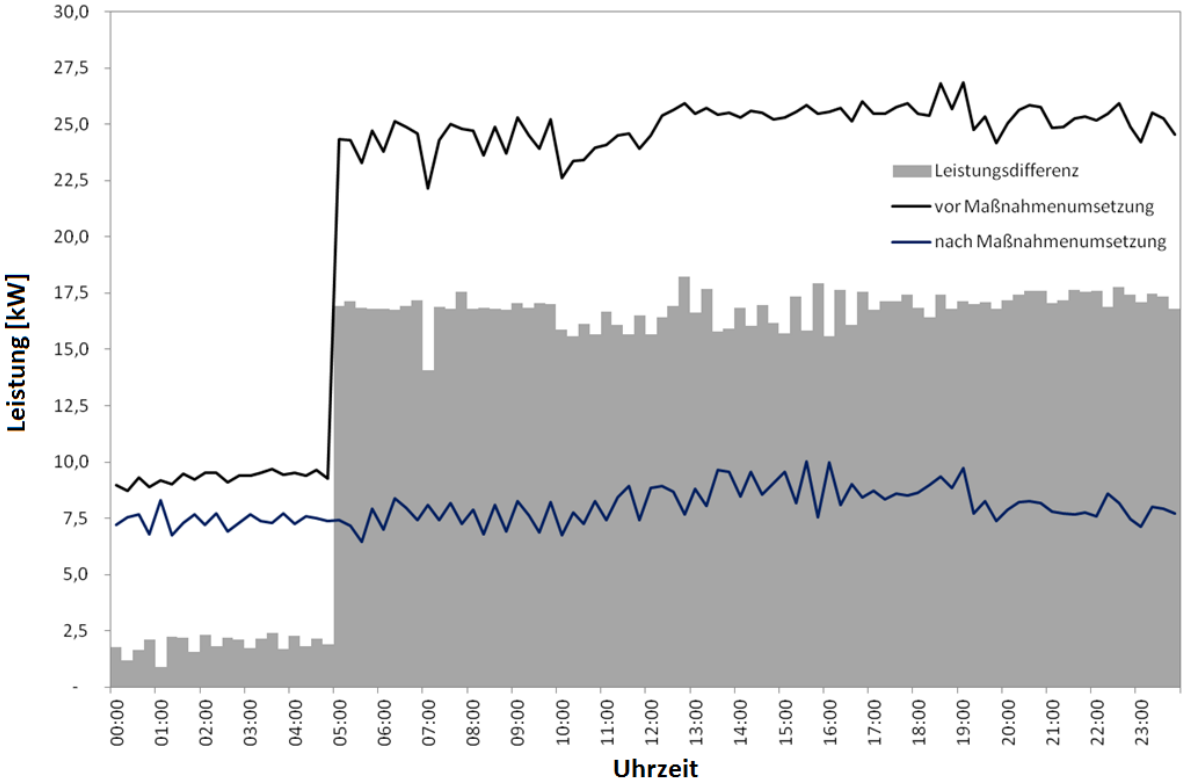

Abbildung 53: Mittelwerte der elektrischen Lastgangkurven vor und nach Abschaltung der Anlage an Sonntagen

- **Beispiel 3: Betriebsoptimierung**

Bei diesem Beispiel handelt es sich um ein Einkaufszentrum, welches täglich von schätzungsweise 10 000 Personen besucht wird. In Tabelle 16 sind nähere Informationen zum Gebäude angegeben. Dieses wird von zwei leistungsstarken Lüftungsanlagen mit Frischluft versorgt, deren Volumenstrom optimiert werden soll.

Tabelle 16: Kenndaten des Beispielgebäudes 7

Gebäudetyp	Einkaufszentrum
Fläche [m²]	5 380
Nutzeranzahl	10 000
Baujahr	2010
Sanierungsjahr	-
Bauweise	Beton- Skelettbau
Fassadentyp	Vorhangfassade
Energietechnischer Standard	sehr gut
Gesamter Energieverbrauch [kWh/a]	3 475 540
Energiekosten [€/a]	330 490

Ausgangssituation und Maßnahmenbeschreibung

Die leistungsstärkere der beiden Anlagen hat eine Ventilatorgesamtleistung von 52 kW und liefert einen maximalen Volumenstrom von 43 300 m³/h. Diese Anlage war in der Baseline-Situation täglich von 07:00 Uhr früh bis 02:00 Uhr morgens des Folgetages bei maximaler Leistung in Betrieb. Die zweite Anlage weist eine Gesamtleistung der Ventilatoren von 37 kW bei einem maximalen Volumenstrom von 39 900 m³/h auf. Nachdem das Gebäude sonntags geschlossen ist, wird im Zuge der Betriebsoptimierung eine Abschaltung an Sonntagen empfohlen.

Darüber hinaus können die Anlagen zweistufig betrieben werden. Angepasst an die Öffnungszeiten sollen beiden Anlagen erst um 08:00 Uhr ihren Betrieb aufnehmen und ab 20:00 Uhr in Teillastbetrieb übergehen. An Feiertagen wird die Anlage in Zukunft nicht mehr betrieben, nachdem die Regelung entsprechend adaptiert worden ist.

Maßnahmenbewertung

Abbildung 54 zeigt die Verteilungen der Simulation für den elektrischen Energieverbrauch (Ventilator- und Kühlenergieverbrauch), Abbildung 55 jene für die Heizenergie. Die Einsparungen von rund 181 000 bzw. 210 000 kWh entsprechen jeweils einem relativen Anteil von 5,2 % bzw. 6,0 % am Gesamtverbrauch.

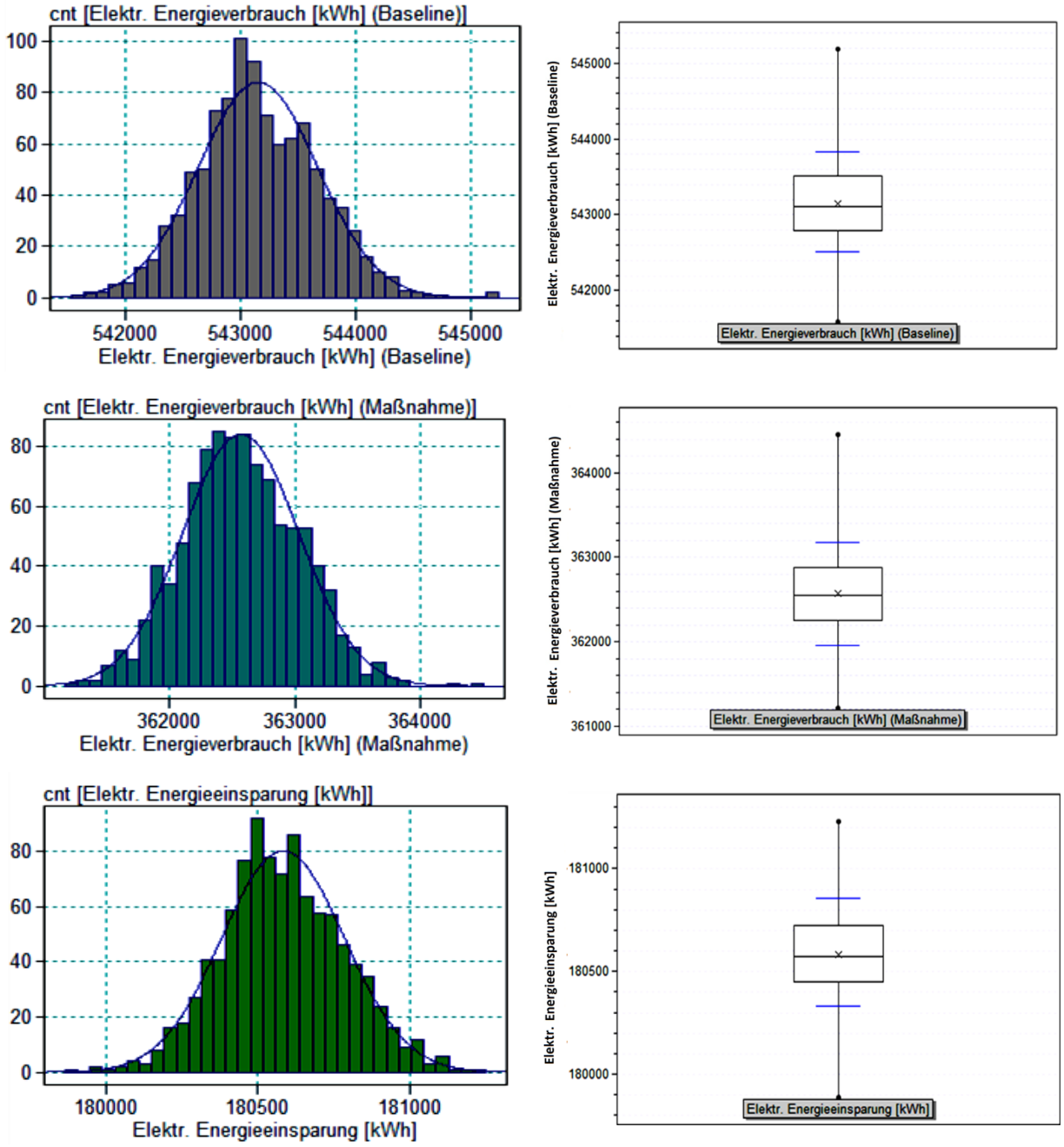

Abbildung 54: Maßnahmenbewertung Betriebsoptimierung, elektrische Energieeinsparung, Gebäude 7

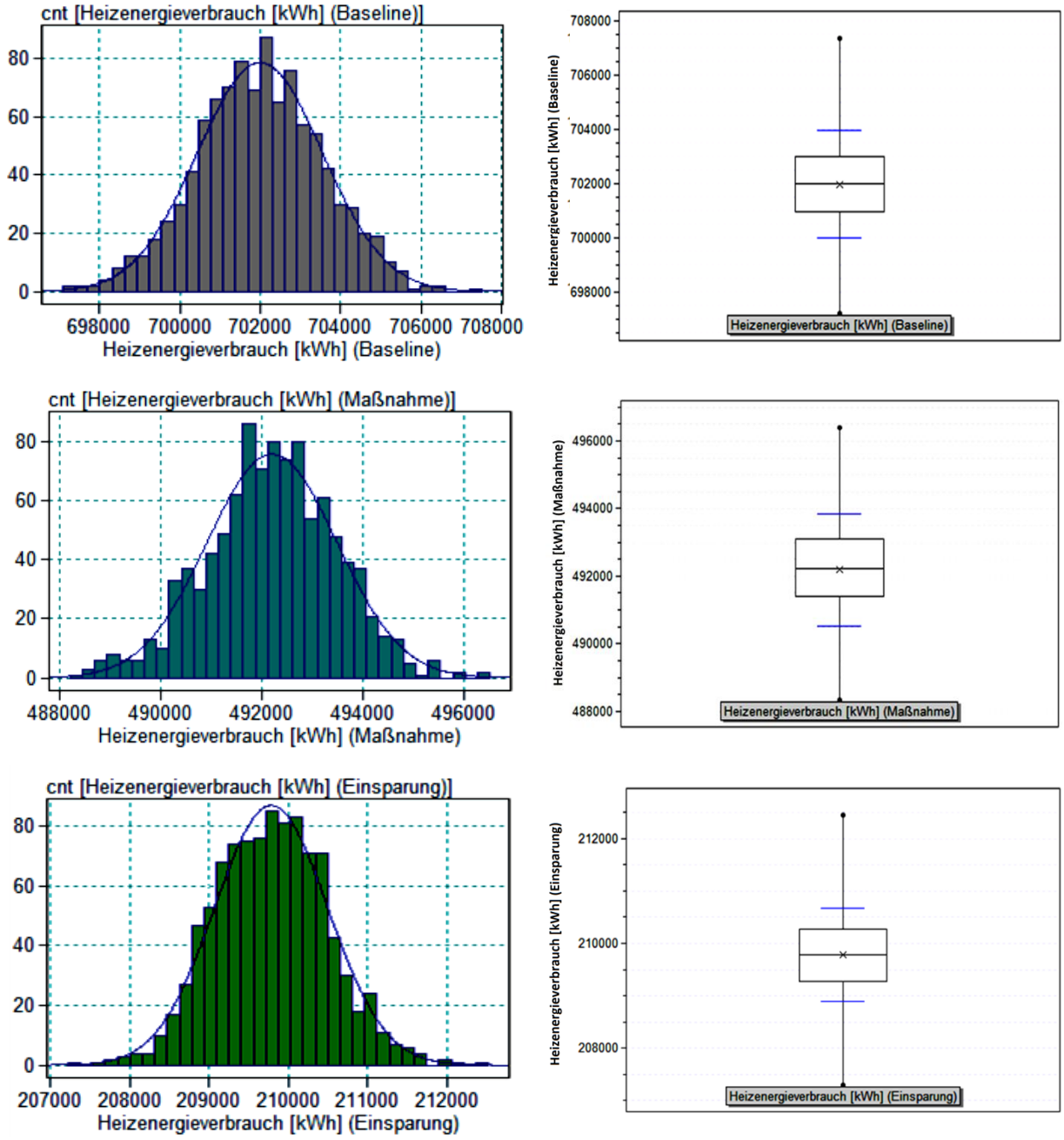

Abbildung 55: Maßnahmenbewertung Betriebsoptimierung, Einsparung Heizenergie, Gebäude 7

Der Mittelwert des elektrischen Baseline-Verbrauchs beträgt in der Simulation rund 543 500 kWh, was 2,8 % unter dem tatsächlich gemessenen von 558 700 kWh liegt. Die simulierte relative Energieeinsparung beträgt demgegenüber 32,3 %. Vergleicht man die mittleren Tagesenergieverbräuche vor und nach Maßnahmenumsetzung, wie in Abbildung 56 dargestellt, so entspricht die relative Einsparung 29,7 %. Die Abweichung der Baseline kann aufgrund der unterschiedlichen Temperaturprofile und damit durch einen Unterschied im jeweiligen Kühlenergieverbrauch begründet sein. Die Abweichung der relativen Einsparungen liegt in einer

ähnlichen Größenordnung. Der Vergleich der mittleren Tagesverbräuche ist auch in diesem Beispiel rein qualitativer Natur, nachdem keine weiteren Daten zu den gemessenen Verbräuchen bekannt sind, was eine Normalisierung der Verbräuche verhindert.

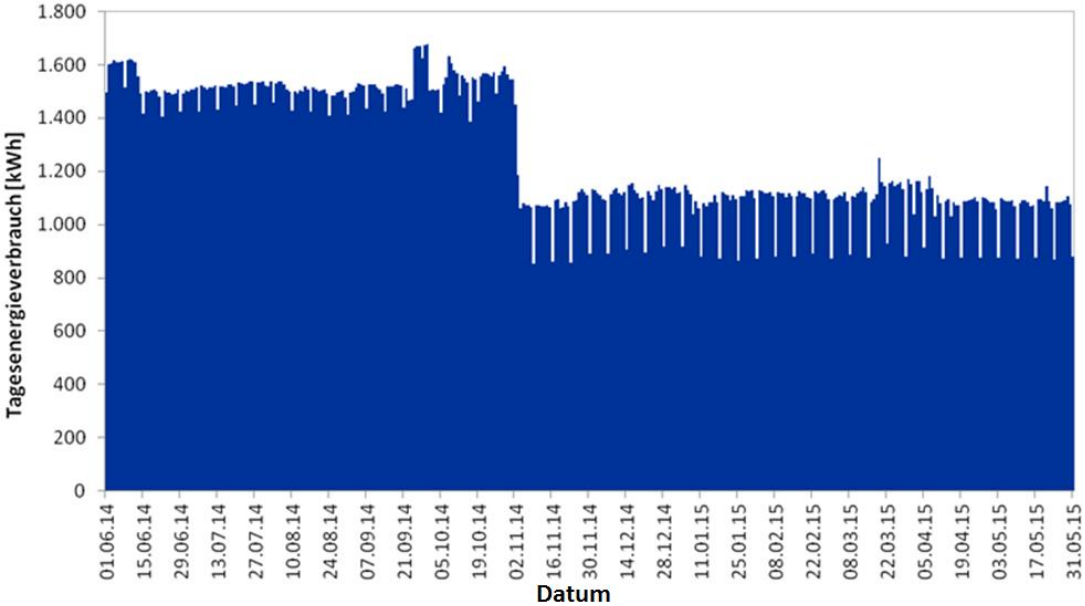

Abbildung 56: Vergleich der Tagesenergieverbräuche vor und nach Maßnahmenumsetzung

- **Beispiel 4: Betriebsoptimierung, Tausch von Ventilatoren und Einbau von Energierückgewinnungssystemen**

Bei diesem Fallbeispiel handelt es sich um ein technisch komplexes Gebäude, welches über 40 Lüftungsanlagen besitzt. Tabelle 17 weist einige Kenndaten zum Hotelgebäude aus, wobei die angegebene Nutzerzahl einer vollen Auslastung der Zimmer entspricht.

Tabelle 17: Kenndaten des Beispielgebäudes 8

Gebäudetyp	Hotel
Fläche [m²]	16 970
Nutzeranzahl	580
Baujahr	2010
Sanierungsjahr	-
Bauweise	Beton-Skelettbau
Fassadentyp	Doppelfassade
Energietechnischer Standard	mittel
Gesamter Energieverbrauch [kWh/a]	14 350 289
Energiekosten [€/a]	989 150

Es sind allerdings nur für 19 Anlagen vollständige Datenaufzeichnungen vorhanden, sodass sich die Bewertung auf diese beschränken muss. Der Anteil des Energieverbrauchs der vollständig

dokumentierten Anlagen am Gesamtenergieverbrauch lässt vermuten, dass die übrigen Anlagen einen geringeren Einfluss auf den Gesamtenergieverbrauch des Gebäudes haben. Es wird aber jedenfalls dazu geraten, auch die übrigen Anlagen überprüfen zu lassen, nachdem auch bei diesen deutliches Effizienzsteigerungspotential zu vermuten ist.

Die gesamte Leistung der 21 dokumentierten Zuluftventilatoren beträgt 458 kW, jene von 24 dokumentierten Abluftventilatoren 212 kW. Der maximale Volumenstrom beträgt für 23 dokumentierte Anlagen 851 043 m³/h. Durch den hohen Volumenstrom erfolgt der überwiegende Anteil des Wärmeeintrags in das Gebäude über die Lüftungsanlagen.

Ausgangssituation und Maßnahmenbeschreibung

Die überwiegende Anzahl der betrachteten Ventilatoren fällt in eine sehr hohe SFP-Klasse, sodass im Einklang mit dem Betriebspunkt der Anlage für die untersuchten Lüftungen neue Ventilatoren vorgeschlagen werden. Diese liegen mindestens eine SFP-Klasse höher als die aktuellen Ventilatoren. In Abhängigkeit der verfügbaren finanziellen Ressourcen wird dem Gebäudebetreiber allerdings aufgrund der teils sehr hohen Ventilatorleistungsaufnahmen dazu geraten, die effizientesten Komponenten zu wählen, welche aktuell am Markt verfügbar sind.

Darüber hinaus wurde die Betriebszeit jeder Anlage hinterfragt und an den tatsächlichen Bedarf angepasst. Es hat sich in diesem Zusammenhang gezeigt, dass viele wesentlich länger in Betrieb sind, als der entsprechende Gebäudetrakt den Hotelgästen überhaupt zugänglich ist. Der Grund hierfür lag schlichtweg darin begründet, dass die Programmierung der Betriebszeiten mit möglichst geringem Zeitaufwand ausgeführt wurde. In Zusammenhang mit den teils sehr schlechten SFP-Klassen resultiert daraus ein hoher Anlagenverbrauch. Der relativ niedrige Energietarif des Gebäudes begünstigte diese Denkweise.

Im Rahmen der Betriebszeitanpassung wurde auch der Volumenstrom entsprechend den Anforderungen optimiert. Die Stufenregelungsmöglichkeiten der Anlagen wurden bisher bei keiner der Anlagen ausgenutzt, um auch hier Zeit bei der Anlagenkonfiguration zu sparen.

Letztlich wurde bei Anlagen, welche aktuell mit keiner Energierückgewinnung ausgestattet sind, die Möglichkeit eines Einbaus dieser Komponente überprüft und angeraten.

Maßnahmenbewertung

Der elektrische Baseline-Verbrauch liegt für die aktuellen Betriebszeiten und Ventilatoren bei rund 3,7 GWh, nach Umsetzung des Maßnahmenpakets liegt der Prognoseverbrauch bei 2,0 GWh. Die relative Einsparung elektrischer Energie durch den Ventilatortausch und die Betriebsoptimierung beträgt damit rund 45 %. Abbildung 57 zeigt die Verteilungen der Simulation für elektrische Energie,

wobei hierbei der Kühlenergiebedarf als unsichere Einflussgröße berücksichtigt ist. Abbildung 58 zeigt die Verteilung der Simulationsergebnisse des Heizenergieverbrauchs.

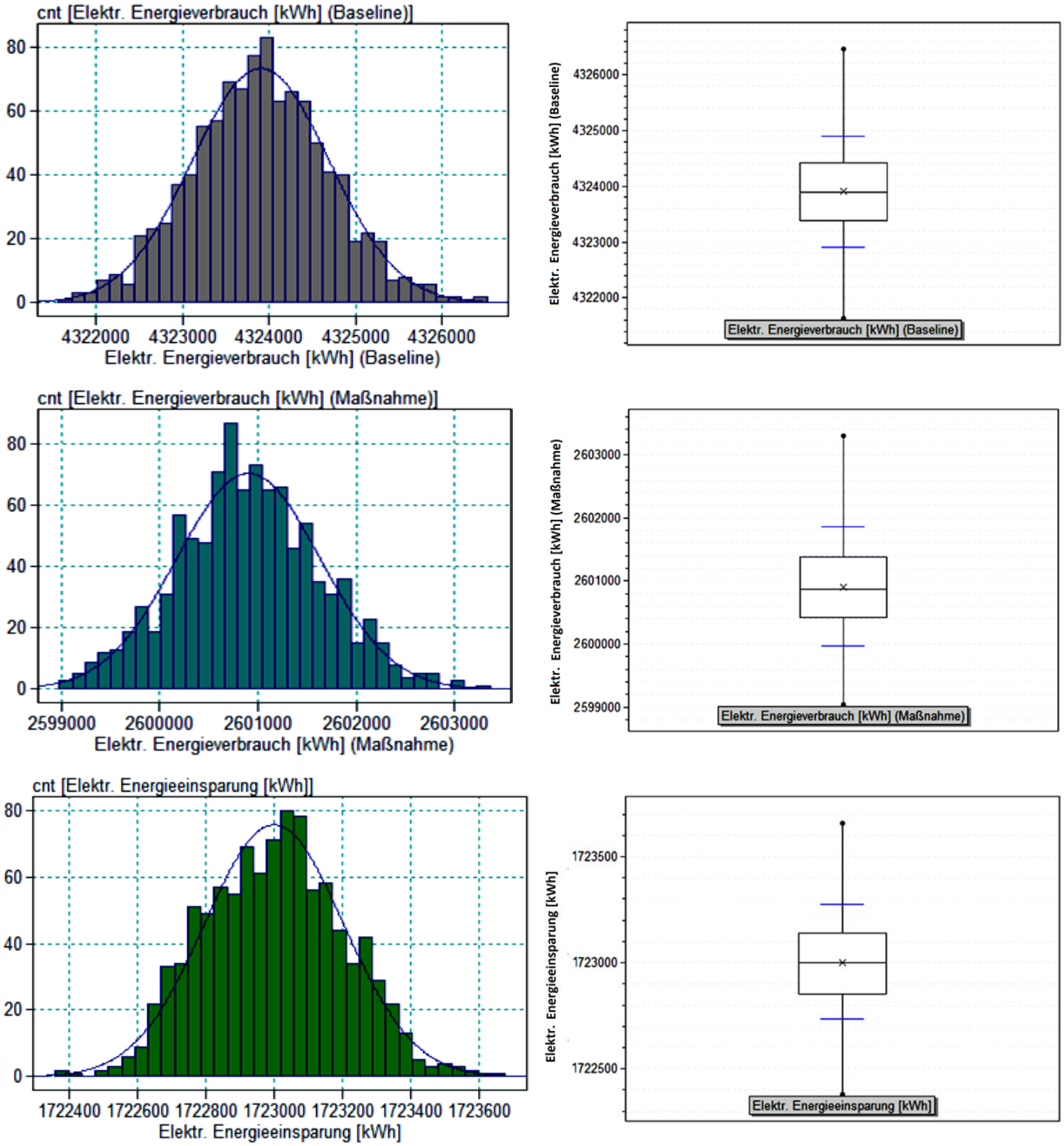

Abbildung 57: Maßnahmenbewertung Betriebsoptimierung und Ventilatortausch, elektr. Energieeinsparung, Gebäude 8

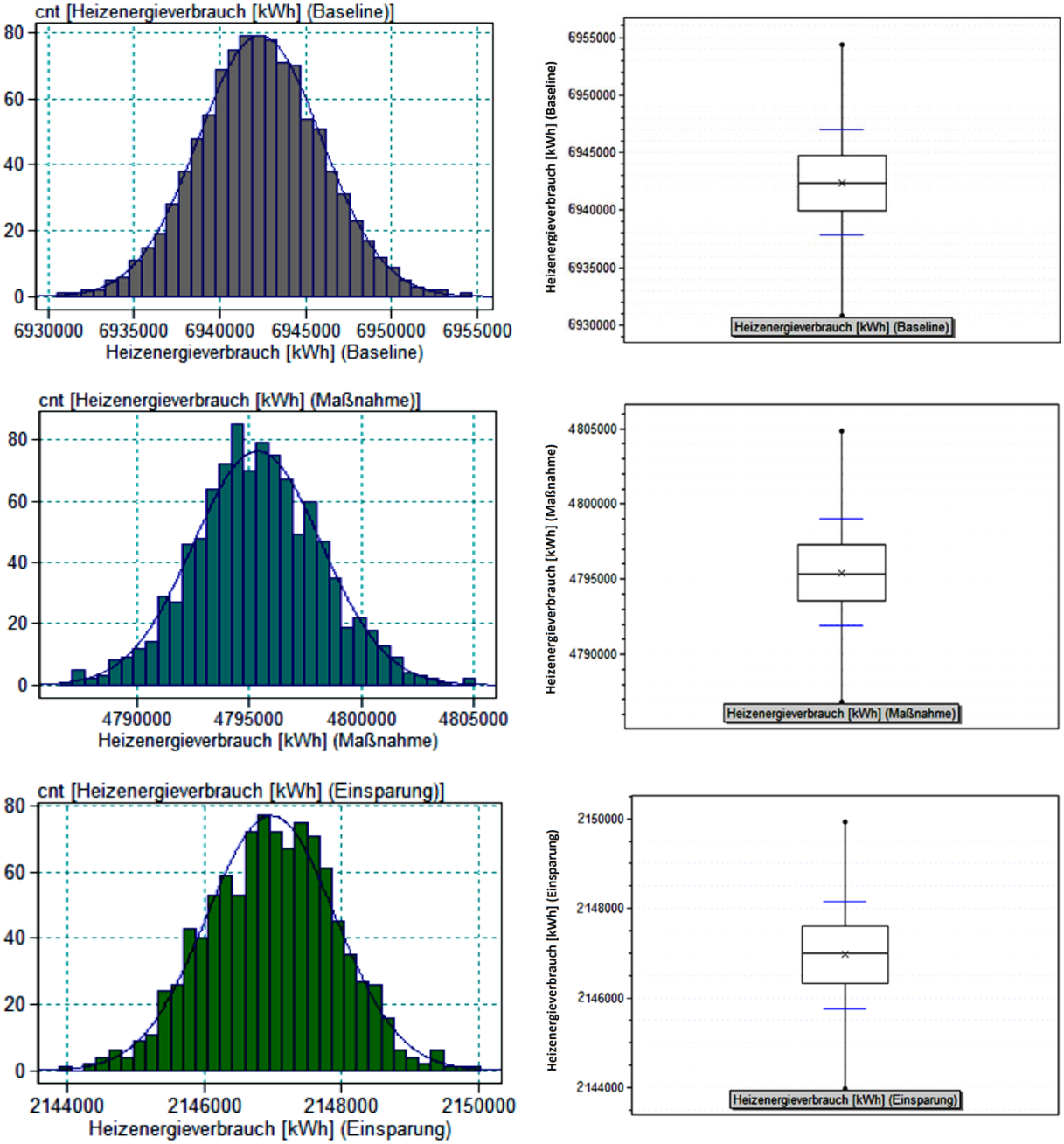

Abbildung 58: Maßnahmenbewertung Betriebsoptimierung, Einsparung Heizenergie, Gebäude 8

Die mittlere jährliche Kosten- bzw. Energieeinsparung der betrachteten Maßnahmen beträgt rund 27 % des jährlichen Gesamtenergiebedarfs des Gebäudes. Es wird aufgrund des sehr großen Effizienzsteigerungspotentials der betrachteten Anlagen dazu geraten, nicht nur die übrigen Lüftungsanlagen zu überprüfen, sondern auch in anderen Gewerken nach ähnlichen Einsparpotentialen zu suchen.

- **Beispiel 5: Free Cooling mittels Lüftungsanlage**

Bei diesem Beispielgebäude handelt es sich um eine Verkaufsfiliale, welche in Tabelle 18 näher beschrieben wird. Die angegebene Nutzeranzahl entspricht einer Schätzung der täglichen Kundenanzahl. Das Gebäude wurde vor wenigen Jahren energetisch saniert und verfügt über eine sehr effiziente zentrale Lüftungsanlage und eine VRV-Klimaanlage.

Tabelle 18: Kenndaten des Beispielgebäudes 9

Gebäudetyp	Verkaufsfiliale
Fläche [m²]	210
Nutzeranzahl	800
Baujahr	1984
Sanierungsjahr	2012
Bauweise	Betonbau
Fassadentyp	einschalig
Energietechnischer Standard	sehr gut
Gesamter Energieverbrauch [kWh/a]	47 595
Energiekosten [€/a]	4 350

Ausgangssituation und Maßnahmenbeschreibung

Die maximale Leistungsaufnahme der Lüftungsanlage liegt bei 1,7 kW, jene der Klimaanlage bei 6,5 kW. Abbildung 59 zeigt die mittlere elektrische Leistungsaufnahme der Kältemaschine in der Kühlsaison des Jahres 2014. Man erkennt daraus, dass diese bereits um 03:30 Uhr startet und bis 19:00 Uhr in Betrieb ist. Zudem ist die Anlage auch sonntags in Betrieb, um eine sommerliche Überwärmung am Wochenbeginn zu vermeiden. Es soll überprüft werden, ob mit Hilfe der Lüftungsanlage ein Free-Cooling-Erfolg erzielt werden kann, sodass das Gebäude mit kalter Nachtluft belüftet wird, um einen Kühlerfolg zu erreichen. Im Gegenzug soll die Kälteanlage erst um 12:00 Uhr am Folgetag in Betrieb genommen werden. Es soll folglich im Rahmen der Maßnahmenbewertung überprüft werden, ob der verstärkte Betrieb der Lüftungsanlagen in den Nachtstunden einen geringeren elektrischen Energiebedarf bewirkt, als die Kälteanlage in ihrer eingesparten Betriebszeit von 03:30 bis 12:00 Uhr. Bei der Free-Cooling-Nutzung wird das Energierückgewinnungssystem der Lüftungsanlage über einen Bypass umgangen.

Für die neue Anlagensteuerung zur Ausnutzung des Free-Cooling-Effekts soll folgende Regelung eingesetzt werden: Sofern die Tagesaußentemperatur zwischen 20:00 und 21:00 Uhr über 20 °C liegt und damit ein Kühlbedarf gegeben ist, jedoch mindestens 2 K unter der Innentemperatur liegt, um auch einen Kühleffekt gewährleisten zu können, soll die Lüftungsanlage von 22:00 bis 05:00 Uhr des Folgetages in Betrieb gehen, die Kälteanlage im Gegenzug am Folgetag jedoch erst um 12:00 Uhr starten. Ist diese Bedingung nicht erfüllt, so ändert sich am aktuellen Anlagenbetrieb nichts.

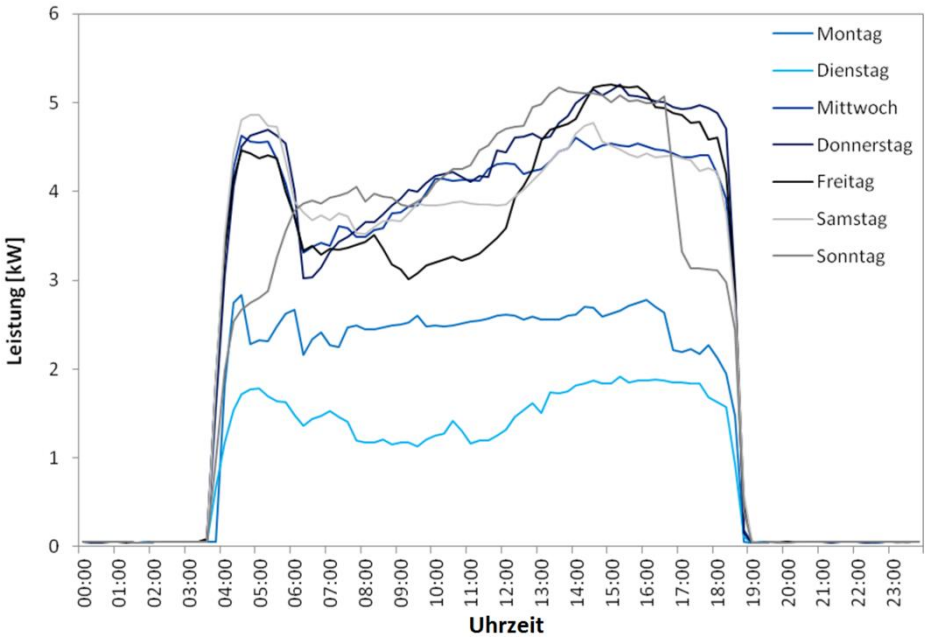

Abbildung 59: Mittelwert der Leistungsaufnahme der Kälteanlage

Die einzelnen Betriebszustände für den Free-Cooling-Einsatz sind in (3.6) zusammengefasst. Ist die Temperaturdifferenz aus Außentemperatur und gemessener Innentemperatur ΔT kleiner als 2 K, so erfolgt kein Free-Cooling-Betrieb. Liegt die Temperaturdifferenz zwischen 2 und 4 K, so erfolgt ein Free-Cooling-Betrieb mittels Außenluft bei einem Volumenstrom der Lüftungsanlage, welcher einer Luftwechselzahl n von 16 bei einer elektrischen Leistungsaufnahme von 4,5 kW entspricht. Bei einer noch deutlicheren Temperaturdifferenz erfolgt eine Drosselung des Volumenstroms auf eine Luftwechselzahl von n = 10, sodass die Ventilatorleistung auf 1,1 kW reduziert werden kann.

$$Betriebszustände \begin{cases} \Delta T < 2K & kein\ FC - Betrieb \\ \Delta T \in [2;4] & n = 16;\ P = 4{,}5\ kW \\ \Delta T > 4K & n = 10;\ P = 1{,}1\ kW \end{cases} \tag{3.6}$$

Maßnahmenbewertung

Abbildung 60 zeigt zur durchgeführten Maßnahmenbewertung die entsprechenden Verteilungen an. Der Baseline-Verbrauch entspricht dabei dem Energieverbrauch der Kälteanlage in der Zeit von 03:30 bis 12:00 Uhr, der Energieverbrauch der Lüftungsanlage in der Free-Cooling-Periode von 22:00 bis

05:00 Uhr wird als Maßnahmen-Verbrauch bezeichnet. Die für die Monte-Carlo-Simulation verwendeten Temperaturprofile basieren auch in diesem Fall auf den Stundenwerten einer 25-jährigen Messperiode der ZAMG für den Gebäudestandard. Abhängig vom jeweils gezogenen Temperaturprofil schwankt der Energieverbrauch der VRV-Kälteanlage, wie auch jener der Lüftungsaufnahme, nachdem deren Betriebsstufe von der Temperaturdifferenz abhängig ist. Die Verteilung der Anzahl jener Tage, an welchen Free-Cooling-Betrieb stattfindet und damit eine Maßnahmenbewertung erfolgt, ist in Abbildung 61 dargestellt.

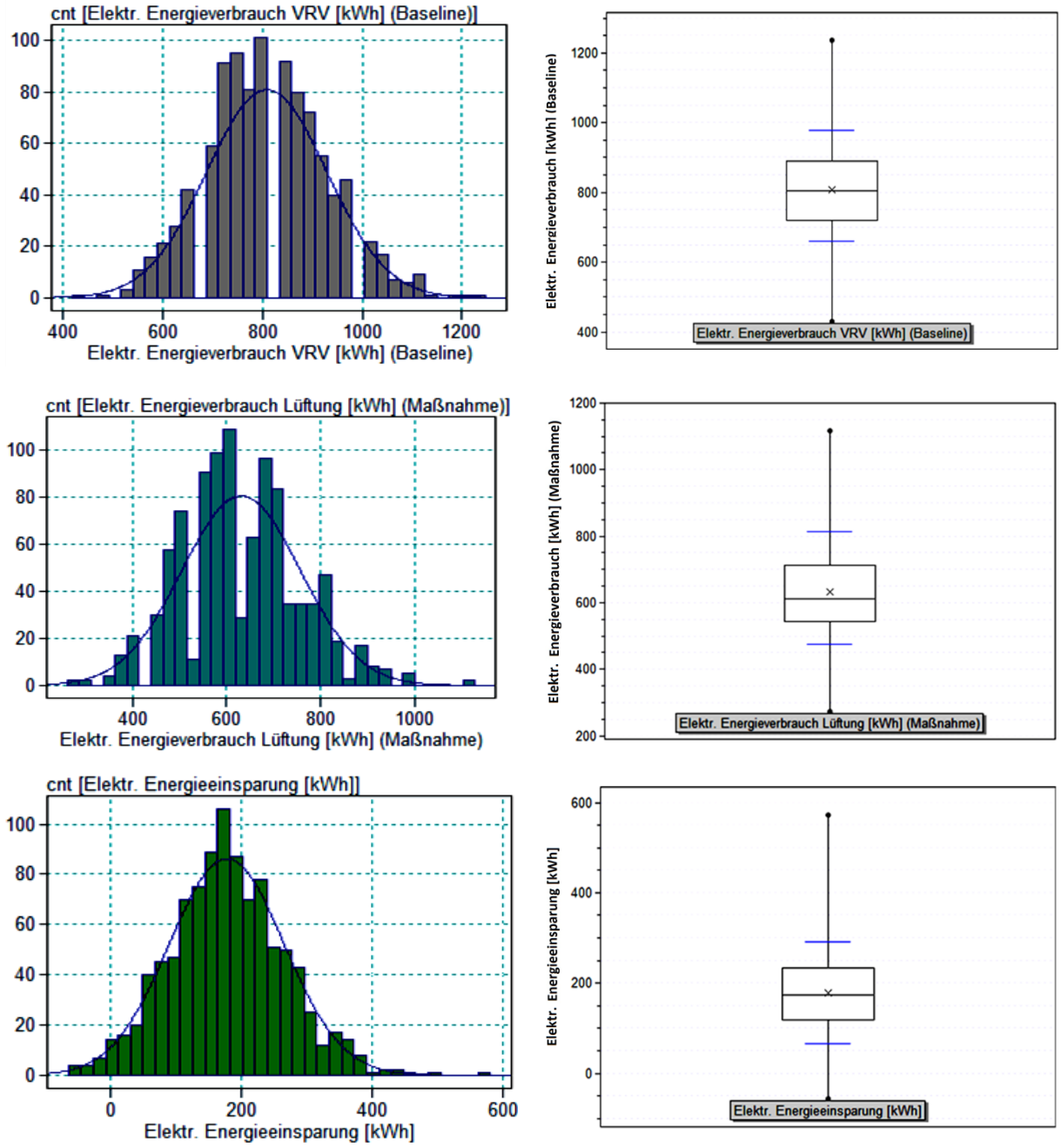

Abbildung 60: Maßnahmenbewertung Free-Cooling-Einsatz, Gebäude 9

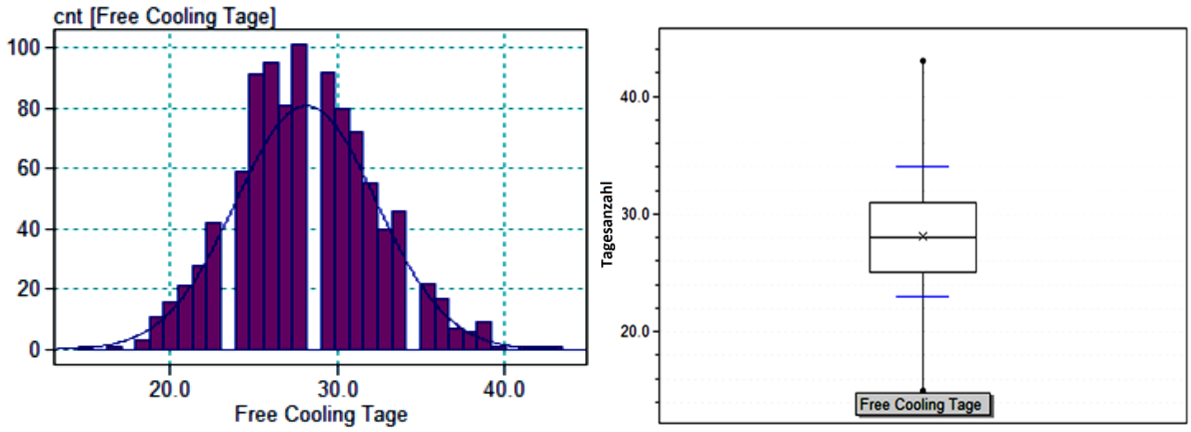

Abbildung 61: Verteilung der Tage mit Free-Cooling-Einsatz, Gebäude 9

Nachdem es sich bei den Temperaturdifferenzen, welche die Auswahl der Anlagenbetriebszustände nach (3.6) bestimmen, und auch der Anzahl der betrachteten Tage um diskrete Zahlen handelt, sind in den Verteilungen diskrete Lücken enthalten. Interessant ist darüber hinaus auch, dass die in Abbildung 60 dargestellte Verteilung der Energieeinsparung erkennbar unsymmetrisch ist und Werte um die minimale Energieeinsparung bereits im negativen Wertebereich liegen. Abbildung 62 zeigt daher die Boxplots der beiden Anlagenverbräuche als Gegenüberstellung. Man erkennt, dass deren Wertebereiche entsprechend überlappen und, im Gegensatz zu den bisher behandelten Maßnahmen, nicht für alle gezogenen Simulationsergebnisse eine tatsächliche Energieeinsparung angenommen werden kann.

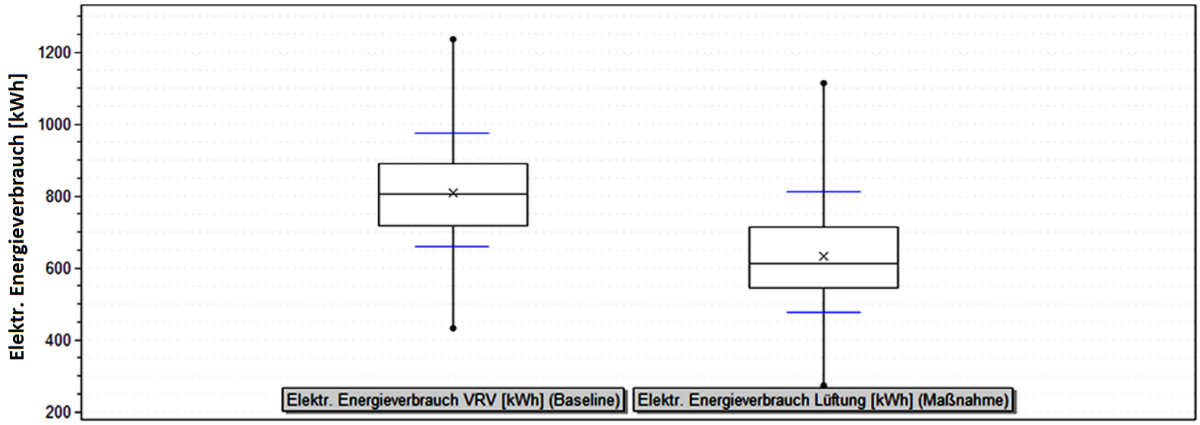

Abbildung 62: Vergleich des Energieverbrauchs der betroffenen Anlagen, Gebäude 9

Der Grund für einen möglichen Mehrverbrauch des verstärkten Einsatzes der Lüftungsanlage ist, dass die angenommene Regelung keine Annahmen über den tatsächlichen Kühlbedarf am Folgetag macht. Sollte in der Kühlsaison die Bedingung für einen Free-Cooling-Einsatz erfüllt sein, allerdings über Nacht ein derartig starker Temperaturabfall eintreten, dass am Folgetag nur ein geringer Kühlbedarf selbst ohne Einsatz der Nachtlüftung gegeben ist, so tritt ein erhöhter Energieverbrauch auf.

Dennoch ist festzuhalten, dass dieser nachteilige Effekt eines Mehrverbrauchs nach Maßnahmenumsetzung für sehr wenige Ziehungsergebnisse eingetreten ist. Zudem ist anzumerken, dass die angenommenen Luftwechselraten mit entsprechenden Ventilatorleistungen ebenso wie der Zeitpunkt der Wiederinbetriebnahme der Kälteanlage auf Vermutungen basieren. Es wird dem Gebäudebetreiber aufgrund der Simulationsergebnisse dazu geraten, die Maßnahme umzusetzen und die Betriebsparameter der Anlage entsprechend dem tatsächlichen Bedarf zu wählen. Dies betrifft insbesondere den Einsatzzeitpunkt der Kältemaschine, welcher bedarfsabhängig erfolgen sollte. Möglicherweise reicht der hohe Luftwechsel der Nachtlüftung aus, um die Speichermasse des Gebäudes soweit zu aktivieren, dass ein zusätzlicher Kälteeinsatz zumindest an manchen Tagen gänzlich ausbleiben kann. Allerdings ist auch zu beachten, dass das Verhalten der inneren Lasten ebenso wie die thermische Trägheit des Gebäudes nicht näher bekannt ist und daher ein Probebetrieb ratsam ist.

3.3.3 Kälte- und Pumpsysteme

In vielen Gebäuden kommen sowohl Kälteanlagen, als auch Pumpsysteme für verschiedene Anwendungen zum Einsatz. Kältemaschinen dienen insbesondere zur Kühlung von Innenräumen, können aber auch für spezielle Anforderungen, wie etwa medizinische Geräte, zum Einsatz kommen. Pumpen finden beispielsweise zur Förderung des Heizungsmediums, zur Warmwasserzirkulation oder der Förderung von Kältemitteln Anwendung. Daher soll die vorgestellte Methode auch für diese Gewerke anhand von Anwendungsbeispielen getestet werden.

3.3.3.1 Maßnahmenauswahl und Simulationsmodelle

Für Kältemaschinen können verschiedene Möglichkeiten zur Steigerung der Energieeffizienz interessant sein. Jene mit dem wohl geringsten Aufwand stellt die Überprüfung der Betriebsweise dar. Dies umfasst sowohl die Solltemperaturen der Kältemittel, als auch die gewünschten Zieltemperaturen. Darüber hinaus kann, beispielsweise durch fehlerhafte Programmierung, der Fall gegeben sein, dass dieselben Räume gleichzeitig beheizt und gekühlt werden.

Die Nutzung von Free-Cooling-Potentialen stellt eine weitere Möglichkeit dar, den Betriebsbedarf einer Kältemaschine zu reduzieren. Dies kann beispielsweise durch einen Wärmetauscher ermöglicht werden, welcher das Kältemittel mit Hilfe der Außenluft oder des kalten Grundwassers auf die Zieltemperatur kühlt. Unter Umständen kann kühles Grundwasser direkt durch die Leitungen einer Fußbodenheizung zirkulieren und die Speichermasse eines Gebäudes derart kühlen, dass weiterer Kühlbedarf verhindert wird. Eine weitere Möglichkeit des Free-Coolings wurde anhand von Beispielgebäude 9 bereits behandelt.

Zur Effizienzsteigerung von Pumpen kann, je nach Anwendungsgebiet und entsprechenden Anforderungen, beispielsweise der Umstieg auf drehzahlgeregelte Hocheffizienzpumpen mit relativ hohem Wirkungsgrad attraktiv sein (vgl. [44], S.106). Darüber hinaus kann auch die Regelung bestehender Pumpen verbessert werden. Für diese beiden Maßnahmen werden im Folgenden Anwendungsfälle betrachtet.

3.3.3.2 Anwendungsbeispiele für Maßnahmenbewertungen

- **Beispiel 1: Anpassung der Grenztemperatur für Free-Cooling**

Bei diesem Beispiel wird die Anwendung von Free-Cooling zur Entlastung einer Kältemaschine eines Krankenhauses betrachtet, zu welchem Tabelle 19 weitere Kennzahlen angibt. Die angegebene Nutzeranzahl entspricht der Summe der Bettenzahl und der Anzahl des Krankenhauspersonals. Das Interesse an einer Reduktion des elektrischen Energiebedarfs zur Kältebereitstellung ist groß, nachdem die Kälteanlagen einen Jahresenergieverbrauch in der Größenordnung von 1,2 GWh und damit von über 10 % am Gesamtjahresverbrauch verursachen.

Tabelle 19: Kenndaten des Beispielgebäudes 10

Gebäudetyp	Krankenhaus
Fläche [m²]	65 850
Nutzeranzahl	820
Baujahr	1970
Sanierungsjahr	-
Bauweise	Betonbau
Fassadentyp	einschalig
Energietechnischer Standard	niedrig
Gesamter Energieverbrauch [kWh/a]	8 437 800
Energiekosten [€/a]	515 320

Ausgangssituation und Maßnahmenbeschreibung

Das Kältenetz des Krankenhauses darf eine Temperatur von 12 °C nicht überschreiten, um die verwendeten medizinischen Geräte nicht zu gefährden. Aktuell wird der Wärmetauscher zur Ausnutzung von Free-Cooling nur bis zu einer Außentemperatur von 6 °C verwendet. Im Free-Cooling-Betrieb wird zur Förderung des Kältemittels eine Bypass-Pumpe einer elektrischen Leistungsaufnahme von 18 kW verwendet. Sind die beiden Kältemaschinen (Maximalleistung jeweils 175 kW) in Betrieb, wird eine Hauptpumpe mit 22 kW elektrischer Leistung verwendet. Bei niedriger Außentemperatur sind die Kältemaschinen in Teillastbetrieb, welcher eine elektrische Leistungsaufnahme von rund 105 kW erfordert.

Als Energieeffizienzmaßnahme soll die Erhöhung der Free-Cooling-Grenztemperatur von 6 °C auf 8 °C bewertet werden. Die Anlagenregelung sieht dabei zur Verhinderung von ungünstigem Taktverhalten vor, dass die Grenztemperatur für mindestens vier Stunden unterschritten sein muss. Die Kälteanlage läuft nach Inbetriebnahme in jedem Fall für mindestens eine Stunde, ehe der Betriebszustand wieder gewechselt wird. Nachdem eine Reduktion der Anlagenbetriebszeit ebenso die Lebensdauer der Kältemaschinen erhöht, ist diese Beispielmaßnahme auch aus anderen wirtschaftlichen Gründen interessant.

Maßnahmenbewertung

Abbildung 63 zeigt die Verteilungen der Betriebszeit des Free-Cooling-Bypasses, wobei die Monte-Carlo-Simulation wie bisher auf Basis der 25-jährigen Temperaturmessdaten basiert.

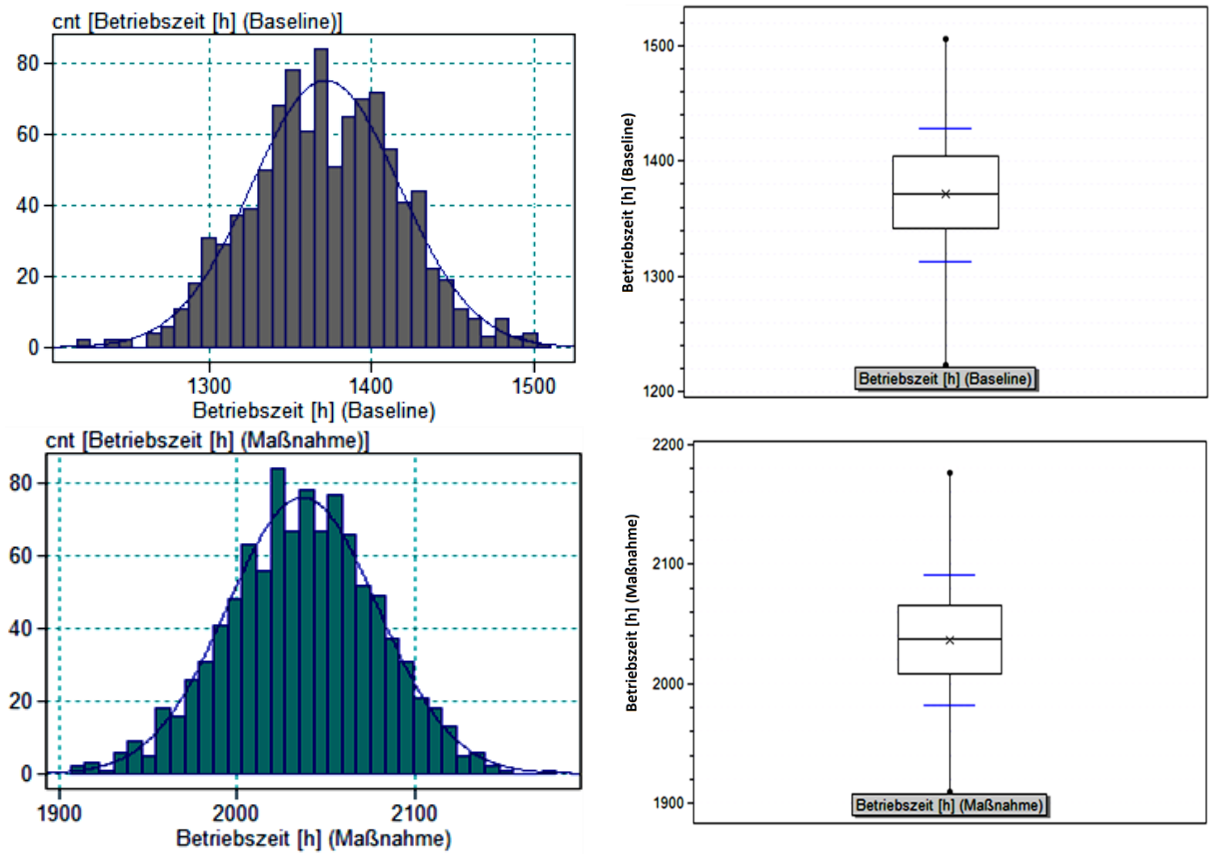

Abbildung 63: Vergleich der Free-Cooling-Nutzungsdauer, Gebäude 10

Abbildung 64 zeigt die resultierende Energieeinsparung durch die verstärkte Ausnutzung des Free-Cooling-Wärmetauschers, sowie die resultierende Reduktion der Betriebszeit der Kältemaschinen.

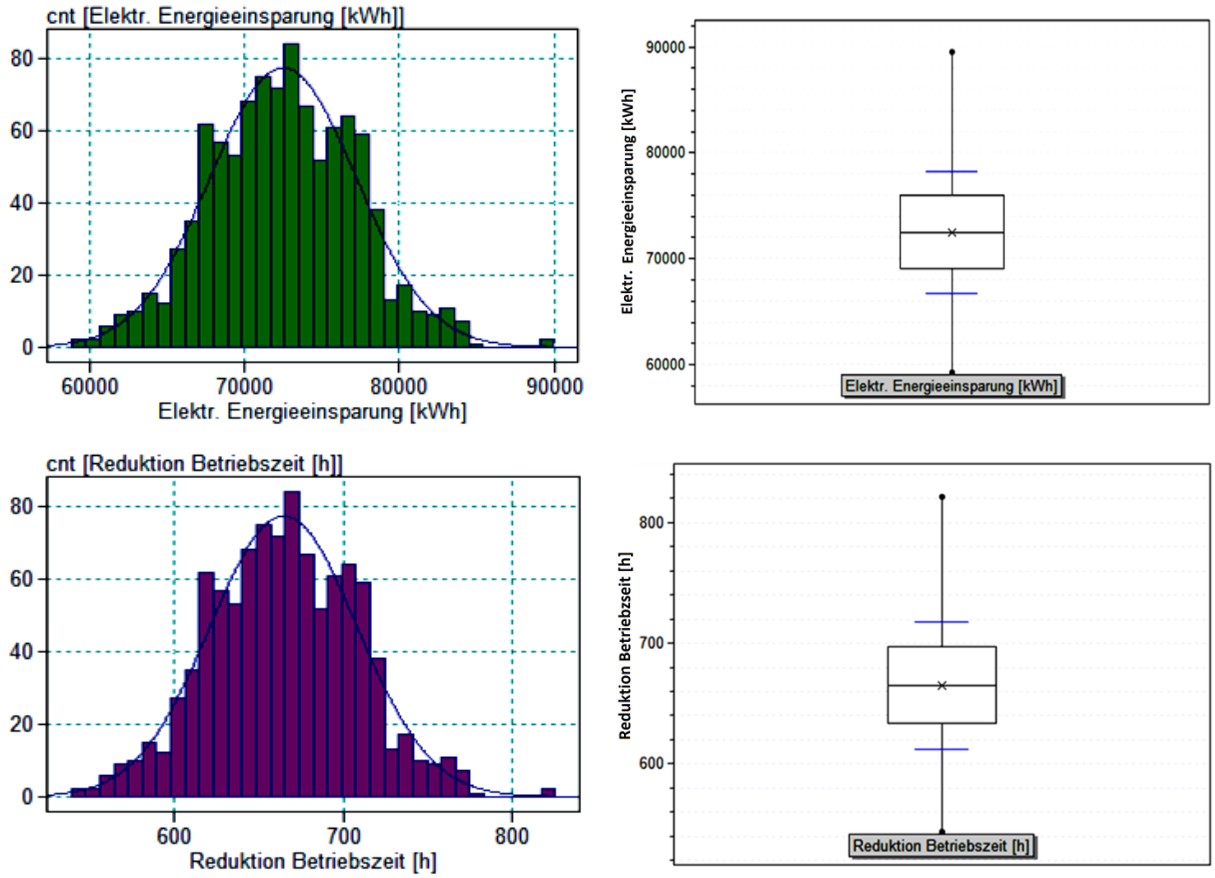

Abbildung 64: Elektrische Energieeinsparung und Betriebszeitreduktion, Gebäude 10

Die mittlere Einsparung beträgt rund 6 % des jährlichen elektrischen Energieverbrauchs für die Kältebereitstellung, die Kosteneinsparung beträgt im Mittel 4 400 € jährlich. Aufgrund der einfachen Umsetzbarkeit der Maßnahme und der merklichen Reduktion der Anlagenbetriebszeit wird die Maßnahme in Folge der Maßnahmenbewertung vor der nächsten Kühlsaison umgesetzt werden.

- **Beispiel 2: Optimierung der Pumpenregelung**

Bei diesem Fallbeispiel handelt es sich um ein Hotelgebäude, welches eine zentrale Umwälzpumpe für die Heizungsanlage besitzt, deren Regelung optimiert werden soll. Tabelle 20 weist zu diesem Beispielgebäude nähere Informationen aus.

Tabelle 20: Kenndaten des Beispielgebäudes 11

Gebäudetyp	Hotel
Fläche [m²]	6 185
Nutzeranzahl	150
Baujahr	1960
Sanierungsjahr	2010
Bauweise	Ziegelbau
Fassadentyp	einschalig
Energietechnischer Standard	gut
Gesamter Energieverbrauch [kWh/a]	237 870
Energiekosten [€/a]	35 625

Ausgangssituation und Maßnahmenbeschreibung

Abbildung 65 zeigt die Leistungsaufnahme der Heizungsumwälzpumpe in Abhängigkeit der Temperaturdifferenz von Außenluft und Raumsolltemperatur. Die grau unterlegte Stufenfunktion stellt eine Approximationsfunktion der drehzahlgeregelten Pumpenleistung, welche im Rahmen der Simulation verwendet wird. Der gemessene Baseline-Verbrauch pro Jahr lag bei 12 129 kWh, bei Zuhilfenahme der Approximation liegt die Abweichung hiervon bei rund 0,6 %, was deren Verwendung rechtfertigt.

Wie aus Abbildung 65 eindeutig hervorgeht, läuft die Pumpe aufgrund einer ungenügenden Regelung auch außerhalb der Heizsaison. Dies soll im Zuge einer Optimierung der Pumpenregelung verbessert werden, sodass der Pumpenbetrieb an den Betrieb der Heizungsanlage angepasst erfolgt.

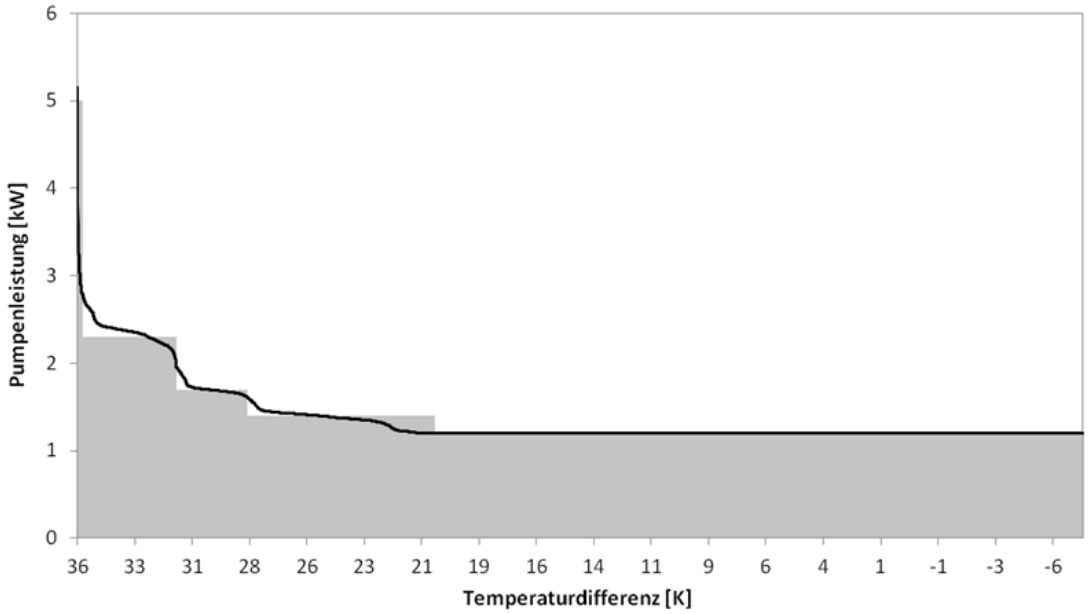

Abbildung 65: Pumpenleistung in Abhängigkeit der Temperaturdifferenz

Maßnahmenbewertung

Abbildung 66 zeigt die Verteilungen der durchgeführten Maßnahmensimulation. Die Schwankungsbreite der Energieverbräuche resultiert insbesondere aus der Dauer der Heizsaison, welche vom jeweils gezogenen Temperaturprofil abhängig ist.

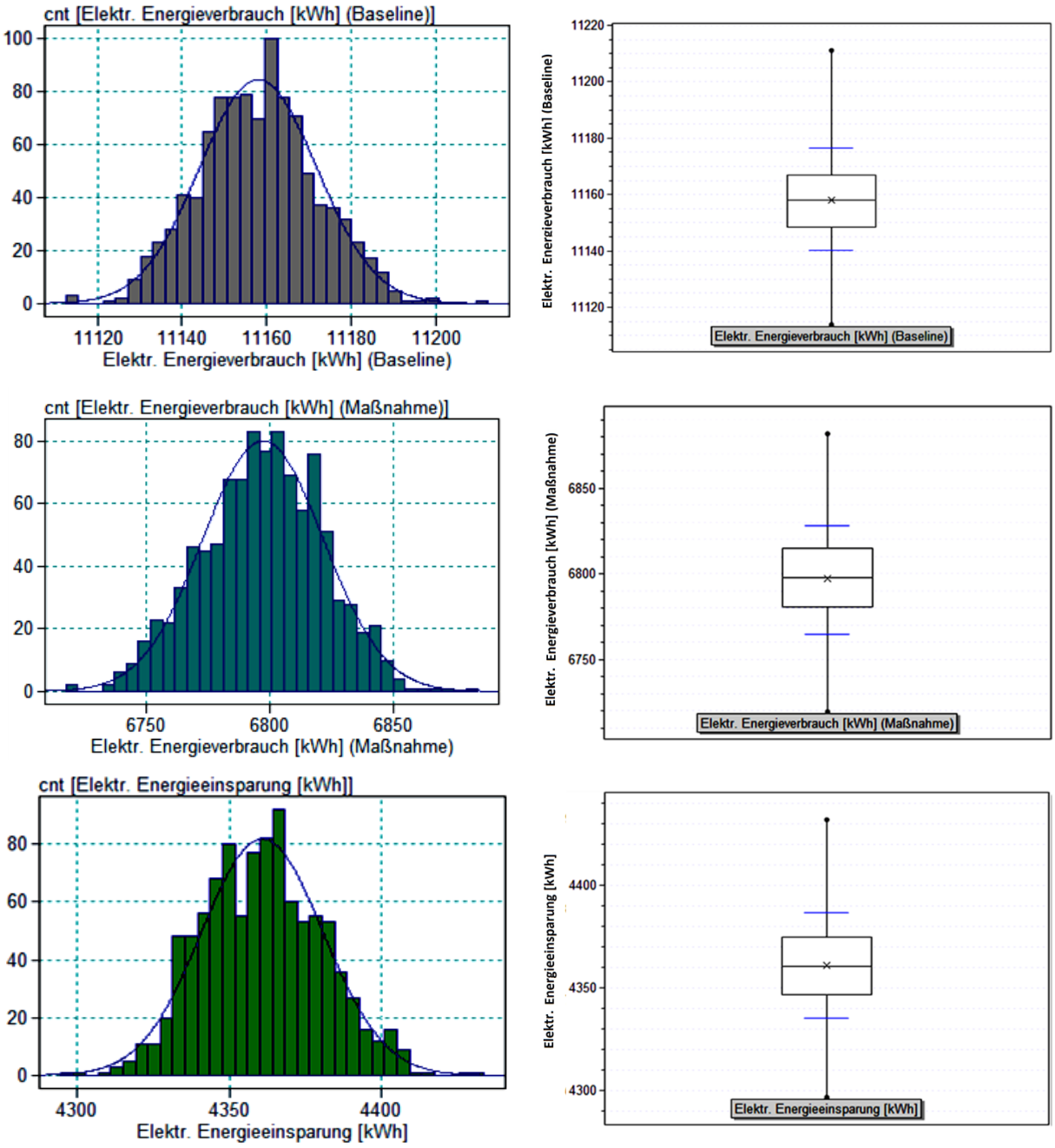

Abbildung 66: Maßnahmenbewertung, Optimierung der Pumpenregelung, Gebäude 11

- **Beispiel 3: Tausch der Umwälzpumpe**

Bei diesem Beispielgebäude handelt es sich um ein Bürogebäude, welches mit Hilfe von Tabelle 21 näher charakterisiert wird. Es soll der Tausch der aktuell verwendeten Heizungsumwälzpumpe gegen eine drehzahlgeregelte untersucht werden.

Tabelle 21: Kenndaten des Beispielgebäudes 12

Gebäudetyp	Büro
Fläche [m²]	3 624
Nutzeranzahl	317
Baujahr	1995
Sanierungsjahr	-
Bauweise	Betonbau
Fassadentyp	einschalig
Energietechnischer Standard	gut
Gesamter Energieverbrauch [kWh/a]	230 470
Energiekosten [€/a]	32 430

Ausgangssituation und Maßnahmenbeschreibung

Abbildung 67 zeigt die Pumpenkennlinien der aktuell verwendeten, dreistufigen Pumpe und der drehzahlgeregelten Pumpe, welche die alte Pumpe ersetzen soll. Es zeigt sich dabei, dass die drehzahlgeregelte Pumpe bei einer hohen Temperaturdifferenz von Außen- und Raumzieltemperatur eine merklich höhere Leistungsaufnahme aufweist, wobei derartig niedrige Außentemperaturen für den Gebäudestandort äußerst selten zu erwarten sind.

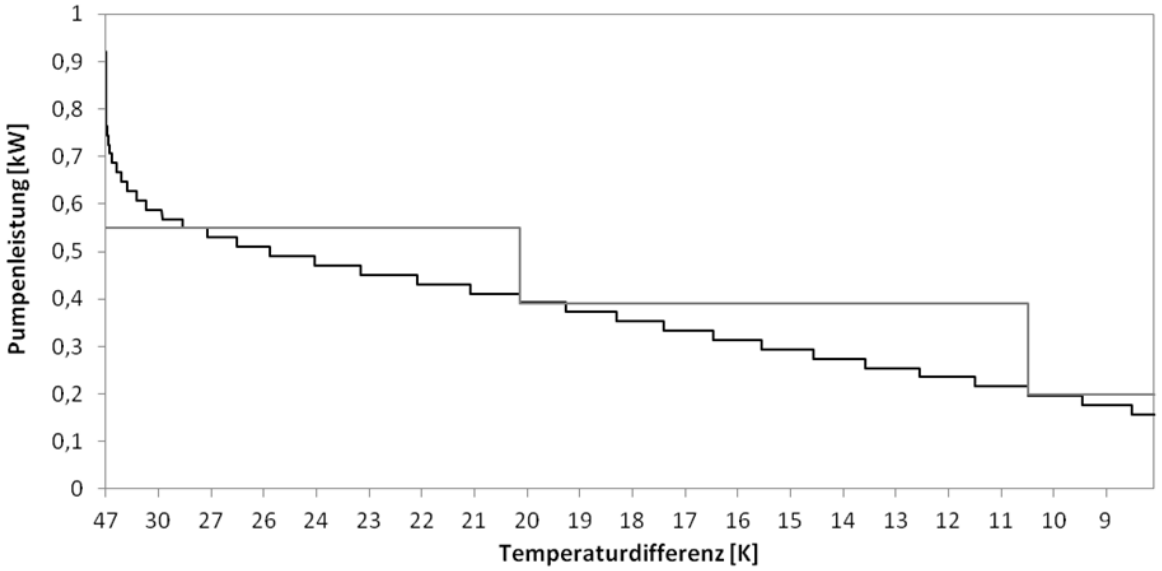

Abbildung 67: Vergleich der drehzahlgeregelten Pumpenkennlinie (schwarz) und der 3-stufigen Pumpenkennlinie (grau)

Maßnahmenbewertung

Abbildung 68 zeigt die Ergebnisse der Maßnahmensimulation. Der mittlere Einspareffekt durch den Pumpentausch liegt bei etwas mehr als 20 % und fällt damit relativ gering aus, was ein Indiz dafür ist, dass die aktuelle, stufengeregelte Pumpe eine verhältnismäßig hohe Effizienz aufweist.

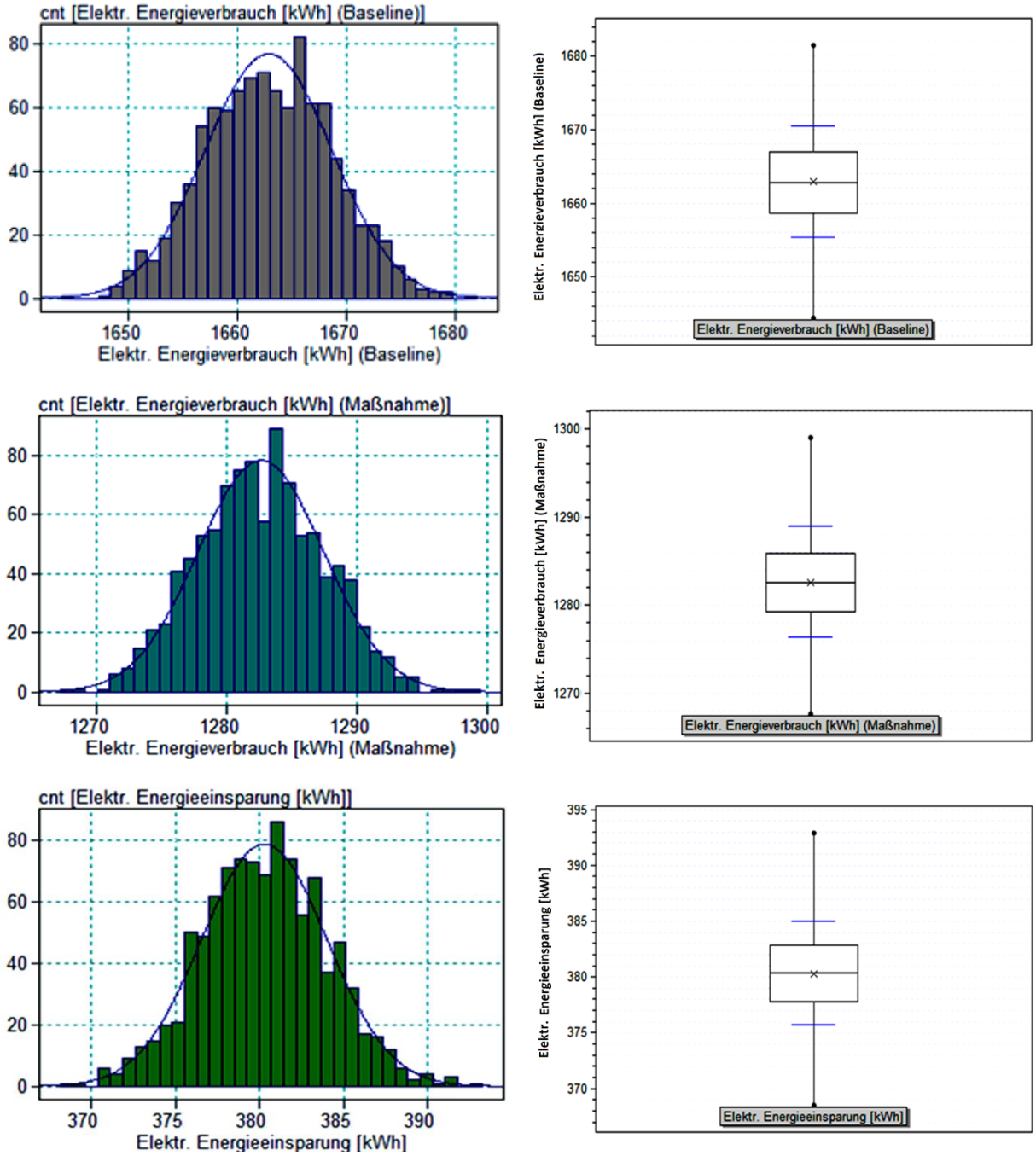

Abbildung 68: Maßnahmenbewertung, Pumpentausch, Gebäude 12

3.3.3.3 Vergleich der Methodik mit der Bewertung gemäß Richtlinienverordnung

Die Anlage 1 der „Energieeffizienz-Richtlinienverordnung“ gibt eine Methode zur Bewertung des Einbaus von effizienten Umwälzpumpen an, wobei zur Beurteilung der Pumpeneffizienz der so genannte Energieeffizienzindex EEI verwendet wird. Dieser gibt den Energieverbrauch der betrachteten Pumpe gegenüber einem definierten Referenzgerät an. Durch eine Richtlinie der Europäischen Union werden Anforderungen an neue Pumpen gestellt, sodass diese einen gewissen EEI-Grenzwert nicht überschreiten dürfen. Anhand des EEI werden verfügbare Pumpen in Energieeffizienzklassen, ähnlich jenen in Abbildung 5, eingeteilt (vgl. [44], S.100; [43], S.62).

Die Berechnung des Energieeinspareffekts des Pumpentauschs erfolgt laut Anlage 1 der Richtlinienverordnung durch Differenzbildung aus dem Produkt der jährlichen Betriebsdauer mit der aktuellen Pumpenleistung und dem Produkt der Leistung der neuen Pumpe, deren jährlicher Betriebsdauer und einem Gewichtungsfaktor gemäß dem so genannten Lastprofil „Blauer Engel“, welches in der Literatur häufig als Vergleichslastprofil herangezogen wird. Dieses gilt für europäische Klimazonen als passend und wird auch in Amtsblättern der Europäischen Union verwendet (vgl. z.B. [49]).

Analog zur Bewertung der Maßnahme „Leuchtmitteltausch“ werden auch hier Faktoren für Rebound- bzw. Multiplikatoreffekte sowie ein „Sicherheitszu- bzw. Sicherheitsabschlag“ angeführt, jedoch nicht näher quantifiziert (vgl. [43], S.62). Für die Betriebszeit der alten und neuen Pumpe wird ein Default-Wert von 5 000 Stunden angegeben. Für die Bewertung der Maßnahme sind somit nur der Leistungswert der alten und der neuen Pumpe einzusetzen.

Für Beispiel 3, welches den Tausch einer Umwälzpumpe gegen eine effiziente behandelt, beträgt die so ermittelbare Energieeinsparung rund 690 kWh und liegt damit um rund 82 % höher als der Mittelwert der Verteilung des Einspareffekts in Abbildung 68.

4 Ergebnisse

In diesem Abschnitt sollen die Ergebnisse der Arbeit zusammengefasst und ihre in Abschnitt 1.2 formulierten Forschungsfragen diskutiert werden. Grundlegende Aspekte zur Bewertung des Energieeinspareffekts von Maßnahmen im Gebäudesektor werden anhand der Zusammenfassung der Methodenanwendung in Abschnitt 4.1 behandelt.

Die Ergebnisse der Befragung der von der „Monitoringstelle Energieeffizienz“ gelisteten Energieauditoren werden in Abschnitt 4.2 angeführt und geben einen Überblick über die Erfahrungen der österreichischen Energieexperten im Zusammenhang mit Maßnahmenbewertungen. Im Anschluss daran erfolgt ein Vergleich der Ergebnisse der vorgestellten Methode mit jenen gemäß Anlage 1 der „Energieeffizienz-Richtlinienverordnung“.

4.1 Ergebnisse der Methodenanwendung

Im praktischen Teil der Arbeit wurden insgesamt zwölf Energieeffizienzmaßnahmen in unterschiedlichen Beispielgebäuden betrachtet und deren Einspareffekt unter Berücksichtigung von unsicheren Einflussgrößen bewertet. Tabelle 22 stellt die einzelnen Beispielgebäude mit den jeweils betrachteten Maßnahmen zusammen, wobei auch die jeweils von der Einsparung betroffene Energieform angegeben wird. Die relativen Einsparangaben beziehen sich dabei immer auf den gesamten Jahresenergieverbrauch bestehend aus elektrischer Energie und Wärmeenergie. Der jährliche Energieverbrauch der gesamten Gebäudestichprobe beträgt, ausgehend von den jeweils bekannten Verbräuchen in einem Kalenderjahr, rund 29,7 GWh. Bei einem gemittelten CO_2-Faktor der betroffenen Energieträger (Elektrische Energie, Gas, Erdöl) von 0,27 kg/kWh in Anlehnung an die Angaben des österreichischen Umweltbundesamts (vgl. [50]), entspricht dies einem jährlichen Treibhausgasausstoß von 7 875 Tonnen CO_2. Der Gesamtenergieverbrauch verursacht in Summe Energiekosten von rund 2,2 Millionen Euro.

Durch die jeweils vorgeschlagenen Energieeffizienzmaßnahmen könnte für die Gebäudestichprobe eine mittlere, normalisierte Reduktion des Energieverbrauchs um 16,10 %, bezogen auf die Energiekosten eine relative Reduktion von 16,24 % erreicht werden. Bei Umsetzung sämtlicher aufgezeigter Maßnahmen wäre eine jährliche Reduktion der CO_2-Emissionen von 1 213 Tonnen zu erwarten. Tabelle 23 zeigt eine Übersicht der Quantile und der Ergebnisunsicherheit aller bewerteten Maßnahmen, um die jeweils auftretenden Unsicherheiten des Einspareffekts vergleichen zu können.

Tabelle 22: Übersicht aller Bewertungsbeispiele

Gebäudetyp	Gewerk	Energieform	Maßnahme	Jahresenergieverbrauch [kWh/a]	Jahresenergiekosten [€/a]	Mittelwert Energieeinsparung [kWh/a]	Mittelwert Energieeinsparung [%]	Mittelwert Kosteneinsparung [€/a]	Mittelwert Kosteneinsparung [%]
Büro	Beleuchtung	Elektrische Energie	Leuchtmitteltausch	71480	9400	6156	9	810	9
Büro	Beleuchtung	Elektrische Energie	Betriebszeitoptimierung	71480	9400	461	1	61	1
Schule	Beleuchtung	Elektrische Energie	Leuchtmitteltausch, Betriebszeitoptimierung	78500	11010	2339	3	328	3
Hotel	Beleuchtung	Elektrische Energie	Leuchtmitteltausch	496750	41780	83940	17	7060	17
Büro	Beleuchtung	Elektrische Energie	Leuchtmitteltausch	792590	74500	21676	3	2037	3
Büro	Lüftung	Elektrische Energie	Betriebsoptimierung	438089	35870	37713	9	3088	9
Büro	Lüftung	Wärmeenergie	Betriebsoptimierung	438089	35870	18110	4	1483	4
Büro	Lüftung	Elektrische Energie	Betriebsoptimierung, ERG	585997	76830	137394	23	18014	23
Büro	Lüftung	Wärmeenergie	Betriebsoptimierung, ERG	585997	76830	63787	11	8363	11
Einkaufszentrum	Lüftung	Elektrische Energie	Betriebsoptimierung	3475540	330490	180583	5	17172	5
Einkaufszentrum	Lüftung	Wärmeenergie	Betriebsoptimierung	3475540	330490	209786	6	19949	6
Hotel	Lüftung	Elektrische Energie	Betriebsoptimierung, Ventilatoren, ERG	14350289	989150	1723001	12	118765	12
Hotel	Lüftung	Wärmeenergie	Betriebsoptimierung, Ventilatoren, ERG	14350289	989150	2146974	15	147989	15
Verkaufsfiliale	Lüftung	Elektrische Energie	Free Cooling Einsatz	47595	4350	177	0	16	0
Krankenhaus	Kältemaschine	Elektrische Energie	Free Cooling Einsatz	8437800	515320	72491	1	4427	1
Hotel	Pumpe	Elektrische Energie	Regelungsoptimierung	237870	35625	4361	2	653	2
Büro	Pumpe	Elektrische Energie	Pumpentausch	230470	32430	380	0	54	0
SUMME				**29242970**	**2156755**	**4709330**	**16**	**350267**	**16**

Tabelle 23: Übersicht aller Beispielbewertungen, Ergebnisunsicherheiten

Gewerk	Maßnahme	Energieträger	Gebäudetyp	Kennwerten zum Einspareffekt [kWh]					Analyse der Ergebnisunsicherheit			
				Minimum	unteres Quartil	Mittelwert	oberes Quartil	Maximum	Extremwertabstand [kWh]	IQR [kWh]	Extremwertabstand [%]	IQR [%]
Beleuchtung	Leuchtmitteltausch	Elektrische Energie	Büro	6.051	6.135	6.156	6.176	6.263	212	41	3,50	0,67
Beleuchtung	Betriebszeitoptimierung	Elektrische Energie	Büro	427	455	461	468	491	64	13	14,98	2,86
Beleuchtung	Leuchtmitteltausch, Betriebszeitoptimierung	Elektrische Energie	Schule	2.195	2.314	2.339	2.364	2.483	288	49	13,12	2,14
Beleuchtung	Leuchtmitteltausch	Elektrische Energie	Hotel	80.996	83.258	83.940	84.639	87.593	6.597	1.381	8,14	1,66
Beleuchtung	Leuchtmitteltausch	Elektrische Energie	Büro	21.207	21.586	21.676	21.767	22.097	890	181	4,20	0,84
Lüftung	Betriebsoptimierung	Elektrische Energie	Büro	37.351	37.628	37.713	37.794	38.060	709	166	1,90	0,44
Lüftung	Betriebsoptimierung	Gas	Büro	17.771	18.034	18.110	18.179	18.457	685	145	3,86	0,81
Lüftung	Betriebsoptimierung	Elektrische Energie	Büro	137.073	137.324	137.394	137.464	137.714	641	139	0,47	0,10
Lüftung	Energierückgewinnung (ERG)	Erdöl	Büro	63.227	63.652	63.787	63.911	64.301	1.074	258	1,70	0,41
Lüftung	Betriebsoptimierung	Elektrische Energie	Einkaufszentrum	179.888	180.452	180.583	180.719	181.227	1.338	268	0,74	0,15
Lüftung	Betriebsoptimierung	Gas	Einkaufszentrum	207.304	209.277	209.786	210.266	212.442	5.138	989	2,48	0,47
Lüftung	Betriebsoptimierung, Ventilatoren, WRG	Elektrische Energie	Hotel	1.722.381	1.722.852	1.723.001	1.723.141	1.723.656	1.275	289	0,07	0,02
Lüftung	Betriebsoptimierung, Ventilatoren, ERG	Gas	Hotel	2.143.987	2.146.327	2.146.974	2.147.607	2.149.924	5.937	1.280	0,28	0,06
Lüftung	Free Cooling Einsatz	Elektrische Energie	Verkaufsfiliale	-56	118	177	235	572	627	117	1.129,08	98,76
Kältemaschine	Free Cooling Einsatz	Elektrische Energie	Krankenhaus	59.296	69.106	72.491	75.891	89.489	30.193	6.785	50,92	9,82
Pumpe	Regelungsoptimierung	Elektrische Energie	Hotel	4.297	4.346	4.361	4.375	4.432	135	28	3,14	0,65
Pumpe	Pumpentausch	Elektrische Energie	Büro	369	378	380	383	393	24	5	6,60	1,35
SUMME				**4.683.764**	**4.703.243**	**4.709.330**	**4.715.378**	**4.739.592**	55.829	12.135	1,19	0,26

Tabelle 23 zeigt, dass die relativen Unsicherheiten der Einspareffekte und damit die aufgetretene Breite der Verteilungen bezogen auf die Interquartilsdistanz in der Regel gering ausfallen. Einzig die Bewertung des verstärkten Betriebs der Lüftungsanlage der Verkaufsfiliale zum Zwecke von Free-Cooling weist eine erhebliche Unsicherheit auf. Bezogen auf den Extremwertabstand steigt die Unsicherheit der Berechnungsergebnisse ungefähr um das Fünffache an, für die Verkaufsfiliale allerdings auch deutlich stärker.

Es hat sich somit für die Beispielanwendungen gezeigt, dass trotz unterschiedlicher Detailliertheit der Datenbasis und Berücksichtigung der unsicheren Einflussgrößen keine überaus großen Schwankungsbreiten aufgetreten sind. Für das Beispiel des Geschäftslokals waren allerdings wichtige Einflussgrößen für die Effektivität der Maßnahme nicht näher bekannt, wie etwa der nötige Luftwechsel pro Stunde zur Erreichung eines angemessenen Kühleffekts, sodass diese eher großzügig dimensioniert wurden. Dadurch konnte jedoch eine Stärke der vorgestellten Methode erkannt werden, nämlich jene, dass selbst bei geringem Detailwissen über die aktuelle Situation nach Definition eines geeigneten Simulationsmodells eine Bewertung durchgeführt werden kann. Zu den einzelnen Einflussgrößen müssen zunächst realistische Annahmen zu deren Verteilungen getroffen werden, sodass folglich eine erste Maßnahmensimulation erfolgen kann. Hat diese, wie in besagtem Beispiel, eine relativ breite Schwankungsbreite des Ergebnisses erbracht, so können die Modellannahmen sukzessive verbessert werden. Dafür ist es sinnvoll, jene Einflussgrößen, welche die größten Unsicherheiten aufweisen, näher zu bestimmen. Im vorliegenden Beispiel wären dies der notwendige Luftwechsel, der Einfluss der inneren Lasten und der Startzeitpunkt der Kälteanlage nach erfolgtem Free-Cooling-Einsatz. Die Genauigkeit der Maßnahmenbewertung richtet sich allerdings an die gestellten Anforderungen. Sofern den Gebäudebetreibern bereits qualitative Aussagen, wie jene in diesem Fall, dass der Free-Cooling-Einsatz grundsätzlich zu einer Energieeinsparung führen sollte, ausreichen, kann die Modellverfeinerung auch ausbleiben.

Treten besonders breite Verteilungen von Modelleinflussgrößen im Rahmen einer Monte-Carlo-Simulation auf, so kann dies zum einen bedeuten, dass die getroffenen Annahmen mit großer Unsicherheit behaftet sind, zum anderen aber auch implizieren, dass diese Einflussgrößen über Erfolg oder Scheitern einer Effizienzmaßnahme bestimmen. Dies kann beispielsweise der Fall sein, wenn das Nutzerverhalten und damit die Betriebsdauer einer Anlage nur grob eingeschätzt werden kann, zum Erreichen einer kurzen Amortisationszeit aber eine möglichst geringe Betriebszeit der neuen Anlage erforderlich ist. Damit liegt ein weiterer Vorteil der vorgestellten Bewertungsmethode darin, dass die erfolgsentscheidenden Einflussgrößen der betrachteten Energieeffizienzmaßnahme gegenüber weniger gewichtigen Einflussgrößen herausgefiltert werden können. Hat etwa das Nutzerverhalten den größten Einfluss, so kann diese Aussage zur Bewusstseinsbildung der Gebäudenutzer verwendet werden und dazu beitragen, diese aktiv in den Prozess der Energieeffizienzsteigerung einzubinden. Durch die Zuordnung von statistischen Verteilungen an jene Einflussgrößen im Bewertungsmodell, welche durch Eingreifen der Gebäudenutzer beeinflusst

werden können, kann darüber hinaus erreicht werden, dass ein möglicherweise auftretender Rebound-Effekt in der Maßnahmenbewertung berücksichtigt wird. Dies ist für den konkreten Anwendungsfall wesentlich aussagekräftiger, als Abschläge des Einspareffekts basierend auf Literaturwerten zu verwenden, welche auf die jeweiligen Gebäudenutzer nicht zwangsweise zutreffend sein müssen.

Die Ziehung des Temperaturprofils aus Verteilungen basierend auf 25-jährigen Messperioden hat in den betrachteten Beispielen zu keinen allzu großen Schwankungsbreiten des Einspareffekts geführt. Dies liegt allerdings vermutlich an den betrachteten Beispielkonstellationen, wie beispielsweise Lüftungsanlagen mit effektiven Energierückgewinnungssystemen hoher Rückwärmezahlen, und kann nicht als allgemeine Erkenntnis gelten. Es ist daher für zukünftige Anwendungen der Methode ratsam, Temperaturverteilungen aus möglichst umfassenden Datensätzen zu konstruieren und diese für die Monte-Carlo-Simulation zu verwenden. Hierbei stellt sich vermutlich in vielen Anwendungsfällen allerdings die Frage, ob entsprechende reale und detaillierte Temperaturwerte zur Verfügung stehen. Eine Datenfreigabe für langfristige Messwerte der ZAMG ist wohl nur für Forschungszwecke zu erwarten. Eine Erweiterung der Freigabebestimmungen bestehender Datensätze für sämtliche Energieeffizienzanalysen wäre wünschenswert, würde aber vermutlich eine Kommunikation eines tatsächlich erwartbaren, deutlichen Mehrwerts für die Aussagekraft der Analyseergebnisse erfordern. Folglich wird empfohlen, für zukünftige Anwendungsfälle der Methode geeignete, frei-verfügbare Temperaturprofile zu verwenden oder zu konstruieren, welche dem Gebäudestandort angemessen sind.

Die durchgeführten Analysen nach externen Einflussgrößen, wie der Globalstrahlung vor Ort, sind von derselben Problematik betroffen. Hierbei hat sich für die wenigen Anwendungsfälle allerdings gezeigt, dass das Nutzerverhalten den Einfluss äußerer Parameter deutlich überlagert hat. Die Normalisierung von Baseline-Verbrauchsdaten ist allerdings insbesondere für die Vergleichbarkeit unterschiedlicher Datensätze interessant. Für die Bewertung des Einspareffekts einer bestimmten Energieeffizienzmaßnahme kann auch eine Simulation des Baseline-Verbrauchs erfolgen, wobei die gemessenen Verbrauchsdaten zur qualitativen Überprüfung des Modells verwendet werden können. Letztlich ist die realistische, aussagekräftige Quantifizierung des Einspareffekts einer Maßnahme von Interesse und im Fokus der Analyse.

Die Normalisierungen von Verbrauchsdaten bei geringer Datenlage, wie in Abschnitt 3.2.1 gezeigt, kann mit relativ geringem Aufwand mittels Monte-Carlo-Simulation erfolgen. Bezieht man sich hierbei auf realistische Annahmen, so ist beispielsweise die Interquartilsdistanz der resultierenden Verteilung eine aussagekräftige Schwankungsbreite für den in Zukunft zu erwartenden Baseline-Verbrauch und besser geeignet als die Annahme einer willkürlich gewählten, relativen Unsicherheit der definierten Baseline.

In den Anwendungsbeispielen wird ersichtlich, wie groß der Einfluss der Baseline-Definition auf den Einspareffekt einer bewerteten Energieeffizienzmaßnahme ist. Optimiert man beispielsweise in

einem ersten Umsetzungsschritt eines Maßnahmenbündels nur die Anlagenbetriebsweise und ersetzt erst zu einem späteren Zeitpunkt ineffiziente Ventilatoren, so ist die Baseline-Definition für die Berechnung der Amortisationszeit getroffener Investitionen von entscheidender Bedeutung. Hierbei ist auch die Verdeutlichung, dass es sich bei der prognostizierten Baseline-Entwicklung letztlich um eine fiktive Bezugsgröße handelt, entscheidend.

Die vorgestellte Bewertungsmethode kann grundsätzlich auf beliebige Effizienzmaßnahmen angewendet werden. Die Anwendungsgrenze der Methode ist durch die Komplexität der betrachteten Situation und die Verfügbarkeit von Simulationsmodellen, welche trotz notwendiger Vereinfachungen zu aussagekräftigen Ergebnissen kommen, gegeben. Eine Limitierung der Anwendbarkeit ist jedoch in gewissem Ausmaß immer durch die vorhandene Datengrundlage und das Interesse der jeweiligen Gebäudebetreiber am Thema Energieeffizienz gegeben. Eine aussagekräftige „Energiebuchhaltung“ wäre in vielen Fällen mit geringem Aufwand umsetzbar, indem beispielsweise eine wöchentliche oder monatliche Ablesung der Energiezähler erfolgt. Für Energieanalysen wäre die Ausgangsbasis zur Maßnahmenbewertung dadurch allerdings oftmals wesentlich günstiger, als dies für wenige Jahresenergieverbräuche der Fall ist.

Die Methodenanwendung hat gezeigt, dass die Berücksichtigung des möglichen Wertebereichs unsicherer Einflussgrößen auch dazu dienen kann, unbekannten Modellvariablen geschätzte Werte zuordnen zu können, um auch bei geringer Datendichte brauchbare Aussagen ableiten zu können. Für die beiden betrachteten Beispiele für das Gewerk Beleuchtung, konnten auf Basis der Einschätzungen der Gebäudebetreiber die gemessenen Baseline-Verbräuche relativ genau abgebildet werden. Für die Auswahl möglicher Verteilungen verschiedener Modelleinflussgrößen ist allerdings eine gute Kenntnis des Gebäudeverhaltens und der jeweiligen Nutzer notwendig. Daher ist man hierbei vom Interesse der Gebäudebetreiber abhängig, Daten- und Wissenslücken durch geeignete Annahmen auszugleichen. Ist seitens der Betreiber allerdings nur geringes Interesse für den Themenbereich Energieeffizienz erkennbar, so stößt die Methode ebenso an ihre Anwendungsgrenze bzw. wären aussagekräftige Ergebnisse nur mit einem sehr hohen Aufwand zu erreichen, welchem kein entsprechender Nutzen gegenübersteht.

Die genauere Untersuchung der Anwendungsgrenze der vorgestellten Bewertung erfordert die Verwendung weiterer Simulationsmodelle. Letztlich ist allerdings zu vermuten, dass diese dort erreicht sein wird, wo die Genauigkeit des berechneten Einspareffekts einer Maßnahme nicht mehr den gestellten Anforderungen entspricht. In diesem Zusammenhang sieht man sich jedoch auch mit der grundsätzlichen Frage konfrontiert, ob der Einspareffekt jeder Energieeffizienzmaßnahme überhaupt analytisch berechenbar ist, oder ob zuverlässige, repräsentative Abschätzungen der erzielbaren Einsparungen dem eigentlichen Zweck gerechter werden.

4.2 Ergebnisse der Befragung gelisteter Energieauditoren

Zur Einschätzung der aktuell gängigen Bewertungsmethoden für Energieeffizienzmaßnahmen erging ein Online-Fragebogen an all jene gelisteten Energieauditoren, welche von der „Monitoringstelle Energieeffizienz“ für Energieaudits gemäß dem Bundes-Energieeffizienzgesetz zertifiziert sind. Nachdem dieses Register regelmäßig erweitert wird, erging der Fragebogen an all jene Auditoren, welche mit Anfang Juni 2016 bereits registriert waren. An der Umfrage nahmen letztlich 131 Energieexperten teil.

Abbildung 69 zeigt, aus welchen Bereichen die Energieauditoren besonders häufig Maßnahmen bewertet haben. Diese konnten im Rahmen der Befragung sowohl aus vorgeschlagenen Gewerken auswählen, als auch weitere hinzufügen und diese unterschiedlich stark gewichten. Ein Ergebnis von 100 % für einen Maßnahmenbereich würde bedeuten, dass dieser von allen Umfrageteilnehmern maximal gewichtet worden ist. Dies gilt für alle dargestellten Umfrageergebnisse gleichermaßen.

Weitere, nicht dargestellte Gewerke erreichten eine relativ geringe Gewichtung und wurden daher aus Gründen der Übersichtlichkeit in der Darstellung ausgeklammert. Es zeigt sich, dass für die Bereiche, in welche die Beispielmaßnahmen der Arbeit eigenordnet werden können, auch von den gelisteten Energieauditoren sehr häufig Maßnahmen bewerten worden sind.

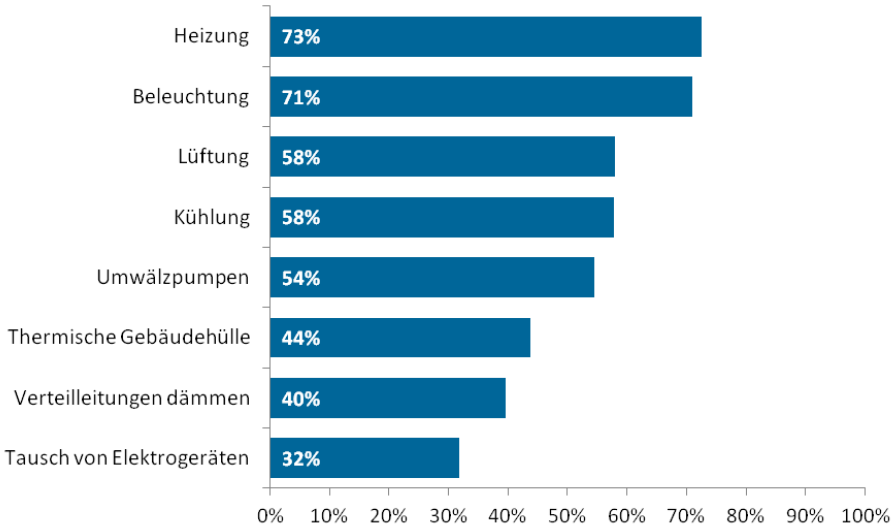

Abbildung 69: Bereiche, aus welchen Maßnahmen bewertet wurden

Die entsprechenden Maßnahmenbewertungen der Auditoren stützen sich dabei auf die in Abbildung 70 dargestellten Grundlagen. Meistens kam für die einzelnen Maßnahmen ein individuelles Berechnungsmodell zum Einsatz, die Anlage 1 der „Energieeffizienz-Richtlinie“, auch als „Methodendokument“ bezeichnet, folgt hinter der Bewertung basierend auf Erfahrungswerten und Literaturwerten als viertwichtigste Bewertungsgrundlage.

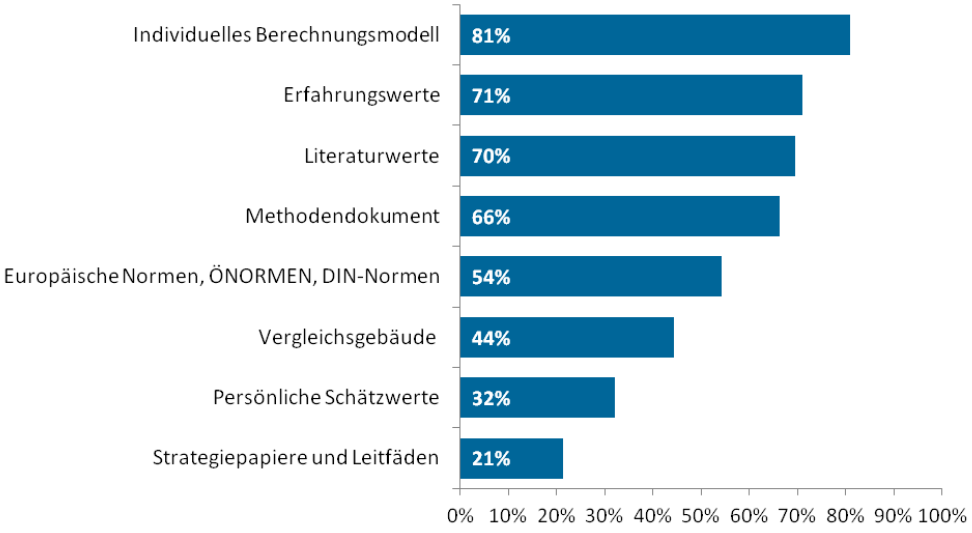

Abbildung 70: Basis der Maßnahmenbewertung

Abbildung 71 zeigt die Gewichtung der externen Einflussgrößen, welche von den Energieauditoren zur Normalisierung der Baseline berücksichtigt worden sind. Die Beachtung der jeweiligen Außentemperatur liegt hier deutlich vor den übrigen Parametern, wobei die Normalisierung der verfügbaren Verbrauchsdaten in der Regel über die Gradtageszahl erfolgte. Unter dem Bereich „Sonstige Größen“ sind insbesondere gebäudespezifische Einflussgrößen, wie etwa die Auftragslage eines Industrie- oder Gewerbebetriebs, zusammengefasst. Die Aussage, dass für Maßnahmenbewertungen nur die Verbrauchsdaten eines Jahres berücksichtigt werden und daher keinerlei Normalisierung erfolgen würde, erhielt eine Gewichtung von 28 %.

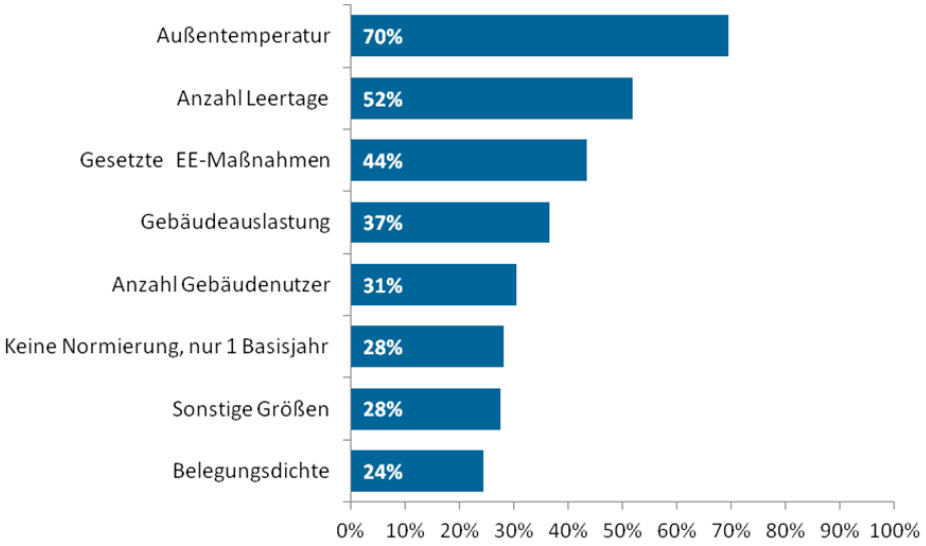

Abbildung 71: Größen, welche für Normalisierungen berücksichtigt werden

Zudem wurde aus individuellen Kommentaren deutlich, dass bezüglich der Bedeutung und der Begrifflichkeit von Datennormalisierungen und externen Einflussparametern teils sehr divergente

Auffassungen unter den Energieauditoren vertreten sind. Hier reichte das Spektrum von Anmerkungen und Argumenten, warum Normalisierungen grundsätzlich nicht möglich und erforderlich seien, bis zu Aussagen, dass Bewertungen auf Basis der Kennzahlen in Energieausweisen erfolgen würden und daher grundsätzlich keine externen Einflussgrößen auftreten könnten.

Hinsichtlich der Schwierigkeiten, welche im Rahmen des Bewertungsprozesses auftreten, herrschte ein einheitliches Bild der Rückmeldungen. Aus Abbildung 72 wird deutlich, dass hierbei insbesondere mangelnde Datenqualität oder zu geringes Wissen der Gebäudebetreiber über die eigenen Anlagen die Ursachen der größten Probleme der Energieauditoren im Bewertungsprozess von Energieeffizienzmaßnahmen darstellen. Ebenso sind der gesteigerte Aufwand für möglichst realistische Modellrechnungen und die Komplexität vorhandener technischer Wechselwirkungen von den Auditoren als weitere Schwierigkeiten besonders stark gewichtet worden.

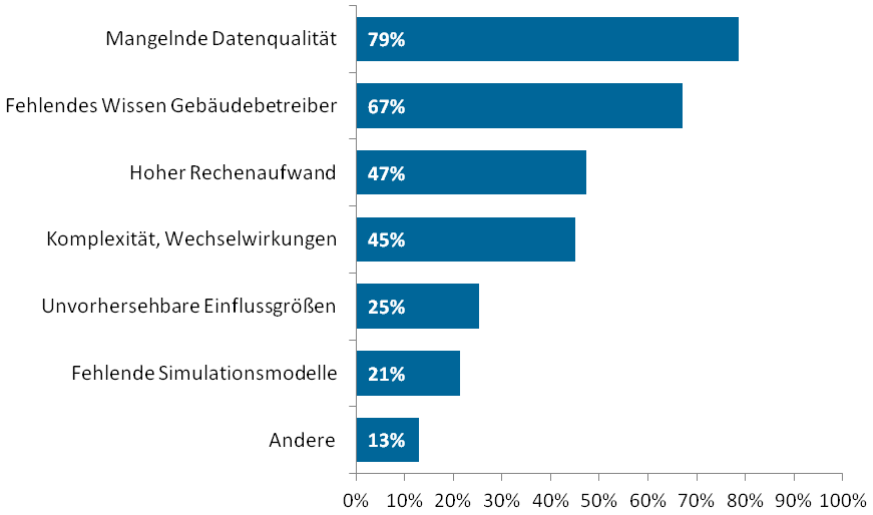

Abbildung 72: Herausforderungen bei der Maßnahmenbewertung

Abbildung 73 zeigt eine Auflistung der Einflussgrößen für die Entscheidung der Verantwortlichen, nach erfolgter Maßnahmenbewertung die vorgeschlagene Energieeffizienzmaßnahme auch tatsächlich umzusetzen. Hierbei fiel die Gewichtung eindeutig auf die Wirtschaftlichkeit der Maßnahme, so wie auf einen möglichst geringen Umsetzungsaufwand für die Gebäudenutzer. Dies umfasst auch eine möglichst geringe Beeinträchtigung der eigentlichen Gebäudenutzung. In Zusammenhang mit der Wirtschaftlichkeit der Maßnahme wurde oftmals auch die Problematik angeführt, dass bei Mietobjekten nur selten sofort klar ist, ob für die auftretenden Kosten der Vermieter oder der Eigentümer einer Liegenschaft aufkommen muss. Sofern ohnehin Investitionen in einem von der Maßnahme betroffenen Bereich notwendig sind, werde die Umsetzung einer Maßnahme laut Aussagen der Auditoren dadurch deutlich begünstigt.

Mit 66 % durchschnittlicher Gewichtung folgt die Eigenmotivation und das Interesse der Gebäudenutzer und Verantwortlichen für das Thema Energieeffizienz als Einflussfaktor auf die

tatsächliche Umsetzung vorgeschlagener Effizienzsteigerungsmöglichkeiten. Aspekte zur Transparenz und Nachvollziehbarkeit der Bewertungsmethode wurden insgesamt in vier verschiedenen Kategorien genannt und von den Auditoren ebenso mit mehr als 50 % Gewichtung bedacht. Auch die „Sichtbarkeit“ einer Maßnahme sei des Öfteren ein bedeutendes Entscheidungskriterium für die Umsetzbarkeit, allerdings nur dann, wenn diese auch entsprechend „imagefördernd“ kommuniziert werden könne. Das Bundes-Energieeffizienzgesetz hatte für die tatsächliche Umsetzung von Maßnahmen laut Einschätzung der Auditoren einen sehr geringen Einfluss, nachdem die Gewichtung hierbei nur bei 15 % gelegen ist.

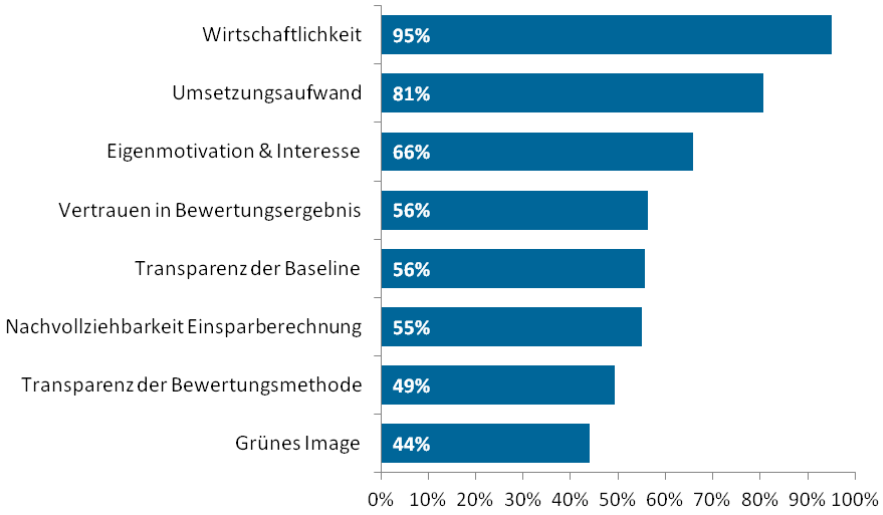

Abbildung 73: Einflussgrößen auf tatsächliche Maßnahmenumsetzung

Aus den Rückmeldungen der Energieauditoren ergeben sich teils deckungsgleiche Schlussfolgerungen zu jenen als Folge der Anwendungsbeispiele dieser Arbeit. Es zeigte sich, dass durch das Interesse der Gebäudeverantwortlichen selbst bei geringer Datendichte sehr hilfreiche Bewertungsergebnisse mit Hilfe der vorgestellten Methode erzielt werden konnten. Mangelnde Datenqualität und fehlendes Wissens seitens der Gebäudebetreiber waren auch die größten Schwierigkeiten der Energieauditoren im Bewertungsprozess. Sofern es gelingt, die Gebäudenutzer zur Mitwirkung im Prozess der Maßnahmenauswahl und Umsetzungsentscheidung zu motivieren, könnte mit Hilfe der vorgestellten Methode selbst bei geringer Datenlage und einem niedrigen Wissensstand der Gebäudebetreiber zu den Anlagen erreicht werden, dass mit vertretbarem Rechenaufwand das Themenfeld der Energieeffizienz für die Beteiligten an Bedeutung gewinnt und dessen Vorteile erkannt werden. Werden hingegen vor allem Literatur- oder Default-Werte zur Bewertung herangezogen, so kann die geforderte Transparenz der Bewertungsmethode wohl kaum erreicht werden und auch nicht das nötige Vertrauen in den Akteuren bewirken, welche die Entscheidung für oder gegen eine mögliche Umsetzung treffen. Folglich könnte die vorgestellte Methode basierend auf den Angaben der Auditoren dazu beitragen, die aufgetretenen Probleme zu entschärfen und als Werkzeug dienen, den

Maßnahmenbewertungsvorgang mit vertretbarem Aufwand zu einem interaktiven Prozess unter Einbindung der Gebäudeverantwortlichen werden zu lassen.

4.3 Ergebnisse des Methodenvergleichs

Im Rahmen der Arbeit wurden für die Anwendungsbeispiele, zu welchen auch eine Bewertungsmethode in der Anlage 1 der „Energieeffizienz-Richtlinienverordnung“ angegeben war, die entsprechenden Ergebnisse für die Einspareffekte verglichen. Es soll insbesondere anhand dieser Ergebnisse ein Vergleich der beiden Bewertungsmethoden erfolgen, jedoch keine allumfassende Diskussion der Methodik der Richtlinienverordnung, welche zu weit führen würde.

Mit der Verabschiedung des Bundes-Energieeffizienzgesetzes durch den österreichischen Gesetzgeber war die Notwendigkeit gegeben, die Erreichung der darin festgehaltenen konkreten Zielsetzungen zur Steigerung der Energieeffizienz geeignet zu überprüfen. Darüber hinaus mussten im Rahmen von gesetzeskonformen Energieaudits den betroffenen Unternehmen mögliche Maßnahmen zur Energieeffizienzsteigerung vorgeschlagen werden, deren Einspareffekt ebenso berechnet werden sollte. Vor diesem Hintergrund war eine Bewertungsmethode für die Prognose des Einspareffekts von noch nicht gesetzten Maßnahmen und den Nachweis der erzielten Einsparung von umgesetzten Effizienzmaßnahmen gefragt. Diesen Anforderungen sollten die Beispielmaßnahmen samt ihren Nachweismethoden in der Anlage 1 der „Energieeffizienz-Richtlinienverordnung“ genügen. Nachdem diese grundsätzlich für sämtliche nationale Energieeffizienzanalysen anwendbar sein und von den einzelnen Auditoren mit vertretbarem Aufwand genutzt werden sollten, sollte die Erwartung der Genauigkeit der Bewertungsergebnisse gemäß der Methodik der Richtlinienverordnung aus praktischen Gründen nicht zu hoch ausfallen.

Tabelle 24 zeigt die Abweichung der Mittelwerte der Verteilungen der Energieeinsparungen, welche nach der Methode dieser Arbeit ermittelt worden sind, gegenüber den Einzahlergebniswerten nach der Bewertungsmethode der „Energieeffizienz-Richtlinienverordnung“. Es zeigt sich, dass für die Maßnahme „Leuchtmitteltausch“ geringere Einspareffekte, für den Umwälzpumpentausch allerdings ein höherer Einspareffekt bei Anwendung der Methodik der Richtlinienverordnung auftreten.

Tabelle 24: Vergleich der Bewertungsmethoden

Gewerk	Maßnahme	Abweichung Bewertungsergebnisse [%]
Beleuchtung	Leuchtmitteltausch	-18,9 %
Beleuchtung	Leuchtmitteltausch	-26,9 %
Beleuchtung	Leuchtmitteltausch	-51,8 %
Pumpe	Tausch der Umwälzpumpe	+81,6 %

Für die Beispielbewertungen nach Anlage 1 der Richtlinienverordnung wurden die entsprechend vorgegebenen Default-Werte zur Bewertung verwendet. Für das Beispiel „Umwälzpumpentausch“ ist der Bewertungsaufwand damit äußerst gering, nachdem nur die Leistung der alten und der neuen Pumpe in die vorgegebene Berechnungsformel einzusetzen sind. Hierbei wird allerdings für das alte System angenommen, dass die Pumpe bei konstanter Leistung für 5 000 Stunden eines Jahres in Betrieb ist, während die Leistung der neuen Pumpe mit einem Korrekturfaktor nach dem Lastprofil „Blauer Engel“ gewichtet wird. Diese Annahme wäre grundsätzlich nur dann gerechtfertigt, wenn die ersetzte Pumpe keine Regelung des Volumenstroms aufweist.

Erfolgen für den Nachweis des erreichten Einspareffekts von Energieeffizienzmaßnahmen projektspezifische Nachweismethoden bzw. Annahmen, so sind diese grundsätzlich zu rechtfertigen und zu belegen (vgl. beispielsweise [43], S.64). Hat ein Unternehmen eine gewisse Einsparverpflichtung zu erfüllen und würde die Bewertung mittels Default-Werten der Anlage 1 der Richtlinienverordnung zu, für den Verpflichteten, günstigen, höheren als real eintretenden Einspareffekten führen, so wäre deren Verwendung dennoch gesetzeskonform.

Letztlich kann als Erkenntnis des Methodenvergleichs festgehalten werden, dass die Bewertung von Maßnahmen, welche in der Anlage 1 der Richtlinienverordnung enthalten sind, nach der dort vorgestellten Methode grundsätzlich mit geringerem Aufwand verbunden ist, als dies bei der im Rahmen der Arbeit definierten Methode der Fall ist. Hat ein Gebäudebetreiber nur den Anspruch, einen gesetzeskonformen Nachweis zu erbringen, dass eine Energieeffizienzmaßnahme umgesetzt worden ist, und spielt die Genauigkeit des Berechnungsergebnisses keine wesentliche Rolle, so ist die Bewertung mittels Default-Werten rasch durchzuführen.

An die Bewertungsmethode, welche im Rahmen der Arbeit vorgestellt worden ist, werden allerdings gänzlich andere Anforderungen gestellt. Mit deren Hilfe ist es im Rahmen einer Energieanalyse grundsätzlich möglich, gemeinsam mit den Gebäudeverantwortlichen verschiedene Maßnahmenvarianten zu bewerten und zu vergleichen. Die Genauigkeit des Bewertungsergebnisses und auch dessen Schwankungsbreite spielt in der Umsetzungsentscheidung in der Regel eine wichtige Rolle, nachdem darauf die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung basiert. Das Verwenden von Default-Werten ist daher für den konkreten Anwendungsfall uninteressant und nicht sinnvoll. Ebenso ist der Verzicht auf eine saubere und repräsentative Baseline-Definition nicht zweckmäßig. Durch die Vereinfachung und Verallgemeinerung der Bewertungsmethode der Richtlinienverordnung ergeben sich zwangsweise Einbußen in der Genauigkeit, welche in Abhängigkeit der gestellten Anforderungen die Verwendung einer alternativen Bewertungsmethode für Energieeffizienzmaßnahmen erfordert.

5 Diskussion

Im vorherigen Abschnitt wurde die Anwendbarkeit der erarbeiteten Methode zur Bewertung von Energieeffizienzmaßnahmen im Gebäudesektor diskutiert und anhand der Beispielergebnisse demonstriert. Es hat sich gezeigt, dass durch die Unterscheidung in unsichere und wohl bekannte Einflussparameter in den Simulationsmodellen keine Einschränkung der Anwendbarkeit der Methode in praktischen Anwendungsfällen zu erwarten ist. Viel mehr erhält man dadurch die Möglichkeit, unbekannte Einflussgrößen zu schätzen und diesen eine gewisse Wahrscheinlichkeitsverteilung zuzuordnen – im einfachsten Fall beispielsweise eine Gleichverteilung, welche ein Intervall angibt, welches den unbekannten Einflussparameter definiert. Daher müssen bestimmte Modellgrößen nicht exakt bekannt sein oder erhoben werden. Nach Durchführung der Monte-Carlo-Simulation erhält man eine Verteilung des Energieeinspareffekts, welche beispielsweise über eine Boxplotdarstellung anschaulich die Unsicherheit des Berechnungsergebnisses angibt. Die Schwankungsbreite des Simulationsergebnisses kann also zum einen aufgrund von unsicheren Modellannahmen für unbekannte Parameter resultieren, zum anderen aber auch auf statistisch verteilte Einflussgrößen zurückzuführen sein.

Sollte eine große Schwankungsbreite des mittleren Einspareffekts insbesondere aufgrund von unsicheren Schätzungen für Einflussparameter eintreten, so können jene Annahmen, welche die Schwankungsbreite besonders bestimmen, genauer erhoben werden. Dadurch kann der Aufwand zur Datenerhebung für die Maßnahmenbewertung mitunter reduziert werden. Ebenso kann dadurch das Simulationsmodell möglicherweise vereinfacht werden, wenn beispielsweise der erforderliche Luftwechsel einer Lüftungsanlage aus einer realistischen statistischen Verteilung gezogen und nicht mit Hilfe eines Gebäudesimulationsmodells ermittelt wird.

Ebenso bringt die Einteilung in statistische und feste Modellparameter mit sich, dass die Bewertung jene Einflussgrößen, welche für einen möglichst hohen Einspareffekt der Maßnahme ausschlaggebend sind, erkennen lässt. Ein möglicherweise auftretender Rebound-Effekt kann ebenso bei all jenen Einflussparametern, welche die Gebäudenutzer beeinflussen, berücksichtigt werden. Weiters wird im Bewertungsprozess auch deutlich, ob der Erfolg einer Effizienzmaßnahme vom Engagement der Gebäudenutzer abhängig ist, was beispielsweise bei manueller Anlagenregelung der Fall sein kann. Dies kann möglicherweise als Argument dazu dienen, dass die Nutzer zur Mitwirkung motiviert werden und ein erhöhtes Bewusstsein für das Themenfeld Energieeffizienz erreichen.

Die Anwendungsbeispiele umfassten jeweils nur eine Effizienzmaßnahme für jedes Gebäude. Eine Stärke der vorgestellten Bewertungsmethode unter Berücksichtigung der Schwankungsbreite des Einspareffekts dürfte aber auch darin liegen, dass mehrere Maßnahmen miteinander hinsichtlich ihrer Effektivität vergleichbar sind. Man kann sich beispielsweise im Fall eines beschränkten

Investitionsbudgets dazu entscheiden, zunächst jene bewertete Maßnahme umzusetzen, deren Ergebnis die geringste Schwankungsbreite aufweist. Die prognostizierten, eingesparten Energiekosten können aus ökonomischer Hinsicht zur Erstellung eines Investitionsplans zur schrittweisen Umsetzung von Energieeffizienzmaßnahmen interessant sein. Die Angabe der Schwankungsbreite des Energieeinspareffekts bzw. die daraus resultierende Unsicherheit der eingesparten Energiekosten ist insbesondere bei langfristigen Investitionen interessant, wobei die vorgestellte Methode auf die ökonomische Betrachtung von Energieeffizienzmaßnahmen übertragen werden kann, indem auch für diese unsichere Einflussgrößen, wie etwa die Energiepreisentwicklung, statistische Verteilungen verwendet werden. Die ausgeführte Bedeutung der Baseline-Definition ist auch vom Standpunkt der wirtschaftlichen Betrachtung von Energieeffizienzmaßnahmen über deren Lebensdauer wichtig und von entscheidender Bedeutung für die Amortisationszeit einer Maßnahme.

Es konnte gezeigt werden, dass die Anwendungsgrenze der Methode nicht durch grundsätzliche methodische Einflussgrößen bestimmt ist, sondern insbesondere durch die Verfügbarkeit geeigneter Simulationsmodelle für die betrachtete Maßnahme definiert wird. Mangelnde Datenqualität und geringes Wissen zu den betrachteten Anlagen – die Hauptschwierigkeiten der befragten Energieauditoren – können bei entsprechender Mit Hilfe der Gebäudebetreiber durch geeignete Wahl statistischer Verteilungen für die unbekannten Modellparameter ausgeglichen werden. Die Einschätzungen können dabei, wie in den Beispielanwendungen, mit den Gebäudebetreibern abgestimmt werden, sodass diese auch aktiv in den Maßnahmenbewertungsprozess eingebunden sind und dieser für sie damit entsprechend transparent verläuft.

Zur weiteren Untersuchung der methodischen Anwendungsgrenze wäre die erweiterte Anwendung der Methode auf andere Beispielmaßnahmen und Simulationsmodelle interessant. Komplexe, umfangreiche Energieeffizienzmaßnahmen mit unvorhersehbaren technischen Wechselwirkungen, deren Einspareffekt nicht analytisch bestimmbar ist, stellen allerdings vermutlich für sämtliche Bewertungsmethoden die Anwendungsgrenze dar. Andererseits kann die Anwendungsgrenze auch dann erreicht sein, wenn die verwendeten Rechenmodelle Ergebnisse liefern, welche eine zu große Abweichung zu den tatsächlich auftretenden Energieeinsparungen aufweisen. Ein häufig diskutiertes Anwendungsbeispiel stellt hierbei der Heizenergiebedarf aus der Berechnung des Energieausweises von Gebäuden dar, welcher teils erhebliche Abweichungen zu den tatsächlich gemessenen Energieverbräuchen zur Wohnraumheizung aufweist (siehe etwa [51], [52], [53]).

Die grundsätzliche Motivation für die Anwendung von Bewertungsmethoden für Energieeffizienzmaßnahmen liegt allerdings in der Regel ohnehin nicht in der exakten Prognose der zu erwartenden Energieeinsparung, sondern vielmehr in der Abschätzung, welche Maßnahmen zur Erhöhung der Energieeffizienz getroffen werden können. Führt eine Energieeffizienzmaßnahme unter gewissen Bedingungen erfahrungsgemäß zu sehr hohen Einsparungen, ist im konkreten Anwendungsfall die entsprechende Experteneinschätzung für die Gebäudebetreiber bereits eine ausreichende Entscheidungsgrundlage, die Maßnahme umzusetzen. Sind Investitionen erforderlich,

so sollte die zu erwartende Einsparung allerdings zumindest soweit bekannt sein, um abschätzen zu können, ob die geforderte Wirtschaftlichkeit der Maßnahmenumsetzung erreicht werden kann. Eine Bewertungsmethode ist letztlich eine Auswahlhilfe, um Gebäudebetreibern aufzeigen zu können, welche Energieeffizienzsteigerungspotentiale vorhanden sind und welche Energieeffizienzmaßnahmen diese erschließen können. Die Ergebnisse der Bewertung sollten soweit transparent und nachvollziehbar sein, dass den Gebäudebetreibern der Mehrwert jener Maßnahmen, welche ihren gestellten Anforderungen und Rahmenbedingungen genügen, bewusst wird.

Für den gesetzeskonformen Nachweis von erreichten Energieeffizienzsteigerungen ist der Anspruch an die Genauigkeit der Nachweismethode jedoch differenzierter zu sehen. Nachdem eine Messung von „nicht verbrauchter Energie“ in verschiedenen Verbrauchssektoren grundsätzlich nicht möglich ist, ist man zwangsweise auf fiktive Vergleichsrechnungen zur Bewertung umgesetzter Maßnahmen angewiesen. Die Europäische Union hat ihr Energieeffizienzziel beispielsweise auf eine Trendentwicklung bezogen, deren Prognosewert für das Jahr 2020 um mindestens 20 % unterschritten werden soll. Damit geht eine Deckelung des Primärenergieverbrauchs für das Jahr 2020 mit 1 474 Millionen Tonnen Rohöleinheiten einher, nachdem dieser Wert nicht überschritten werden soll (vgl. [1], S.1). Derartige politische und vor dem Hintergrund der notwendigen Eindämmung des Klimawandels erforderliche Zielsetzungen verlangen damit zwangsweise Mechanismen, welche eine Beurteilung ermöglichen, ob diese Ziele auch erreicht worden sind.

Das letztliche Ziel ist es, gemäß dem Abkommen von Paris, den Treibhausgasausstoß der Menschheit in den nächsten Jahrzehnten gegen null gehen zu lassen. Bewertungsmethoden für den zu erwartenden Einspareffekt von Energieeffizienzmaßnahmen bzw. Nachweismethoden für den Effekt von umgesetzten Maßnahmen können hierbei eine unterstützende Rolle einnehmen, um diese Herausforderung bewältigen zu können. Das gutachterlich nachgewiesene Erreichen der gesetzlich festgelegten Energieeffizienzsteigerung bzw. der Menge an eingesparter Energie gegenüber fiktiven Bezugsszenarien ist allerdings grundsätzlich irrelevant, wenn damit keine Trendumkehr in den nationalen Primärenergieverbrauchs- und Treibhausgasausstoßentwicklungen korreliert. Durch steigende Energieeffizienz und sorgsamen Ressourcenumgang sollte auch der Ausbau nachhaltiger Energieträger dazu führen, dass deren relativer Anteil an der Energieversorgung auch tatsächlich merklich wächst.

Der Anspruch an eine Bewertungsmethode zur Prognose von erwartbaren Energieeinsparungen muss also sein, dass jene Maßnahmen transparent und für nicht-fachkundige Gebäudebetreiber nachvollziehbar eruiert werden können, deren Umsetzung tatsächlich einen finanziellen und umweltpolitischen Mehrwert liefern können. Der Anspruch an eine Nachweismethode des erwartbaren Energieeinspareffekts umgesetzter Maßnahmen sollte sein, dass mit deren Hilfe beurteilt werden kann, ob die geforderte Entwicklung hin zu einer „emissionsneutralen“, energieeffizienten Gesellschaft den gesetzten Zielpfaden entspricht. Die Beurteilung der

Bewertungsmethode für Energieeffizienzmaßnahmen gemäß Anlage 1 der „Richtlinien-Verordnung“, welche auch zum gesetzeskonformen Nachweis tatsächlich erzielter Einsparungen Verwendung findet, wirft daher die Frage auf, ob nicht eine erweiterte Beurteilung zur Überprüfung der Erreichung der gesetzlichen Effizienzziele erfolgen sollte. Diese kann beispielsweise eine Trendentwicklung von normalisierten Energieverbrauchsdaten umfassen, welche nach einem vernünftigen Zeitraum nach erfolgter Maßnahmenumsetzung von der „Monitoringstelle Energieeffizienz“ eingefordert werden kann. Durch die Verwendung von normalisierten Daten ist eine entsprechende Vergleichbarkeit gegeben und der tatsächlich eingetretene Einspareffekt sollte aus der Trendentwicklung ablesbar sein.

Eine Effizienzsteigerung kann grundsätzlich, wie im Rahmen dieser Arbeit diskutiert, auch nachgewiesen werden, wenn bei gleichbleibendem Energieeinsatz der erreichte Output erhöht wird, sodass der Primärenergieverbrauch des betrachteten Systems keine sinkende Tendenz als Folge der Maßnahme zeigt. Die Definition einer ausreichend umfassenden Nachweismethode, die eine Einschätzung erlaubt, welche zusätzlichen Anstrengung zur Zielerreichung des Pariser Abkommens unternommen werden müssen, stellt damit zweifelsohne eine gewaltige Herausforderung dar. Die aktuelle Nachweismethode der Energieeffizienz-Richtlinienverordnung sieht sich allerdings mit dem Vorwurf konfrontiert, derartig Anwendung zu finden, dass die größtmögliche Einsparung bei jeweils geringstem Aufwand nachgewiesen wird. Führt beispielsweise die Anwendung der angegebenen Default-Werte zu einer höheren Einsparung, als dies bei Verwendung der tatsächlich bekannten Werte im vorgegebenen Berechnungsmodell der Fall wäre, so ist die Verwendung der jeweils besseren Angaben gesetzeskonform und für die Unternehmen, welche eine gewisse Einsparung nachweisen müssen, natürlich günstiger. Diese Problematik wurde bei der durchgeführten Befragung der Energieauditoren häufig von diesen in individuellen Rückmeldungen angesprochen.

Die Bewertungsmethode der Arbeit entspricht der Einschätzung nach dem gestellten Anspruch, transparent und unter Berücksichtigung unsicherer Einflussgrößen den zu erwartenden Einspareffekt von Energieeffizienzmaßnahmen realistisch abzubilden. Die Anwendbarkeit der Methodik wurde einerseits anhand von bereits gesetzten Maßnahmen überprüft, um die tatsächlich „beobachteten Einsparungen“ mit den Prognosewerten vergleichen zu können und so eine kritische Beurteilung der Aussagekraft der Bewertungsergebnisse zu ermöglichen. Von den weiters vorgeschlagenen Maßnahmen wurde nach erfolgter Bewertung im Rahmen dieser Arbeit die Umsetzung von sieben weiteren bereits angekündigt bzw. veranlasst. Dies kann durchaus als Erfolg für die vorgestellte Methodik gewertet werden. Bei Umsetzung sämtlicher Maßnahmen wäre laut normalisierten Daten eine Reduktion der Treibhausgasemissionen um mehr als 1 000 Tonnen CO_2 zu erwarten.

6 Literaturverzeichnis

[1] *Richtlinie 2012/27/EU des Europäischen Parlaments und des Rates,* Europäische Union, Amtsblatt der Europäischen Union vom 25.10.2012

[2] *Vertrag von Lissabon zur Änderung des Vertrags über die Europäische Union und des Vertrags zur Gründung der Europäischen Gemeinschaft,* Europäische Union, Amtsblatt der Europäischen Union vom 13.12.2007

[3] http://ec.europa.eu/eurostat/tgm/refreshTableAction.do?tab=table&plugin=1&pcode= tsdcc310&la nguage=d, 23.07.2015

[4] *Adaption of the Paris Agreement,* United Nations, Proposal by the President, 11.12.2015

[5] http://ec.europa.eu/eurostat/tgm/table.do?tab=table&init=1&plugin=1&language=de&pcode=tsdgp410, 23.07.2015

[6] *Bundesgesetz über die Steigerung der Energieeffizienz bei Unternehmen und dem Bund (Bundes-Energieeffizienzgesetz – EEffG),* Bundeskanzleramt der Republik Österreich – Rechtsinformationssystem, Rechtsvorschrift in der Fassung bom 06.07.2016

[7] *Tipps aus der Praxis Energieeinsparmöglichkeiten in Heizungs- und Lüftungsanlagen,* SIEMENS Building Technologies GmbH & Co. oHG [Herausgeber], Frankfurt/Main, online verfügbar: http://docplayer.org/5861744-Building-technologies.html, 31.07.2016

[8] *Energieeffizienz. Ein Lehr- und Handbuch,* M. Pehnt [Herausgeber], Springer Verlag, Heidelberg 2010

[9] *Richtlinie 2010/30/EU des Europäischen Parlaments und des Rates,* Europäische Union, Amtsblatt der Europäischen Union vom 19.05.2010

[10] http://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/energiesparen/ energieverbrauchskennzeichnung, 07.07.2016

[11] http://ec.europa.eu/eurostat/tgm/table.do?tab=table&plugin=1&language=de&pcode= tsdec360, 23.07.2015

[12] http://www.wirtschaftslexikon.co/d/barwert/barwert.htm, 08.07.2016

[13] http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Glossary: Gross_inland_energy_consumption/de, 10.07.2016

[14] http://www.wirtschaftslexikon.co/d/bruttoinlandsprodukt-bip/bruttoinlandsprodukt-bip.htm, 08.07.2016

[15] http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Glossary: Gross_domestic_product_(GDP)/de, 08.07.2016

[16] *Energie- und klimaeffiziente Produkton. Grundlagen, Leitlinien und Praxisbeispiele,* J. Hesselbach, Springer Verlag, Wiesbaden 2012

[17] *ÖNORM EN 16212 Energieeffizienz und –einsparberechnung – Top-Down- und Bottom-Up-Methoden,* Österreichisches Normungsinstitut, Wien 2012

[18] http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Glossary: Tonnes_of_oil_equivalent_(toe)/de, 08.07.2016

[19] http://www.klimaaktiv.at/energiesparen/betriebe_prozesse/energieeffizienz.html, 08.07.2016

[20] http://www.bmwfw.gv.at/EnergieUndBergbau/Energieeffizienz/Seiten/ Energieeffizienzpaket.aspx, 08.07.2016

[21] *Kerninhalte des Energieeffizienzgesetzes,* Bundesministerium für Wissenschaft, Forschung und Wirtschaft, Wien, online verfügbar: http://www.bmwfw.gv.at/EnergieUndBergbau/ Energieeffizienz/Documents/Kerninhalte%20des%20EEFFG.pdf, 31.07.2016

[22] http://monitoringstelle.at/index.php?id=708, 08.07.2016

[23] *Beschreibende Statistik. Grundlegende Methoden der Datenanalyse,* M. Burkschat, E. Cramer, U. Kamps, Springer Verlag, Berlin Heidelberg 2012

[24] *Methoden der Statistik. Lehr- und Arbeitsbuch,* M. Krapp, J. Nebel, Vieweg+Teubner Verlag | Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, Wiesbaden 2011

[25] *Statistik. Eine interaktive Einführung,* H.-J. Mittag, Springer Verlag, Berlin Heidelberg 2011

[26] *Induktive Statistik. Eine Einführung mit R und SPSS,* H. Toutenburg, C. Heumann, Springer Verlag, Berlin Heidelberg 2007

[27] *Basiswissen Statistik. Kompaktkurs für Anwender aus Wirtschaft, Informatik und Technik,* A. Steland, Springer Verlag, Berlin Heidelberg 2010

[28] *Angewandte Statistik. Methodensammlung mit R,* L. Sachs, J. Hedderich, Springer Verlag, Berlin Heidelberg 2006

[29] *Bayesianischer Vergleich der Qualität endlicher Mischungsmodelle mit bzw. ohne Zufallseffekte anhand künstlicher Daten,* U. Schuster, Dissertation TU Wien, 2004

[30] *Parametrische Statistik. Verteilungen, maximum likelihood und GLM in R,* C. Dormann, Springer Verlag, Berlin Heidelberg 2013

[31] *Der Storch bringt die Babys zur Welt(p = 0.008),* R. Matthews, Teaching Statistics, 2000 (2), S. 36-38

[32] http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/File:Share_of_renewables_ in_gross_inland_energy_consumption,_2013_(%25) _YB15-de.png, 10.07.2016

[33] https://www.univie.ac.at/ksa/elearning/cp/quantitative/quantitative-61.html, 11.07.2016

[34] *The Monte Carlo Method,* N. Metropolis, S. Ulam, Journal of the American Statistical Association, Vol. 44 Nr 247 (September 1949), S. 335-341

[35] https://www.risknet.de/wissen/rm-methoden/monte-carlo-simulation/, 12.07.2016

[36] *Monte-Carlo Methoden zur Beschreibung der physikalischen Wechselwirkungen von Röntgenstrahlung mit Probe und Detektor in der Computertomographie,* B. Chyba, Dissertation TU Wien, 2009

[37] Die Wahl der berücksichtigen Messperiode zur Konstruktion der Normalverteilung der Außentemperaturprofile, aus welcher im Rahmen der Monte-Carlo-Simulationen Werte gezogen werden, ist von Prof. Dr. Herbert Formayer vom Institut für Meteorologie der Universität für Bodenkultur im Rahmen der Bereitstellung der Messdaten der ZAMG am 23. Juni 2016 vorgeschlagen worden.

[38] *Heizgradtagbereinigung des Heizenergieeinsatzes,* K. Schöngrunder, Magistrat der Stadt Graz Umweltamt – Umweltamt, Graz 2002

[39] *Auswirkungen des Klimawandels auf Heiz- und Kühlenergiebedarf in Österreich,* F. Prettenthaler und andere, Bericht zum Projekt StartClim2006, Graz 2007

[40] http://www.zamg.ac.at/fix/klima/oe71-00/klima2000/klimadaten_oesterreich_1971_frame1.htm, 12.07.2016

[41] http://www.zamg.ac.at/cms/de/klima/klimauebersichten/jahrbuch, 25.07.2016

[42] http://www.bmwfw.gv.at/EnergieUndBergbau/klimadatenrechner/Seiten/ZurBerechnung.aspx, 25.07.2016

[43] *Anlage 1 zur Energieeffizienz-Richtlinienverordnung: Verallgemeinerte Methoden zur Bewertung von Energieeffizienzmaßnahmen,* Bundesministerium für Wissenschaft, Forschung und Wirtschaft, ausgegeben am 30. 11.2015, Wien

[44] *Heizungs- und Lüftungstechnik. Installations- und Gebäudetechnik,* H. Schlagnitweit, H. Wagner, Jugend & Volk, Wien 2013

[45] *Energie-, Gebäude-, Versorgungstechnik,* D. Liepsch, F. Bajic, C. Steger, De Gruyter Oldenbourg, München 2014

[46] *Lüftung und Sanitär,* A. Pech, K. Jens, Springer Verlag, Wien 2015

[47] *ÖNORM EN 13779 - Lüftung von Nichtwohngebäuden - Allgemeine Grundlagen und Anforderungen für Lüftungs- und Klimaanlagen und Raumkülsysteme,* Österreichisches Normungsinstitut, Wien 2008

[48] *Vieweg Handbuch Bauphysik Teil 1 : Wärme-und Feuchteschutz, Behaglichkeit, Lüftung,* W. M. Willems, K. Schild, S. Dinter, Vieweg & Sohn Verlag | GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden 2006

[49] *Verordnung (EG) Nr. 641/2009 der Kommission,* Europäische Union, Amtsblatt der Europäischen Union vom 22.07.2009

[50] http://www5.umweltbundesamt.at/emas/co2mon/co2mon.htm, 25.07.2016

[51] http://www.energieinstitut.at/buerger/bauen-sanieren/energieausweis-2/wie-genau-stimmt-der- energieausweis/, 18.07.2016

[52] http://www.energieausweis.at/energieverbrauch-abweichung.htm, 18.07.2016

[53] http://www.welt.de/finanzen/immobilien/article147716799/Energieausweis-in-dieser-Form-vollkommen-wertlos.html, 25.07.2016

7 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Vergleich der Energieabhängigkeit von Österreich und der Europäischen Union [3] 4

Abbildung 2: Vergleich der CO2-Emissionen von Österreich, dem EU-28-Durchschnitt und Entwicklungsgebieten [5] 5

Abbildung 3: Barwertentwicklung nach ÖNORM M7140..... 8

Abbildung 4: Umwandlungskette der Energieversorgung mit qualitativer Darstellung der Verluste .. 10

Abbildung 5: Energieverbrauchskennzeichnung in der EU [10] 11

Abbildung 6: Energieintensität in kg Öläquivalent pro 1 000 EUR des BIP ausgewählter Länder [11] . 12

Abbildung 7: Einfluss der Baseline-Definition auf das Berechnungsergebnis 21

Abbildung 8: Anteil erneuerbarer Energien am Bruttoinlandsenergieverbrauch für 2013 (EU-28) [32] 28

Abbildung 9: Beispiele für Normalverteilungen 30

Abbildung 10: Beispiel einer empirischen Verteilung 31

Abbildung 11: Monte-Carlo-Simulation eines Würfelwurfs 32

Abbildung 12: Verteilungen der Einflussgrößen auf den Kraftstoffverbrauch..... 34

Abbildung 13: Resultierende Verteilung nach Monte-Carlo-Simulation..... 34

Abbildung 14: Schritt 1, Analyse der Ausgangssituation 37

Abbildung 15: Schritt 2, Bestimmung der Energieeffizienzmaßnahme 38

Abbildung 16: Schritt 3, Bewertung des Maßnahmeneffekts 39

Abbildung 17: Externe Einflussgrößen für die Normierung der Baseline..... 40

Abbildung 18: Beispiel eines temperaturbereinigten Verbrauchsverlaufs 42

Abbildung 19: Korrelationsanalyse der Heizgradtageszahl und des gemessenen Wärmeenergieverbrauchs [MWh] 44

Abbildung 20: Szenario 1, Verteilung des Wärmeverbrauchs [MWh], Monte-Carlo-Simulation (1 000 Iterationen)..... 44

Abbildung 21: Szenario 2, Verteilung des Wärmeverbrauchs [MWh], Monte-Carlo-Simulation (1 000 Iterationen)..... 45

Abbildung 22: Szenario 3, Verteilung des Wärmeverbrauchs [MWh], Monte-Carlo-Simulation (1 000 Iterationen) 45

Abbildung 23: Vergleich der Simulationsergebnisse der drei angenommenen Szenarien 46

Abbildung 24: Histogramm und Boxplot der Tagesenergieverbräuche des Beispielgebäudes 48

Abbildung 25: Abweichung der Modelldaten zu den tatsächlichen Werten (l.) und Verteilung der Residuen (3 Parameter) 50

Abbildung 26: Abweichung der Modelldaten zu den tatsächlichen Werten (l.) und Verteilung der Residuen (2 Parameter) 50

Abbildung 27: Regressionsmodell (l., rot), Residuenplot (r.) 51

Abbildung 28: Residuenplot (l.) und Verteilung der Residuen (r.) des ermittelten Modells 52

Abbildung 29: Vergleich der Verteilung des Baseline-Verbrauchs bei unterschiedlicher Anzahl von Iterationen..... 53

Abbildung 30: Konfidenzintervall eines Regressionsmodells..... 54

Abbildung 31: Mittelwert der Leistungsaufnahme in Abhängigkeit des Wochentags, Gebäude 1 58

Abbildung 32: Carpet-Plot der Leistungswerte, Gebäude 1 59

Abbildung 33: Regressionsanalyse zur Sonnenscheindauer mit Residuenverteilung..... 59

Abbildung 34: Regressionsanalyse zur Niederschlagsmenge mit Residuenverteilung 60

Abbildung 35: Maßnahmenbewertung Leuchtmitteltausch, Gebäude 1 61

Abbildung 36: Maßnahmenbewertung Betriebszeitoptimierung, Gebäude 1 62

Abbildung 37: Mittelwerte der Leistungsaufnahme in Abhängigkeit des Wochentags, Gebäude 2 64

Abbildung 38: Carpet-Plot der Leistungswerte, Gebäude 2 64

Abbildung 39: Abhängigkeit der Globalstrahlung und der Sonnenscheindauer (l.) und Residuenverteilung (l.) 65

Abbildung 40: Regressionsanalyse zum Parameter Sonnenscheindauer 66

Abbildung 41: Regressionsanalyse zum Parameter Globalstrahlung..... 66

Abbildung 42: Maßnahmenbewertung der beiden vorgeschlagenen Maßnahmen, Gebäude 2 67

Abbildung 43: Maßnahmenbewertung Leuchtmitteltausch, Gebäude 3 70

Abbildung 44: Maßnahmenbewertung Leuchtmitteltausch, Gebäude 4 72

Abbildung 45: Behaglichkeitsfenster für komfortable Raumparameter ([48], S.379) 75

Abbildung 46: Schematische Darstellung des Simulationsmodells..... 77

Abbildung 47: Mittelwerte der Leistungsaufnahme der Anlage, Gebäude 5 79

Abbildung 48: Carpet-Plot der Leistungswerte der Anlage, Gebäude 5 80

Abbildung 49: Maßnahmenbewertung Betriebsoptimierung, elektrische Energieeinsparung, Gebäude 5 81

Abbildung 50: Maßnahmenbewertung Betriebsoptimierung, Einsparung Heizenergieverbrauch, Gebäude 5 82

Abbildung 51: Maßnahmenbewertung Betriebsoptimierung und ERG, elektrische Energieeinsparung, Gebäude 6 84

Abbildung 52: Maßnahmenbewertung Betriebsoptimierung und ERG, Einsparung Heizenergieverbrauch, Gebäude 6 85

Abbildung 53: Mittelwerte der elektrischen Lastgangkurven vor und nach Abschaltung der Anlage an Sonntagen 86

Abbildung 54: Maßnahmenbewertung Betriebsoptimierung, elektrische Energieeinsparung, Gebäude 7 88

Abbildung 55: Maßnahmenbewertung Betriebsoptimierung, Einsparung Heizenergie, Gebäude 7 ... 89

Abbildung 56: Vergleich der Tagesenergieverbräuche vor und nach Maßnahmenumsetzung 90

Abbildung 57: Maßnahmenbewertung Betriebsoptimierung und Ventilatortausch, elektr. Energieeinsparung, Gebäude 8 92

Abbildung 58: Maßnahmenbewertung Betriebsoptimierung, Einsparung Heizenergie, Gebäude 8 ... 93

Abbildung 59: Mittelwert der Leistungsaufnahme der Kälteanlage 95

Abbildung 60: Maßnahmenbewertung Free-Cooling-Einsatz, Gebäude 9 96

Abbildung 61: Verteilung der Tage mit Free-Cooling-Einsatz, Gebäude 9 97

Abbildung 62: Vergleich des Energieverbrauchs der betroffenen Anlagen, Gebäude 9 97

Abbildung 63: Vergleich der Free-Cooling-Nutzungsdauer, Gebäude 10 100

Abbildung 64: Elektrische Energieeinsparung und Betriebszeitreduktion, Gebäude 10 101

Abbildung 65: Pumpenleistung in Abhängigkeit der Temperaturdifferenz 102

Abbildung 66: Maßnahmenbewertung, Optimierung der Pumpenregelung, Gebäude 11 103

Abbildung 67: Vergleich der drehzahlgeregelten Pumpenkennlinie (schwarz) und der 3-stufigen Pumpenkennlinie (grau) 104

Abbildung 68: Maßnahmenbewertung, Pumpentausch, Gebäude 12 105

Abbildung 69: Bereiche, aus welchen Maßnahmen bewertet wurden 113

Abbildung 70: Basis der Maßnahmenbewertung 114

Abbildung 71: Größen, welche für Normalisierungen berücksichtigt werden 114

Abbildung 72: Herausforderungen bei der Maßnahmenbewertung 115

Abbildung 73: Einflussgrößen auf tatsächliche Maßnahmenumsetzung..... 116

8 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Beispiel einer Maßnahmenbewertung ([7], S.10) ... 8

Tabelle 2: Vergleich der $HGT_{20/12}$ der Landeshauptstädte [42] ... 36

Tabelle 3: Kenngrößen der Datenstichprobe ... 47

Tabelle 4: Informationskriterien und Bestimmtheitsmaß je nach Einflussparametern ... 49

Tabelle 5: Signifikanztest, 3 Einflussparameter ... 49

Tabelle 6: Signifikanztest, 2 Einflussparameter ... 50

Tabelle 7: Kenndaten des Beispielgebäudes 1 ... 57

Tabelle 8: Kenndaten des Beispielgebäudes 2 ... 63

Tabelle 9: Kenndaten des Beispielgebäudes 3 ... 68

Tabelle 10: Bekannte Monatsverbrauchswerte der Beleuchtungsanlage ... 68

Tabelle 11: Kenndaten des Beispielgebäudes 4 ... 71

Tabelle 12: Vergleich der Abweichung der Einsparungen je nach Methode ... 73

Tabelle 13: Klassifizierung der spezifischen Ventilatorleistung ([47], S.24) ... 76

Tabelle 14: Kenndaten des Beispielgebäudes 5 ... 78

Tabelle 15: Kenndaten des Beispielgebäudes 6 ... 83

Tabelle 16: Kenndaten des Beispielgebäudes 7 ... 87

Tabelle 17: Kenndaten des Beispielgebäudes 8 ... 90

Tabelle 18: Kenndaten des Beispielgebäudes 9 ... 94

Tabelle 19: Kenndaten des Beispielgebäudes 10 ... 99

Tabelle 20: Kenndaten des Beispielgebäudes 11 ... 102

Tabelle 21: Kenndaten des Beispielgebäudes 12 ... 104

Tabelle 22: Übersicht aller Bewertungsbeispiele ... 108

Tabelle 23: Übersicht aller Beispielbewertungen, Ergebnisunsicherheiten ... 109

Tabelle 24: Vergleich der Bewertungsmethoden ... 117

9 Abkürzungsverzeichnis und Anmerkungen

Anmerkung 1

Sämtliche Bezeichnungen im Rahmen der Arbeit, welche nur für eines der beiden Geschlechter angeführt sind, beziehen sich jeweils auf beide Geschlechter. Aus Gründen der besseren Lesbarkeit wird jedoch häufig nur eine Form verwendet.

Anmerkung 2

Die im Rahmen der Arbeit verwendeten Gebäude, für welche Beispielmaßnahmen bewertet worden sind, können aus Datenschutzgründen nicht näher beschrieben werden, als dies an entsprechender Stelle geschehen ist.

Abkürzungsverzeichnis

Physikalische Einheiten sind in den jeweils gängigen SI-Abkürzungen verwendet worden.

a	annum (Akkusativ von „annus“, lateinisch für Jahr, insbesondere verwendet in der Phrase „per annum“ für „pro Jahr“, symbolische Schreibweise: kWh/a)
BIP	Bruttoinlandsprodukt
bzgl.	Bezüglich
bzw.	beziehungsweise
cnt	count (Anzahl, Achsenbeschriftung bei Histogrammen)
d	day (Tag)
elektr.	elektrisch
ERG	Energierückgewinnungssystem
EU	Europäische Union
f	folgende Seite (bei Zitaten)
ff	folgende Seiten (bei Zitaten)
GWh	Gigawattstunde(n)
HGT	Heizgradtageszahl
IEA	Internationale Energieagentur

IQR	Interquartilsabstand
KGT	Kühlgradtageszahl
km	Kilometer
kW	Kilowatt
kWh	Kilowattstunde(n)
LED	Leuchtdiode / lichtemittierende Diode
MWh	Megawattstunde(n)
OSZE	Organisation für Sicherheit und Zusammenarbeit in Europa
S.	Seite
TRY	test reference year (Testreferenzjahr, Klimanormalperiode)
vgl.	vergleiche
z.B.	zum Beispiel
ZAMG	Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik