

Robuste, nutzerfreundliche und kostengünstige TGA in Gebäuden

Endbericht

Forschungsprogramm

Forschungsinitiative Zukunft Bau, ein Forschungsprogramm des Bundesinstituts für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR)

Projektlaufzeit

19. November 2019 bis 30. Juni 2022

Aktenzeichen

10.08.17.7-19.42

im Auftrag

des Bundesinstituts für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR)
im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR)

bearbeitet von

Technische Universität München
Lehrstuhl für Gebäudetechnologie und klimagerechtes Bauen
Lukas Lauss, M. Sc.
Prof. Dipl.-Ing. Thomas Auer
Andreas Meier, M. Sc.
Annika Rink, M. Sc.
Alexander Granmayeh, M. Sc.

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|-------|--|----|
| 1 | Einleitung | 1 |
| 2 | Forschungsmethodik und theoretische Grundlagen..... | 3 |
| 2.1 | Methodische Vorgehensweise und Strukturierung des Forschungsvorhabens..... | 3 |
| 2.2 | Performance Gaps und Betriebsfehler in der Gebäudetechnik..... | 5 |
| 2.3 | Ansätze zur Fehlererkennung und Fehlerdiagnose..... | 6 |
| 2.4 | Gebäudesimulationen und Monte-Carlo-Methode..... | 7 |
| 2.5 | Analyse der Lebenszykluskosten..... | 10 |
| 3 | Experimentelles Design und methodischer Versuchsaufbau | 11 |
| 3.1 | Fehlererkennung und Fehlerdiagnose im Gebäudebetrieb | 11 |
| 3.2 | Entwicklung dynamisch-thermischer Gebäudesimulationsmodelle mit Monte-Carlo-Methode..... | 12 |
| 3.3 | Berechnungsmethodik der Lebenszykluskosten | 16 |
| 4 | Durchführung von Feldstudien und Untersuchungen..... | 18 |
| 4.1 | Erkennung und Identifikation von Betriebsfehlern im Gebäudebetrieb | 18 |
| 4.2 | Gebäudesimulationen und Parameterstudien Generisches Gebäudemodell..... | 21 |
| 4.2.1 | Modellierung und Simulationen..... | 21 |
| 4.2.2 | Vorbereitungen und Klassifikation zur Durchführung der Monte-Carlo-Simulationen | 22 |
| 4.2.3 | Relative Unsicherheits- und Sensitivitätsanalysen mit Monte-Carlo-Simulationen.... | 24 |
| 4.2.4 | Spezifische Unsicherheits- und Sensitivitätsanalysen mit Monte-Carlo-Simulationen | 31 |
| 4.3 | Gebäudesimulationen und Parameterstudien Reale Untersuchungsgebäude..... | 42 |
| 4.3.1 | Modellierungen und Simulationsrandbedingungen..... | 42 |
| 4.3.2 | Vorbemerkungen zu den Simulationsergebnissen Reale Untersuchungsobjekte | 47 |
| 4.3.3 | Simulationsergebnisse Gebäude mit Low-Tech Ansatz | 48 |
| 4.3.4 | Simulationsergebnisse Gebäude mit High-Tech Ansatz..... | 52 |
| 4.3.5 | Vergleich der Simulationsergebnisse beider Untersuchungsgebäude..... | 57 |
| 4.5 | Ergebnisse der Lebenszykluskostenberechnungen | 59 |
| 5 | Zusammenfassung und Ausblick..... | 63 |
| | Quellenverzeichnis..... | 73 |
| | Abbildungsverzeichnis | 76 |
| | Tabellenverzeichnis | 77 |
| | Anhang | 78 |

Kurzfassung

Das Ziel des Forschungsvorhabens ist die Entwicklung von Strategien und Maßnahmen zur Optimierung der Gebäudeperformance. In der Praxis treten häufig Performance Gaps, also die Diskrepanz zwischen den Zielgrößen in der Planungsphase und den Messwerten im Gebäudebetrieb, auf. Diese können während unterschiedlicher Lebenszyklusphasen von Gebäuden entstehen, wodurch die Qualität des Gebäudebetriebes negativ beeinflusst wird. Um das Klimaschutzziel, bis 2045 einen klimaneutralen Gebäudebestand zu erreichen, müssen wirksame Methoden und Lösungen für Bestandsgebäude umgesetzt werden. Dabei muss der Fokus insbesondere auf die Gebäude- und Anlagentechnik sowie deren Automation gelegt werden, da hierbei neben dem großen Energieeinsparpotential auch häufig Effizienzlücken durch Betriebsfehler, unerwartetem NutzerInnenverhalten sowie Klimaveränderungen festgestellt werden. Im Rahmen des Forschungsprojektes wird ein simulationstechnisches Rahmenwerk aufgebaut und angewendet, mit dessen Hilfe sich verschiedene Analyseszenarien zu robuster, nutzerInnenfreundlicher und kostengünstiger Gebäudetechnik untersuchen lassen.

Um die Analyse von Betriebsfehlern vornehmen zu können, wird ein regelbasiertes Modell zur Fehlererkennung in gebäudetechnischen Anlagen aufgesetzt. Dadurch wurden in zwei Nicht-Wohngebäuden zahlreiche, fehlerhafte Betriebszustände identifiziert. Darauf aufbauend erfolgt die simulationstechnische Abbildung von Betriebsfehlern, NutzerInnenfehlerverhalten und Klimawandelszenarien. Diese Einflussfaktoren führen dazu, dass gebäudetechnische Systeme eine Vielzahl an unterschiedlichen Betriebszuständen einnehmen und diese Variablen sich in einem Wertebereich bewegen bzw. nicht als statisch zu betrachten sind. Um diese Dynamik und die statistische Variation unterschiedlicher Input-Parameter infolge unsicherer Randbedingungen untersuchen zu können, werden Monte-Carlo-Simulationen durchgeführt. In Kombination mit den Gebäudesimulationen werden Unsicherheits- und Sensitivitätsanalysen zur Quantifizierung der Auswirkungen von Performance Gaps und Identifikation der einflussreichsten Stellschrauben bzw. sensitivsten Eingangsgrößen vorgenommen. Dementsprechend können Potentiale und Möglichkeiten für robuste Gebäudetechnik auf Grundlage von Energieeinsparungen und Kriterien des thermischen Komforts sowie deren Wechselwirkungen abgeleitet werden. Diese Ergebnisse und Erkenntnisse dienen der Verwendung für zukünftige Planungsprozesse und energetische Qualitätssicherungsmaßnahmen im Gebäudebetrieb. Resultierend soll ein Beitrag zur Optimierung der Gebäudeperformance durch Vermeidung von Performance Gaps geleistet werden, um in weiter Folge das übergeordnete Ziel eines klimaneutralen Gebäudebestandes zu erreichen.

Schlagwörter: Performance Gap, Robustheit, Betriebsfehler, Energieeffizienz, Gebäudesimulation, Monte-Carlo-Methode, Unsicherheitsanalysen, Sensitivitätsanalysen

Abstract

The aim of this research project is to develop strategies and measures for improving building performance. In practice, performance gaps, the discrepancy between the target values in the planning phase and the measured values in building operation, often occur during different life cycle phases of buildings and can negatively influence the quality of building operation. In order to achieve the climate protection goal of a climate-neutral building stock by 2045, effective methods and solutions for existing buildings must be implemented. In this context, the focus must be placed in particular on building technology as well as building automation and control systems, according to the large energy saving potentials and due to the fact that performance gaps are frequently identified in terms of operational faults, unexpected user behaviour and climate changes.

Within this research project, a simulation framework is designed and applied, where robust as well as user-friendly and cost-effective building technology can be investigated with the help of various analysis scenarios. In addition to be able to analyse operating faults, a rule-based model for fault detection in technical building systems is developed. This enabled to identify numerous faulty operating conditions in two non-residential buildings. Based on this, the simulation of operational faults, unexpected user behaviour and climate change scenarios is carried out. These influencing factors lead to the fact that technical building systems assume a large number of different operating states and these variables move within a range of values and can not to be regarded as static. Furthermore to be able to investigate these dynamic situations and the statistical variation of different input parameters as a result of uncertain boundary conditions, the method of Monte Carlo simulations is used. In combination with the building performance simulations, uncertainty and sensitivity analyses are carried out to quantify the effects of performance gaps and to identify the most influential adjusting screws as well as most sensitive input variables. Accordingly, potentials and possibilities for robust building technology based on energy savings and thermal comfort as well as their interactions can be derived. These results and findings will be used for future planning and design processes as well as energy quality assurance measures in building operation. As a result, this research work should contribute to optimise building performance by avoiding performance gaps in order to subsequently achieve the overarching goal of a climate-neutral building stock.

Keywords: Performance Gap, Robustness, Operational Fault, Energy Efficiency, Building Performance Simulations, Monte Carlo Method, Uncertainty Analysis, Sensitivity Analysis

1 Einleitung

Die globale Erderwärmung ist eine der größten Herausforderung für die heutige Gesellschaft und geht mit einer Vielzahl an Risiken sowohl für Mensch als auch Umwelt einher. Neben dem Verlust der biologischen Vielfalt, der Verschiebung von Vegetationszonen oder dem Anstieg der Meeresspiegel, sind auch eine steigende Anzahl von Extremereignissen, wie z. B. länger anhaltende Hitzeperioden, Waldbrände oder Überschwemmungen, auf die Auswirkungen des anthropogenen Klimawandels zurückzuführen [Kahlenborn, Porst et al, 2021].

Um dem anthropogenen Klimawandel entgegenzuwirken und bremsen zu können, ist ein massives Umdenken erforderlich. Insbesondere der Bau- und Gebäudesektor muss hierzu einen entscheidenden Beitrag leisten. Auf diesen Bereich entfallen in Deutschland während Herstellung, Bau und Betrieb etwa 90 % der mineralischen Rohstoffe [VDI Ressourceneffizienz, 2022], ca. 35 % des Endenergieverbrauchs [Dena, 2022] und rund ein Drittel der CO₂ Emissionen [UBA, 2022]. Dementsprechend müssen wirksame Maßnahmen entwickelt und umgesetzt werden, um die ambitionierten Klimaziele der deutschen Bundesregierung, bis 2045 ein nahezu klimaneutraler Gebäudebestand, zu erreichen.

Eine dieser Strategien und Maßnahmen muss lauten, Performance Gaps (PGs) in Bestandsgebäuden zu reduzieren. Dieses zunehmend intensiver diskutierte Thema, der sogenannten Performance Gaps, beschreibt die Differenz zwischen den Zielgrößen in der Planung und den Messwerten im Betrieb von Gebäuden. Diese Diskrepanz wirkt sich in der Regel nicht nur negativ auf den Energieverbrauch, sondern auch auf den NutzerInnenkomfort und den Ausstoß von Treibhausgasemissionen aus.

Performance Gaps sind insbesondere auf Betriebsfehler in der Gebäudetechnik und das unerwartete NutzerInnenverhalten im Gebäudebetrieb zurückzuführen [Mojic, Luzzatto et al., 2018] [Auer, Lauss et al., 2020]. Um Performance Gaps vorzubeugen braucht es robuste und nutzerInnenfreundliche Gebäudetechnikkonzepte. Darüber hinaus müssen durch energetische Qualitätssicherungsmaßnahmen im Gebäudebetrieb die Analyse von Energieverbräuchen und Anlagenzuständen sowie die Identifikation von Betriebsfehlern erfolgen. Im Rahmen dieser Arbeit werden Betriebsfehler identifiziert, die Auswirkungen von Performance Gaps auf den Energiebedarf sowie thermischen Komfort quantifiziert und darauf aufbauend Potentiale zur Optimierung der Gebäudeperformance abgeleitet.

In den nachfolgenden Kapiteln wird das Vorgehen sowie die wesentlichen Ergebnisse und Erkenntnisse des Forschungsprojektes „Robuste, nutzerfreundliche und kostengünstige TGA in Gebäuden“ (Förderkennzeichen 10.08.17.7-19.42) vorgestellt. Das Ziel des Projektes ist, Strategien und Maßnahmen zu entwickeln, die zu Gebäuden führen, welche weitgehend robust (im Kontext von stabil und fehlertolerant bzw. widerstandsfähig) sind gegenüber einzelnen Fehlern technischer Komponenten, unerwartetem Nutzerverhalten sowie klimatischen Veränderungen. Der Fokus liegt hierbei auf der Betrachtung von Gebäuden, die sowohl in der Heizperiode als auch im Sommer einen möglichst energieeffizienten Betrieb und eine gute thermische Behaglichkeit sicherstellen.

Die Sondierungsstudie wurde vom Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR) im Rahmen des Forschungsprogrammes Zukunft Bau im Durchführungszeitraum von November 2019 bis Juni 2022 gefördert. Für die Förderung dieser umfangreichen Forschungsarbeiten gilt dem Fördergeber an dieser Stelle der Dank aller Projektmitwirkenden.

2 Forschungsmethodik und theoretische Grundlagen

2.1 Methodische Vorgehensweise und Strukturierung des Forschungsvorhabens

Die Forschungsmethodik basiert auf einem mehrstufigen, aufeinander aufbauenden Prozess und setzt sich im Wesentlichen aus den beiden übergeordneten Bausteinen „Analyse Gebäudebetrieb und Fehlererkennung“ sowie „Modellierung und Simulationen“ zusammen.

Zu Beginn wird der Betrieb von unterschiedlichen gebäudetechnischen Anlagen in zwei realen Untersuchungsgebäuden analysiert. Auf Basis von Automationsdaten wird die Identifikation von Betriebsfehlern und Unregelmäßigkeiten im Gebäudebetrieb vorgenommen. In diesem Zusammenhang erfolgt die Entwicklung eines Modells zur regelbasierten Fehlererkennung in gebäudetechnischen Anlagen. Die durch die exemplarische Anwendung des Modells identifizierten Betriebsfehler in der Gebäudetechnik bilden in weiterer Folge die Grundlage für den darauf aufbauenden Simulationsblock.

Im Bereich der thermisch-dynamischen Gebäudesimulationen werden in einem ersten Schritt neben den identifizierten Betriebsfehlern auch der Einfluss des NutzerInnenverhaltens sowie unsichere Randbedingungen in der technischen Gebäudeausrüstung (TGA) und bauliche Faktoren anhand eines generischen Gebäudesimulationsmodells abgebildet. In Kombination mit Unsicherheits- (UA) und Sensitivitätsanalysen (SA) werden durch Monte-Carlo-Simulationen (MCS) die Veränderungen und Auswirkungen auf den Energiebedarf und thermischen Komfort quantifiziert. Darüber hinaus können durch den gewählten Forschungsansatz an dieser Stelle die einflussreichsten Input-Parameter und relevante Stellschrauben in Bezug auf Betriebsfehler, NutzerInnenverhalten und Gebäudetechnik abgeleitet werden. Dieser Auswahlprozess ermöglicht in einem nächsten Schritt die simulationstechnische Untersuchung von Performance Gaps zweier realer Untersuchungsgebäude im Kontext von High-Tech und Low-Tech Ansätzen. Durch diesen mehrstufigen Simulationsprozess können nun detailgenau die Parameter mit dem größten Einfluss auf den Gebäudebetrieb weiterführend untersucht werden. Die unsicheren Randbedingungen des NutzerInnenverhaltens werden in diesem Abschnitt auf Basis der Auswertungen des Partner-Forschungsprojektes „Nutzerkomfort durch low-tech Konzepte in Gebäuden“ (Aktenzeichen: 10.08.17.7-19.44) [Lipp, Muñoz-Czerny et al., 2022] in das Simulationsmodell implementiert. Darüber hinaus fließen in die simulationstechnischen Untersuchungen neben den Betriebsfehlern der Gebäudetechnik und dem unerwartetem NutzerInnenverhalten auch die Aspekte zukünftiger, klimatischer Veränderungen durch Prognose-Wetterdatensätze (Zukunfts-Testreferenzjahre TRY des Deutschen Wetterdienst DWD) mit ein. Abschließend werden für die jeweiligen Gebäude die Lebenszykluskosten berechnet, um dadurch auch eine wirtschaftliche bzw. gesamtheitliche Betrachtungsweise zu ermöglichen und Erkenntnisse in einem umfangreichen Forschungskontext

abzuleiten. Dementsprechend kann durch den implementieren Forschungsansatz die Grundlage für Strategien und Maßnahmen zu einer robusten, nutzerfreundlichen und kostengünstigen TGA in Gebäuden geschaffen werden. Der entwickelte und angewandte Forschungsansatz ist in der nachfolgenden Abbildung 1 grafisch dargestellt.

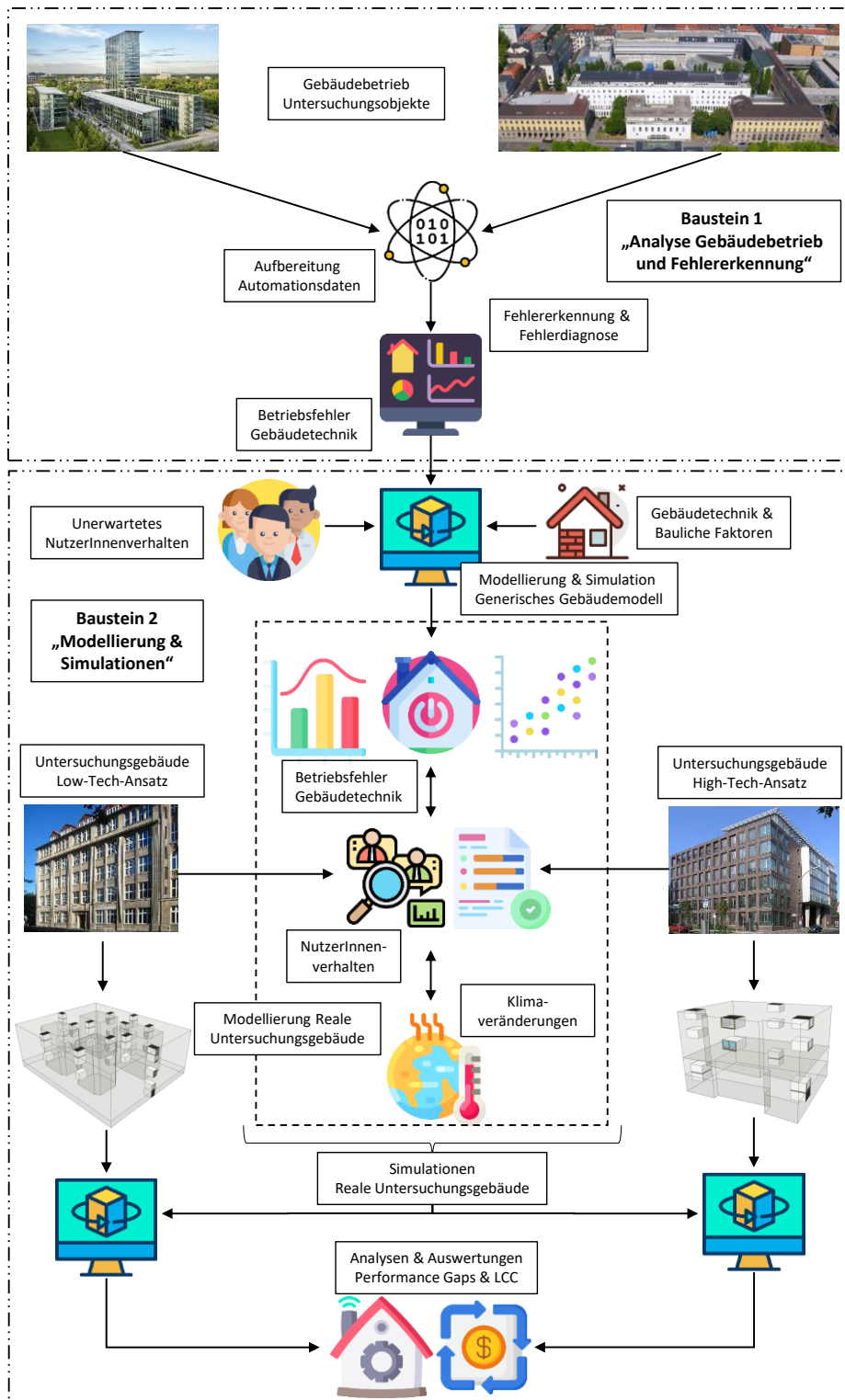


Abbildung 1: Grafische Darstellung des Forschungsansatzes bzw. Workflow

2.2 Performance Gaps und Betriebsfehler in der Gebäudetechnik

Ressourcenknappheit und der anthropogene Klimawandel zwingen zu einer Reduzierung von Performance Gaps in Bestandsgebäuden. Die Ursachen von Performance Gaps sind vielfältig und können im Wesentlichen in vier Gruppen kategorisiert werden.

Erstens können u. a. ein abweichender Energieverbrauch und / oder der Einfluss auf die thermische Behaglichkeit durch ein verändertes Klima resultieren und wird mit dem Begriff „Ambient-Gap“ zusammengefasst. In der Planungsphase werden Klimadaten wie z. B. Außenlufttemperaturen, Solarstrahlungen, Wind, usw. oder externe Verschattungen durch Bäume, Nachbargebäude, etc. angenommen, welche in der Regel zumeist von dem tatsächlich vorherrschenden Klima bzw. den realen Gegebenheiten am Standort abweichen. Zweitens liegt eine weitere Begründung für das Auftreten von Performance Gaps in der Berechnungsmethodik von Normen bzw. Richtlinien, in denen pauschalisierte Angaben bzw. vereinfachten Annahmen zur Dimensionierung und Auslegung von Komponenten bzw. Bauteilen herangezogen wird („Norm-Gap“). Drittens trägt ein abweichendes bzw. unerwartetes NutzerInnenverhalten wie z. B. Anwesenheitszeiten, Nutzungs- und Belegungsprofile, Interaktion der NutzerInnen mit der Gebäudetechnik sowie Komfortansprüche im Betrieb zu Performance Gaps bei und wird als „User-/Usage Gap“ verstanden. Grundsätzlich wird im eigentlichen Sinne von Performance Gaps gesprochen, wenn Unregelmäßigkeiten, Probleme und Betriebsfehler in gebäudetechnischen Anlagen auftreten. Diese vierte Ursache wird mit dem Begriff „Technical-Gap“ beschrieben und kann sich negativ auf Energieverbrauch bzw. Treibhausgasemissionen und NutzerInnenkomfort auswirken [Mojic, Luzzatto et al., 2018] [Auer, Lauss et al., 2020].

Betriebsfehler führen in der Regel nicht zu einem Totalausfall des Gesamtsystems, sondern zu Abweichungen und Beeinträchtigungen im Betrieb von gebäudetechnischen Anlagen, was sich wiederum auf die Raumkonditionierung und thermische Behaglichkeit auswirken kann. In der Literatur wird ein Betriebsfehler als eine nicht zulässige Abweichung von zumindest einer charakteristischen Eigenschaft vom Normalzustand definiert [Dexter, Pakanen, 2001]. Diese Definition kann auch breiter gefasst werden und ein Fehler ist somit immer eine Abweichung von etwas, das erreicht werden sollte.

In diesem Zusammenhang ist zwischen der Fehlerwirkung und Fehlerursache zu unterscheiden. Fehlerwirkungen beschreiben die direkten Auswirkungen von Betriebsfehlern, wie z. B. eine zu niedrige Raumtemperatur. Die Begründung dafür kann darin liegen, dass der Sensor defekt ist oder das Wärmeabgabesystem zu klein dimensioniert wurde. Die Internationale Energie Agentur (IEA) definierte in ANNEX 34 Kategorien und Arten typischer Betriebsfehler zur Abgrenzung von Fehlerursachen und –wirkungen [Dexter, Pakanen, 2001]. Darin werden Betriebsfehler in drei Kategorien unterteilt und die Aufschlüsselung erfolgt durch die Einteilung von Fehlerkategorien.

Hierbei wird zwischen Betriebsfehlern durch menschliches Versagen, Systemfehlern und Hardwarefehlern unterschieden. Diese werden in nachfolgenden Auflistung zusammengefasst und durch weitere Unterkategorien spezifiziert. Es ist zu beachten, dass ein Fehler mehrere Ursachen haben kann, was dazu führt, dass nicht immer eine klare Zuordnung zu einer einzelnen Kategorie möglich ist.

- Fehler durch menschliches Versagen:
Planungsfehler, Ausführungsfehler, Bedien- und Wartungsfehler
- Automations- bzw. Gebäudeautomations-Fehler / Systemfehler:
Softwarefehler, Sensorfehler
- Hardwarefehler:
Hardwaredefekt, Verschleißerscheinung

2.3 Ansätze zur Fehlererkennung und Fehlerdiagnose

Häufig ist das Erkennen von Betriebsfehlern nur schwer und mit großem Aufwand möglich. Zusätzlich erschweren komplexe Gebäudeautomationsfunktionen die Fehlererkennung, wodurch die Auswirkungen eines Fehlers kompensiert werden können. Am Beispiel einer raumtemperatursollwertgeführten Raumautomation soll das verdeutlicht werden: wird infolge eines Betriebsfehlers außerhalb der Heizperiode einem Raum Wärme zugeführt, gleicht die Sollwertregelung diesen Wärmeeintrag durch das Kälteabgabesystem wieder aus. Dadurch ergeben sich für NutzerInnen keine Abweichungen hinsichtlich der Raumkonditionen und der Betriebsfehler wird innerhalb der Gebäudetechnik vollständig kompensiert. Resultierend lassen sich jene Betriebsfehler „nur“ durch erhöhte Energieverbräuche feststellen und unterstreicht somit die Notwendigkeit von Fehlerdiagnosesystemen bzw. energetische Qualitätssicherungsmaßnahmen im Gebäudebetrieb. Werden diese Maßnahmen nicht ergriffen, bleiben Fehler häufig unbemerkt.

Um Betriebsfehler in gebäudetechnischen Anlagen erkennen und identifizieren zu können, gibt es eine Vielzahl von Ansätzen [Auer, Lauss et al., 2020]. Hauptsächlich werden zu diesem Zweck Fehlererkennungs- und Diagnoseverfahren (FDD: Fault Detection and Diagnosis) eingesetzt. Diese softwaregestützten Werkzeuge sind sowohl für die (automatische) Fehlererkennung als auch für die anschließende Fehlerdiagnose geeignet. Üblicherweise erfolgt die Fehlererkennung durch den Vergleich der (korrekten) Sollzustände mit den (fehlerhaften) Istzuständen. In weiterer Folge wird über die Fehlerdiagnose versucht, möglichst viele Detailinformationen über einen Betriebsfehler aufzuzeichnen, wie beispielsweise die Fehlerart oder die Lokalisierung eines Fehlers in TGA-Anlagen. Aber auch Energieverbrauchskontrollen können ein bewährtes Verfahren sein, um Informationen über eventuelle Betriebsfehler zu erhalten und anschließend mögliche

Fehlerursachen zu ermitteln. Die Aufzeichnungen der Gebäudeautomation (GA) können ebenfalls verwendet werden, um Betriebsfehler zu detektieren. Werden z. B. Raumtemperaturen von den NutzerInnen als zu gering oder zu hoch empfunden, können über einen separaten Messfühler und einem Datenlogger manuelle Vergleichsmessungen und folglich Sollwertabgleiche durchgeführt werden. Falsche Temperaturwerte der Gebäudeleittechnik (GLT) durch Sensorfehler oder -defekt (z. B. Offset Sensoren) können beispielsweise durch diese Methode erfasst werden. Des Weiteren können Fehler in einzelnen Fällen auch durch Besichtigung und regelmäßige Kontrollen der Anlagen erkannt werden.

Erst wenn mögliche Betriebsfehler in der Anlagentechnik bekannt sind, kann im weiteren Verlauf des Gebäudebetriebs die Betriebsoptimierung erfolgen. Dementsprechend muss vor der energetischen Optimierung gebäudetechnischer Anlagen zuerst der fehlerfreie Betrieb gewährleistet sein, damit anschließend zu einer gezielten Verbesserung des planmäßigen Betriebs beigetragen werden kann. Durch Betriebsoptimierungen sollen die Energieeffizienz bzw. thermische Behaglichkeit unter Berücksichtigung von Parametern wie z. B. Komfortanforderungen, NutzerInnenverhalten oder den vorherrschenden klimatischen Gegebenheiten verbessert werden. Als konkrete Maßnahmen für Betriebsoptimierungen können folgenden Beispiele angeführt werden: Anpassung der Betriebszeit von Gebäudetechnik an Nutzungsphase, primärer Betrieb des effizientesten Wärmeerzeugers (bei mehreren Erzeugereinheiten) durch Vorrangschaltung, Reduktion der Sollwerte für Vorlauftemperaturen von Heizung und Kühlung unter Einhaltung der Anforderungen an thermische Behaglichkeit.

2.4 Gebäudesimulationen und Monte-Carlo-Methode

Wie in der Problemstellung beschrieben, ist eine punktgenaue bzw. exakte Berechnung des Energiebedarfs von Gebäuden in der Planungsphase de facto unmöglich. Dies ist darauf zurückzuführen, dass in Energiebedarfsberechnungen die technischen Eigenschaften von Gebäuden wie z. B. Baukonstruktion, Bauphysik, Gebäudetechnik oder das NutzerInnenverhalten durch Parameter beschrieben werden, die nicht genau definierbar sind und somit als unsichere Randbedingungen gelten. Außerdem werden zu diesem Zeitpunkt in der Planung komplexe und aufwendige Zusammenhänge sowie Wechselwirkungen im Gebäudebetrieb zumeist pauschalisiert und vereinfacht betrachtet. Des Weiteren werden die bisherigen Ansätze für die Planung von Gebäuden und Anlagentechnik meist auf Basis von statischen Berechnungsmethoden und Auslegungsszenarien durchgeführt. Hierbei werden u. a. extreme Ereignisse, die jedoch nur mit geringer Wahrscheinlichkeit bzw. über einen kurzen Zeitraum in der Realität auftreten (z. B. Norm-Außentemperatur für Heizlastberechnung nach DIN EN 12831), berücksichtigt. Dies ist heutzutage für die Planung von energieeffizienten Gebäuden nicht mehr ausreichend und auch nicht

zielführend. Durch den Einsatz von dynamischen Gebäudemodellen können hierbei wesentliche Vorteile gegenüber den herkömmlichen Planungsstandards geniert werden. Dementsprechend sollten Gebäudesimulationen in jedem Planungsprozess für Gebäude als entscheidendes Werkzeug eingesetzt werden. Mit Hilfe der dynamischen Berechnungsmethoden können z. B. Wechselwirkungen einzelner Wärmetransportvorgänge zwischen NutzerInnen und Gebäudetechnik abgebildet bzw. analysiert werden. Dadurch ist es möglich, unsichere Randbedingungen wie z. B. das NutzerInnenverhalten oder Parameter in der TGA bzw. Betriebsfehler gebäudetechnischer Anlagen auf deren Einfluss sowie Wechselwirkungen in den Zielgrößen zu bewerten bzw. zu vergleichen. Um diese Dynamik und unsichere Randbedingungen in dynamisch-thermischen Gebäude- und Anlagensimulation abbilden zu können, wird im Rahmen dieses Forschungsprojektes die Monte-Carlo-Methode eingesetzt.

Die Monte-Carlo-Simulation (MCS) ist eine Methode aus dem Bereich der Stochastik, die auf Grundlage der häufigen Wiederholungen von gleichartigen Zufallsexperimenten funktioniert. Der Zweck dieser Analysen besteht darin, die Unsicherheit des Modells zu quantifizieren, die durch Variationen und Änderungen in den Eingangsvariablen verursacht wird. Aus diesem Grund wird die Simulation des Gebäude- und Anlagenmodells mit zufällig ausgewählten Eingangswerten häufig wiederholt. Bei MCSs werden die Eingangsgrößen durch Wahrscheinlichkeitsverteilungen (z. B. Normal-, Gleich- oder Dreiecksverteilung) beschrieben, anschließend mittels sogenannter Stichprobenverfahren (Sampling-Methoden) Werte aus diesen Verteilungen ausgewählt und in das Modell integriert (Pre-Processing). Durch die häufigen Wiederholungen der Simulationen wird eine Wahrscheinlichkeitsverteilung der Zielvariablen (Output) und nicht nur ein einziger Ergebniswert (Punktsimulation) erzeugt. Durch die Monte-Carlo-Methode in Kombination mit der Wahrscheinlichkeitstheorie können analytisch nicht oder nur aufwändig lösbare Probleme numerisch gelöst werden [Schmidt, 2016] [Maderspacher, 2017].

Die Basis zur Erstellung einer Verteilung des Outputs sind die zahlreichen Simulationsdurchläufe und somit ergibt sich z. B. für den Output „Primärenergiebedarf“ nach einer MCS nicht nur mehr ein Resultat. Folglich entsteht durch diesen Prozess eine Wahrscheinlichkeitsverteilung bei der im Falle einer Normalverteilung ein Erwartungswert (\bar{Y}) und eine Standardabweichung (sd) abgeleitet werden kann. Als Modellunsicherheit wird die resultierende Streuung des Outputs infolge der Variation von den Input-Parametern bezeichnet und kann mittels Unsicherheitsanalyse (UA) quantifiziert werden. Zur Bestimmung des Einflusses der veränderten Eingangsgrößen erfolgt ein Vergleich der Resultate von der Ausgangssituation (Punkt- bzw. Einzelsimulationen) mit den Ergebnissen der MCS. Dadurch kann u. a. nachvollzogen werden, ob bzw. wie häufig die Über- bzw. Unterschreitung von Zielwerten und mit welcher Eintrittswahrscheinlichkeit auftritt. Zusätzlich zu den statistischen Kenngrößen wie z. B. Erwartungswerte, Standardabweichungen bzw. Varianzen kann die UA im Bereich des Post-

Processings auch durch die grafische Darstellung des Modelloutputs in Form von Dichte- und Verteilungsfunktionen oder Box-Plots durchgeführt werden.

Im Gegensatz zur Unsicherheitsanalyse bei der die Gesamtunsicherheit des Ergebnisses eines statistischen Modells quantifiziert wird, untersucht die Sensitivitätsanalyse (SA) in wieweit die Änderung eines Input-Parameters den Änderungen des Outputs (Uncertainty) zugerechnet werden kann. Der Begriff „Sensitivitätsanalyse“ beschreibt somit das detaillierte Studium eines Simulationsmodells. Die systematische Veränderung der Eingangsvariablen eines Modells ermöglicht die Bestimmung des Einflusses der jeweiligen Inputs. Dadurch können in weiterer Folge u. a. die Input-Parameter nach Wichtigkeit bzw. Einfluss eingeordnet und darauf aufbauend ein Ranking erstellt werden. Jedoch können sich die angestrebten Ziele von SAs sehr differenziert darstellen. Im Rahmen von Sensitivitätsanalysen können u. a. die Nachweise, welcher Input die größte bzw. geringste Veränderung im Output bewirkt, in Form von qualitativen Erkenntnissen erbracht werden. Darüber hinaus ist durch die Berechnung von Totaleffekten auch möglich, diesen Einfluss genau zu quantifizieren und Aussagen zu treffen, um welchen Faktor ein Parameter den Modelloutput mehr beeinflusst als eine andere Eingangsgröße. Ein weiterer Anwendungsfall von Sensitivitätsanalysen besteht darin, für ein vorab definiertes Untersuchungsziel hinsichtlich des Modelloutputs (z. B. Minimum der Zielgröße) die jeweilige Parameterkombination zu identifizieren. Für diese Zwecke und Einsatzgebiete gibt es zahlreiche, unterschiedliche Sensitivitätsanalysemethoden. Jedoch hängt die finale Entscheidung für die Wahl des geeigneten Sensitivitätsindex von mehreren Faktoren ab. Einerseits gibt es Sensitivitätsanalysemethoden die nicht uneingeschränkt auf jedes beliebige Modell anwendbar sind und andererseits spielen der Berechnungs- und Analyseaufwand sowie das angestrebte Untersuchungsziel in Kombination mit dessen Aussagekraft eine große Rolle. Es ist auf alle Fälle sinnvoll, wenn Unsicherheitsanalysen mit Sensitivitätsanalysen im Rahmen von MCSs kombiniert werden. Durch die Kombination können Rückschlüsse gezogen werden, welche Variationen in den Eingangsgrößen die Hauptunsicherheitstreiber des Modelloutputs sind bzw. auf welche Input-Parameter die Hauptschwankungen im Ergebnis zurückzuführen sind [Schmidt, 2016] [Maderspacher, 2017].

Ganz allgemein ausgedrückt kann durch UAs und SAs die Robustheit eines Systems, sofern das System der Form eines statistischen Modells unterliegt, untersucht werden. Unter Robustheit wird in dieser Arbeit verstanden, wenn ein System möglichst stabil und nicht sensitiv auf veränderte bzw. abweichende Randbedingungen wie unsichere Eingangsgrößen z. B. Klimaveränderungen (Ambient-Gap), NutzerInnenverhalten (User-/Usage Gap) oder Betriebsfehler (Technical Gap) reagiert und trotz dieser Gegebenheiten im Gleichgewicht bleibt.

2.5 Analyse der Lebenszykluskosten

Durch die zunehmenden technischen Einsatzgebiete und Möglichkeiten der TGA und deren Automation steigen neben der Komplexität im Bauwesen auch gleichzeitig die Kosten für die Gebäudetechnik drastisch an. Auf Grundlage des Deutschen Baukostenindex (BKl) wird ersichtlich, dass der Anteil der Gebäudetechnik an den gesamten Baukosten mit der Ausführung und dem Standard des Gebäudes korreliert. Die Bandbreite erstreckt sich dabei von 7 % der Baukosten für die TGA bei Parkhäusern, über ca. 25 % für Büro- und Verwaltungsgebäude bis hin zu 35 % bei Laboren und Krankenhäusern. Bei Wohngebäuden lassen sich die Kostenunterschiede neben der Abhängigkeit zum Energiestandard auch im Hinblick auf einzelne Kostengruppen (KG) quantifizieren. In diesem Zusammenhang lässt sich festhalten, dass die KG 400 (technische Anlagen) für Standardgebäude durchschnittlich 15 % einnimmt und bei Passivhäusern bis ca. 21 % ansteigt. Die Kosten für KG 300 (Baukonstruktion) entfallen bei Ein- und Zweifamilienhäusern zu 47 % auf die Gebäudehülle und zu 33% für den Ausbau. Darüber hinaus haben weiterführende Berechnungen gezeigt, dass bei KG 300 insbesondere Außenwände bzw. Dach und bei KG 400 die Gebäudetechnik für das Heizen den größten Einfluss auf die Gesamtkosten verursachen. Dementsprechend müssen im Hinblick auf sinkende Lebenszykluskosten geeignete Lösungen für die Gebäudetechnik v. a. deren Heizzwecke angewendet und hierbei Gebäude mit Low-Tech Ansätzen verstärkt in den Fokus gerückt werden [Ritter, Mair et al., 2014].

Übergeordnet lässt sich festhalten, dass während der Planungs- und Bauphase in etwa 20 % der gesamten Lebenszykluskosten eines Gebäudes anfallen. Die restlichen 80 % der Kosten über den Lebenszyklus eines Gebäudes sind der Nutzungsphase zugehörig, welche sich aktuell in 60 % Betriebskosten und 40 % Energiekosten aufteilen [Siemens, 2018]. Diese Situation wird aktuell durch die steigenden Energiepreise weiter verschärft. In Deutschland sind die Kosten für Heizöl und Erdgas in kürzester Zeit stark angestiegen, die Preise für Strom sind dagegen in den letzten zwei Jahrzehnten kontinuierlich gestiegen [Statista, 2022]. Private Kunden zahlen ca. 40 % mehr als vor zehn Jahren, gewerbliche Kunden ca. 50 % und dadurch liegen die deutschen Strompreise im europaweiten Ranking auf Platz eins [Statista, 2022]. Der Gebäudesektor ist von den hohen Energiepreisen besonders betroffen. In Deutschland liegt der gebäuderelevante Endenergieverbrauch für Raumwärme und Kälte, Belüftung, Warmwasseraufbereitung und Beleuchtung bei ca. 35 % des gesamten nationalen Endenergieverbrauchs [BMW, 2019]. Die dadurch entstehenden Energiekosten infolge des Energieverbrauchs nach der Fertigstellung von Gebäuden betragen typischerweise ca. 32 % der gesamten Lebenszykluskosten eines Gebäudes [Siemens, 2018]. Dementsprechend besteht hierbei ein deutlicher und akuter Handlungsbedarf die Lebenszykluskosten zu reduzieren.

3 Experimentelles Design und methodischer Versuchsaufbau

3.1 Fehlererkennung und Fehlerdiagnose im Gebäudebetrieb

In diesem Kapitel wird die Entwicklung eines Modells zur Fehlererkennung in gebäudetechnischen Anlagen auf Grundlage von [Auer, Lauss et al., 2020] beschrieben. Dabei wird insbesondere auf den Betrieb von Raumluftechnischen (RLT) Anlagen fokussiert, da sich diese im Rahmen der Exploration als besonders häufige Fehlerquelle herausgestellt haben. Die Ursache dafür liegt u. a. an komplexen Schnittstellen zu den anderen Gewerken, welche aufgrund der umfangreichen thermodynamischen Prozesse wie heizen, kühlen, entfeuchten, befeuchten und Luftförderung sowie deren gesamte Automation in RLT-Anlagen ablaufen [Fisch, Plessner et al., 2007] [Réhault, Lichtenberg et al., 2014] [Schulz, Knodt et al., 2017] [Auer, Lauss et al., 2020]. Zu Beginn wird die Methodik erläutert, um danach auf die Modellgrundlage in Form von konkreten Betriebsregeln näher einzugehen. Die Beschreibung des Modells beinhaltet die einzelnen Schritte zur Durchführung der Analysen und erklärt die Modellnutzung vom Import der Daten, über die Eingaben zur Anlagenspezifikation bis hin zu den notwendigen Betriebsregeln und der finalen Auswertung.

Das Ziel ist es, ein regelbasiertes Modell zur Anwendung und Analyse von unterschiedlichen RLT-Anlagen zu entwickeln. Der Unterschied zwischen Vollklimaanlagen und Teilklima- bzw. Lüftungsanlagen besteht darin, dass für die unterschiedlichen thermodynamischen Prozesse mehr bzw. weniger Anlagenkomponenten und Bauteile vorhanden sein müssen. Daher wird die Erstellung der Betriebsregeln für Vollklimaanlagen vorgenommen und kann somit bei Bedarf an die jeweiligen Anlagenkonfigurationen angepasst werden. Durch diesen Prozess, die Regeln möglichst allgemeingültig und auf unterschiedliche Arten zu definieren sowie Alternativabfragen vorzusehen, wird eine hohe Übertragbarkeit und die potentielle Anwendung für das breite Spektrum an vorhandenen RLT-Anlagen ermöglicht. Aufgrund der Tatsache, dass nicht jede RLT-Anlage über die gleichen Datenpunkte verfügt, wird versucht mittels unterschiedlichen Datenpunkten den gleichen Informationsgehalt abzufragen. In diesem Zusammenhang kann z. B. der Betriebszustand der Anlage angeführt werden, welcher über den Status bzw. Stellsignal des Ventilators, über den Volumenstrom oder Zuluft-/Abluftdruck abgefragt wird. Die Datenpunkte aus der Gebäudeleittechnik sind in diesem Modell mit den definierten Anlagenparametern, Schwellen- bzw. Grenzwerte logisch verknüpft und somit können folglich fehlerhafte Betriebszustände aufgedeckt werden. Die Charakteristik von Betriebsfehlern wird auf diverse Indikatoren übertragen, welche auf Basis von Datenpunkten aus der GLT abgegriffen werden. Durch den Vergleich der modellierten mit der realen RLT-Anlage basierend auf den Betriebsdaten können Unregelmäßigkeiten und Probleme im Gebäudebetrieb markiert werden.

Die Programmierung des Modells zur automatischen Fehlererkennung wurde mit der Software R-Studio umgesetzt. Als Grundlage werden Automationsdaten von RLT-Anlagen realer Untersuchungsgebäude verwendet. Zu Beginn wird ein Datensatz der zu analysierenden Anlage benötigt und dieser sollte über ein gesamtes Betrachtungsjahr zur Verfügung stehen, um alle möglichen Betriebszustände untersuchen zu können. Im nächsten Schritt werden die Daten für den Import an eine definierte Struktur angepasst und zu dieser Vorverarbeitung zählen z. B. die Einteilung in gleichmäßige Zeitschritte, Überprüfung und Abgleich der Wetterdaten mit Wetterstationen des Deutschen Wetterdienst (DWD), Kontrolle bzw. Anpassung von Datenpunktbezeichnungen und Einheiten. Dieser Datenqualitätscheck ist von zentraler Bedeutung, um das standardisierte, regelbasierte Modell in weiterer Folge automatisiert anwenden zu können. Anschließend werden auf Basis von Funktions- und Anlagenbeschreibungen die spezifischen Eigenschaften wie z. B. Anlagentyp, Regelungsstrategien, definierte Betriebszeiten und Sollwerte, etc. eingetragen und in Kombinationen mit der jeweiligen RLT-Konfiguration bzw. den verknüpften Datenpunkten alle relevanten Betriebsregeln (siehe Anhang) zur Fehlererkennung ausgewählt.

3.2 Entwicklung dynamisch-thermischer Gebäudesimulationsmodelle mit Monte-Carlo-Methode

Dieses Kapitel widmet sich der Entwicklung von dynamisch-thermischen Gebäude- und Anlagensimulationen. Zu Beginn wird die methodische Vorgehensweise erklärt und darauf aufbauend erfolgt die Beschreibung der einzelnen Schritte zur Durchführung von Monte-Carlo-Simulationen. Dieser Prozess erstreckt sich von den notwendigen Vorverarbeitungsprozessen (Pre-Processing), über die gewählte Simulations- und Programmierumgebung bis hin zu den definierten Zielgrößen sowie den jeweiligen Auswertemethoden (Post-Processing).

Dadurch erfolgt die Berechnung von Energiebedarfen und thermischen Komfort auf Basis dynamischer Gebäude- und Anlagensimulationen für korrekte und fehlerhafte Betriebszustände von gebäudetechnischen Anlagen. Neben dem thermischen Verhalten der Gebäudemodelle werden auch Mess-, Steuer- und Regelungstechnische (MSRT) Parameter für die Bereiche von Heizungs-, Lüftungs- und Klimatechnik sowie Beleuchtung simuliert. Aufgrund der Tatsache, dass TGA-Systeme mehrere korrekte Betriebszustände einnehmen können (z. B. unterschiedliche Zulufttemperaturen, Vorlauftemperaturen, etc.), bewegen sich eine Vielzahl der Parameter in einem Wertebereich und sind nicht statisch zu betrachten. Zur Abbildung dieser Dynamik wird ein Prozess aufgebaut, der die statistische Variation unterschiedlicher Input-Parameter ermöglicht. Dieser Arbeitsablauf wird mittels Monte-Carlo-Simulationen durchgeführt und soll die große Bandbreite unterschiedlicher, korrekter bzw. in weiterer Folge von fehlerhaften Betriebszuständen darstellen. Durch den Einsatz der Monte-Carlo Simulationen, ist es möglich, die Ergebnisse der Zielgrößen in Form einer Verteilung bzw. Dichtefunktion darzustellen. Im Gegensatz dazu, würde bei einer

Punktsimulation lediglich ein Wert das Ergebnis widerspiegeln und keine Rückschlüsse auf unsichere Randbedingungen zulassen.

In einem ersten Schritt wird ein Gebäudemodell aufgebaut und die Komponenten der TGA in das Simulationsmodell implementiert, um diverse Gebäude bzw. Räume mit deren dazugehörigen Anlagentechnik und MSRT sowie bauphysikalischen Standards abbilden zu können. Darauf aufbauend werden Probleme bzw. Unregelmäßigkeiten sowie Betriebsfehler und das NutzerInnenverhalten in das Modell integriert, wodurch Technical Gaps und User-/Usage Gaps simuliert werden. In dem Betriebsfehler mit unterschiedlichen Fehlercharakteristika modelliert werden, entsteht dadurch eine Vielzahl an Simulationen mit fehlerhaften Datensätzen. Zu diesem Zweck wird eine Methodik zur dynamischen Variabilität aufgebaut, um auch die Variation weiterer unsicherer Randbedingungen wie z. B. unerwartetem Nutzerverhalten oder klimatischen Veränderungen zu implementieren. Nach dem vollständigen Aufbau des Modells, erfolgt der Simulationsprozess in Kombination mit Sensitivitäts- und Unsicherheitsanalysen.

Durch die Simulation der anvisierten Lastgänge werden synthetische Daten sowohl zum korrekten bzw. angestrebten als auch zum fehlerhaften Betrieb durch die Implementierung definierter Betriebsfehler bzw. unerwartetem Nutzerverhalten erzeugt. Dadurch kann die Quantifizierung der Auswirkungen von Betriebsfehlern und die Identifikation von robusten Systemen in der TGA vorgenommen werden. Neben einer energetischen Betrachtung erfolgt auch eine Behaglichkeitsanalyse mittels der Unterstützung durch Simulationsmodelle.

Prozessschritte zur Durchführung von Monte-Carlo-Simulationen

Pre-Processing

Bei Monte-Carlo-Simulationen erfolgt die Beschreibung der Input-Parameter mittels Wahrscheinlichkeitsverteilungen. Die Verteilungen können auf Grundlage von Messergebnissen oder Literatur- und Planungswerten für die jeweilige Eingangsgröße bzw. physikalischen Grenzwerten bei Betriebsfehlern definiert werden. Darüber hinaus sollte die Wahrscheinlichkeitsverteilung abhängig von der Charakteristik des jeweiligen Input-Parameters gewählt werden. Für den weiteren Simulations- und Auswertungsprozess ist die Auswahl der möglichst korrekten und realen Verteilungen von besonderer Bedeutung.

Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens werden in diesem Zusammenhang zu Beginn relative SAs/UAs, bei denen alle Eingangsgrößen mit identischer Verteilung gleichgewichtet werden, durchgeführt. Darauf aufbauend kommen spezifische SAs/UAs, wo die Wahrscheinlichkeitsverteilungen in Abhängigkeit der jeweiligen Eigenschaften des Inputs definiert werden, zum Einsatz. Generell werden für die spezifischen Analysen folgende Möglichkeiten für die Auswahl der Verteilungen herangezogen: Normalverteilung, Logarithmische Normalverteilung,

Gleichverteilung, Dreiecksverteilung. Bei Monte-Carlo-Simulationen schlägt sich die Durchführung der Stichprobenentnahme sowohl in der Aussagekraft der Ergebnisse als auch in der Rechenzeit des gesamten Prozesses nieder. Dementsprechend wird bei der Wahl der Sample-Methode angestrebt, die Werte der Wahrscheinlichkeitsverteilung mit einer möglichst kleinen Anzahl an Stichproben detailliert abzubilden. Der Simulationsumfang bzw. Rechenaufwand wird in weiterer Folge durch die Stichprobenanzahl bestimmt, da diese mit der Menge an Modellsimulationen gleichzusetzen ist. Im Rahmen dieser Forschungsarbeit werden als Sampling-Methode Sobol-Sequenzen verwendet und als Stichprobenumfang werden 120 Simulationen je Durchlauf gewählt [Lauss, Auer, 2020]. Der Sobol-Algorithmus charakterisiert sich durch eine effiziente Probennahme und ermöglicht die gleichmäßige Verteilung der Stichproben über den gesamten Parameterraum. Der wesentliche Vorteil dieser Variante gegenüber anderen Sampling-Methoden wie z. B. Latin-Hypercube oder Random-Sampling besteht darin, dass hierbei die Merkmalsträger unter Berücksichtigung der zuvor einbezogenen Punkte ausgewählt werden. Resultierend ermöglichen Sobol-Sequenzen, durch das schnellere Konvergieren des geschätzten Mittelwertes einer Funktion zu seinem wahren Mittelwert, einen effizienteren Simulationsprozess.

Monte-Carlo-Simulationen

Im Gegensatz zu konventionellen Gebäudesimulationen, bei denen als Ergebnis nur ein einzelner Wert für die Zielgröße (z. B. Primärenergiebedarf) ausgegeben wird, werden im Rahmen dieser Forschungsarbeit Monte-Carlo-Simulationen durchgeführt. Mit der stochastischen Methodik von Monte-Carlo-Simulationen kann durch die häufige Veränderung der Input-Parameter die Modellunsicherheit quantifiziert werden. Dadurch können auch Angaben und Auswertungen zu den Erwartungswerten, Standardabweichungen und Varianzen der Ergebnisse, die durch unsichere Eingangsgrößen entstehen, gemacht werden.

Die Modellierung und Durchführung der dynamisch-thermischen Gebäude- und Anlagensimulationen erfolgt mittels der kommerziellen Software „IDA Indoor Climate and Energy (IDA ICE)“ [IDA, 2022] Version 4.8 SP2. Als Zielgrößen werden für alle Simulationen und Untersuchungsmethoden die Bereiche von Energie Performance Gap und Komfort Performance Gap ausgewählt. Dadurch können die Auswirkungen und Wechselwirkungen zwischen Energiebedarf und thermischen Komfort gesamtheitlich beurteilt und bewertet werden.

- Energie Performance Gap: Auswirkungen auf Energiebedarfe (Primärenergiebedarf / Endenergiebedarfe für Heizung bzw. Kühlung)
- Komfort Performance Gap: Auswirkungen auf thermische Behaglichkeit und NutzerInnenkomfort (Über- und Untertemperaturgradstunden)

Post-Processing

Im Bereich des Post-Processing werden die bereits in Kapitel 2.4 „Gebäudesimulationen und Monte-Carlo-Methode“ beschriebenen Unsicherheits- und Sensitivitätsanalysen angewendet. Darin wurde auch erläutert, dass für SAs je nach Untersuchungsziel zahlreiche Sensitivitätsanalysemethoden eingesetzt werden können. Im Rahmen dieses Projekts werden die folgenden Auswertemethoden als Sensitivitätsindizes verwendet und miteinander verglichen.

Korrelationskoeffizienten

Bei der Analyse des Energiebedarfs von Gebäuden werden sehr häufig Regressionsanalysen verwendet und diese können als die am weitesten verbreitete Sensitivitätsanalysemethode angesehen werden. In dieser Arbeit wird als Korrelationskoeffizient die Rangtransformationen SRRC (Standardized Rank Regression Coefficients) verwendet. Der Vorteil des SRRC gegenüber anderen Korrelationskoeffizienten besteht darin, dass dieses Sensitivitätsmaß nicht der Einschränkung von einem linearen Zusammenhang zwischen Input und Output unterliegt. In diesem Fall sind die Ergebnisse robuster und basieren nicht auf der Stichprobe, sondern auf der Reihenfolge der Realisierungen, dem Rang. Das Bestimmtheitsmaß gibt Auskunft über die Güte von Korrelationskoeffizienten und liegt immer im Wertebereich zwischen 0 und 1; wenn der Korrelationskoeffizienten gegen 1 tendiert, wird von einem starken Zusammenhang ausgegangen und dementsprechend höher ist die Konvergenz.

Streudiagramme

Ein weiteres Verfahren für Sensitivitätsanalysen stellt die Auswertung mit Streudiagrammen dar, wo in einer Grafik die Werte der Eingangsgrößen (x-Achse) gegen die Ergebniswerte der jeweiligen Zielgröße (y-Achse) geplottet werden. Durch die grafische Darstellung bzw. Form und Charakteristik der Plots lassen sich aussagekräftige und robuste Erkenntnisse zu sensitiven Eingangsgrößen ableiten. Wenn sich die Punkte über die gesamte Grafik gleichmäßig verteilen, weist dies auf einen nicht sensitiven bzw. kaum einflussreichen Input hin. Im Gegensatz dazu, bedeutet eine ungleichmäßige bzw. lineare Verteilung der Punkte, dass hier ein wesentlicher Zusammenhang zwischen dem Input-Parameter bzw. der Zielgröße besteht und als sensitive bzw. einflussreiche Eingangsgröße gewertet wird. Um in weiterer Folge die Inputs anhand ihrer Sensitivität zu ordnen und eine Reihenfolge der Eingangsgrößen zu erstellen, wird in dieser Forschungsarbeit der Algorithmus „Conditional Variances - Second Path“ angewendet. Ein großer Vorteil der Streudiagramme gegenüber der Verwendung von Korrelationskoeffizienten besteht darin, dass keine Restriktionen in Bezug auf eine lineare bzw. nicht lineare oder monotone bzw. nicht monotone Beziehung der Daten vorhanden sind.

Varianzbasierte Sensitivitätsanalyseverfahren mittels Sobol'- & Jansen Schätzer

Des Weiteren werden ausgewählte Parameter im Abschnitt der spezifischen MCS mit der rechenintensiven Methode der Sobol'- & Jansen Schätzer simuliert, wodurch sowohl der Einfluss auf die Zielgrößen als auch die Interaktionen zwischen den Parametern bestimmt werden können. Zu diesem Zweck muss die Anzahl der untersuchten Eingangsgrößen vorab eingeschränkt werden und dieser Selektierungsprozess für die wichtigsten Parameter wird in den relativen Monte-Carlo-Simulationen durchgeführt. Im Rahmen dieser Vorstudie werden Korrelationskoeffizienten und Streudiagramme aufgrund des erheblich reduzierten Stichprobenumfangs eingesetzt. Das varianzbasierte Sensitivitätsanalyseverfahren mittels Sobol'- & Jansen Schätzer ist unabhängig von der Art des zu betrachtenden Modells einsetzbar und ermöglicht eine Unterscheidung zwischen der direkten Wirkung eines Parameters und der Interaktion mit anderen Größen. Die Wechselwirkungseffekte werden durch Terme höherer Ordnung berücksichtigt und im weiteren Verlauf der Arbeit als Totaleffekte (Intervall [0; 1]) beschrieben.

3.3 Berechnungsmethodik der Lebenszykluskosten

Um die gebäudebezogenen Lebenszykluskosten zu berechnen, wird die Barwertmethode in Anlehnung an das Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen (BNB) verwendet. Bei der Barwertmethode handelt es sich um ein dynamisches Verfahren bei dem die Kosten, die zu einem späteren Zeitpunkt anfallen, über eine Preissteigerungsrate auf den Wert des jeweiligen Zeitpunktes hochgerechnet werden. Die Kostenwerte werden anschließend über einen Diskontierungszinssatz auf den Gegenwartswert, den sogenannten Barwert heruntergerechnet. Der Barwert wird für einen Betrachtungszeitraum von 50 Jahren ermittelt und wird als Nettobetrag angegeben bzw. als Vergleichswert auf die Bruttogrundfläche bezogen. Da in diesem Projekt die Berechnung der Lebenszykluskosten für Bestandsgebäude durchgeführt wird, werden die Erstherstellungskosten für Baukonstruktion und technischen Anlagen untergeordnet betrachtet und ausgeklammert. Die Barwertmethode wird auf folgende ausgewählte Kostengruppen bzw. Nutzungskosten nach DIN 18960 angewendet:

KG 312 - 316: Versorgungs- Öl, Gas, feste Brennstoffe, Fernwärme, Strom

KG 352: Inspektion und Wartung der Baukonstruktion

KG 353: Inspektion und Wartung der TGA

KG 410: Instandsetzung der Baukonstruktion

KG 420: Instandsetzung der TGA

Sowohl die angenommenen Nutzungsdauern der Bauteile als auch die Zinssätze für Wartung und Inspektion, Zinssätze für Laufende Instandsetzung, Energie und Medienpreise, Preissteigerungsraten und Diskontierungssatz zur Berechnung der Lebenszykluskosten werden auf Basis des Bewertungssystems Nachhaltiges Bauen verwendet. Um die Kosten für Ersatzinvestitionen, regelmäßige Instandsetzung, Inspektion und Wartung zu berechnen, werden die jeweiligen Kalkulationszinssätze mit den Baukosten verrechnet. Die Orientierungswerte (Nettopreise in €) zur Kostenfeststellung der Baukosten werden aus den Datenbanken Baupreislexikon und Baukosteninformationszentrum Deutscher Architektenkammern (BKI) entnommen. Die Energiekosten werden zum einen mit den Endenergiebedarfen der vorhandenen Energieausweise (gemäß Energieeinsparverordnung EnEV) der beiden Untersuchungsobjekte berechnet und zum anderen mit den Endenergiebedarfen aus den dynamisch-thermischen Gebäudesimulation verglichen.

4 Durchführung von Feldstudien und Untersuchungen

4.1 Erkennung und Identifikation von Betriebsfehlern im Gebäudebetrieb

Die im Kapitel 3.1 „Fehlererkennung und Fehlerdiagnose im Gebäudebetrieb“ beschriebene Methodik wird nun anhand des entwickelten, regelbasierten Modells zur Analyse und Fehlererkennung in gebäudetechnischen Anlagen exemplarisch angewendet. Der Fokus der Untersuchungen liegt hierbei auf RLT-Anlagen. Wie bereits zuvor beschrieben stellen diese durch die komplexen Schnittstellen zu den anderen Gewerken und die umfangreichen thermodynamischen Prozesse, eine besonders häufige Fehlerquelle dar. Dementsprechend werden vorrangig unterschiedliche RLT-Anlagen aus verschiedenen Nutzungseinheiten von zwei Nicht-Wohngebäuden in München untersucht.

Auswahl und Beschreibung der Untersuchungsgebäude

Die Auswahl der Anlagen erfolge nach zwei wesentlichen Gesichtspunkten. Zum einen wurden RLT-Anlagen ausgewählt, für die in der Gebäudeleittechnik eine große Anzahl von Datenpunkten verknüpft war. Zum anderen wurden unterschiedliche Anlagentypen bzw. raumluftechnische Konfigurationen (z. B. Vollklimaanlage, Teilklimaanlage) untersucht, um ein breites Spektrum an möglichen Ergebnissen hinsichtlich Betriebsfehlern zu erlangen.

Es wurden die Betriebsdaten aus dem Jahr 2019 (01.01 – 31.12) der Liegenschaft „THE m.pire“ in München betrachtet. Für dieses Forschungsprojekt konnte die Bayerischen Hausbau GmbH & Co. KG (BayHB) als Kooperationspartner gewonnen werden und „THE m.pire“ gehört zum unternehmenseigenen Immobilienbestand, wodurch Automationsdaten zur Verfügung gestellt wurden. Der Gebäudekomplex besteht aus einem Hochhaus mit 23 Stockwerken sowie zwei fünfgeschossigen und zwei siebengeschossigen Campusgebäuden. Die fünf vollverglasteten Objekte erstrecken sich über eine Gesamtfläche von 46500 m² und darin sind insgesamt ca. 2000 Arbeitsplätze mit überwiegender Büronutzung angesiedelt. Alle Gebäude sind mit zwei zentralen RLT-Anlagen ausgestattet, die baugleich ausgeführt sind und jeweils den Nord- und Süd-Abschnitt der Objekte versorgen. Aufgrund der Tatsache, dass alle RLT-Anlagen in den fünf Gebäuden dem gleichen Aufbau unterliegen und sich einzig in der Größe unterscheiden, wird die Untersuchung der Betriebsdaten anhand von drei repräsentativen RLT-Anlagen durchgeführt.

Das zweite Untersuchungsobjekt sind Gebäude bzw. RLT-Anlagen auf dem Stammgelände der Technischen Universität München (TUM). Das gesamte Areal besteht aus 20 Gebäuden, die überwiegend als Vorlesungsräume bzw. für Büroräumlichkeiten verwendet werden. Mit den Betriebsdaten aus dem Jahr 2019 (01.01 – 31.12) werden die Anlagen des 198 m² großen Theodor-Fischer-Hörsaals HS 0360, des 5653 m² großen Audimax, des 180 m² großen Hörsaals im

Theresianum sowie die Anlage A1.1 im Gebäude 0505 an der Luisenstraße, die 20 Räume mit einer Gesamtfläche von 1257m² versorgt, untersucht.

Identifizierte Betriebsfehler im Gebäudebetrieb

Auf Basis der bereitgestellten Automationsdaten konnten in den Demonstrationsgebäuden zahlreiche Unregelmäßigkeiten und Probleme im Gebäudebetrieb markiert werden. Die unten dargestellte Abbildung 2 zeigt die identifizierten Betriebsfehler in den zwei Untersuchungsgebäuden. Dabei werden die Betriebsfehler in vier übergeordnete Fehler-Kategorien eingeteilt: „Sollwerte“, „Abhängigkeiten und Zusammenspiel“, „Leistungen“ und „Betriebszeiten“. Insbesondere in der Kategorie der „Sollwerte“ können Betriebsfehler durch das Über- bzw. Unterschreiten von definierten Grenz- und Schwellenwerten resultieren. Durch die Fehlerdiagnose wird in diesem Bereich eine genaue Differenzierung hinsichtlich der Charakteristik des auftretenden Betriebsfehlers vorgenommen. Die nächste Spalte gibt die Anzahl von Gebäuden an, in welchen der jeweilige Betriebsfehler identifiziert werden konnte. Beispielsweise konnte der Betriebsfehler „Überschreitung der maximalen Temperaturdifferenz zwischen Zuluft und Raumluft (Abluft)“ in der Kategorie „Sollwerte“ anhand von sechs RLT-Anlagen getestet und auch in allen nachgewiesen werden. Im Gegensatz dazu, ist die Überprüfung der Sollwerte für die Zuluftfeuchte ausschließlich in zwei RLT-Anlagen aufgrund deren Konfiguration als Vollklimaanlage möglich, weshalb die Aussagekraft in diesem Fall eingeschränkt ist. In Kombination mit der Angabe der Anzahl wird in weiterer Folge die Häufigkeit des Betriebsfehlers während der Betriebszeit je Gebäude angegeben und daraus das arithmetische Mittel berechnet. Die Betriebsfehler, bei denen sowohl die Anzahl als auch das arithmetische Mittel einen hohen Wert aufweist, sind jene die am häufigsten und am längsten aufgetreten sind. Hierzu zählen insbesondere die Betriebsfehler in der Kategorie „Sollwerte“ wie z. B. „Überschreitung max. Temperaturdifferenz Zuluft / Raumluft (Abluft)“ (6/6; 54,9 %), „Zulufttemperatur Unterschreitung“ (6/6; 44,3 %), „Zulufttemperatur Überschreitung“ (6/6; 21,8 %), „Unterschreitung min. Sollwert Zulufttemperaturbegrenzung“ (4/6; 29,1 %) oder im Bereich der „Betriebszeit“ der Betriebsfehler „Überschreitung definierte Betriebs-/Laufzeit“ (3/6; 28,2 %).

In weiterem Verlauf dieses Forschungsvorhabens wird die Fehlercharakteristik der identifizierten Betriebsfehler in den Bereich Simulationen übertragen, um dort weiterführend die Auswirkungen von Betriebsfehlern hinsichtlich Energiebedarf (Energie Performance Gap) und thermischen Komfort (Komfort Gap) zu untersuchen.

| Kategorie | Betriebsfehler | Differenzierung | Anzahl [1] | Häufigkeit Gebäude einzeln [%] | Häufigkeit Arithmetisches Mittel [%] |
|--|--|-----------------|------------------|--|--------------------------------------|
| Sollwerte | Messfehler Sensoren (Offset) | Überschreitung | 1/1 | 8,2 | 8,2 |
| | | Unterschreitung | 0/1 | - | 0,0 |
| | Abweichung Sollwert Zulufttemperatur | Überschreitung | 6/6 | 43,4 / 26,1 / 10,1 / 11,9 / 8,8 / 30,1 | 21,8 |
| | | Unterschreitung | 6/6 | 39,2 / 62,1 / 75,4 / 9,9 / 77,0 / 2,4 | 44,3 |
| | Abweichung Sollwert Ablufttemperatur | Überschreitung | 1/1 | 15,8 | 15,8 |
| | | Unterschreitung | 1/1 | 13,1 | 13,1 |
| | Abweichung max./min. Sollwert Zulufttemperaturbegrenzung | Überschreitung | 1/6 | 6,4 | 6,4 |
| | | Unterschreitung | 4/6 | 68,1 / 63,6 / 40,7 / 1,7 | 29,1 |
| | Abweichung gleitender Sollwert Raum - bzw. Ablufttemperatur | Überschreitung | 1/6 | 1,8 | 1,8 |
| | | Unterschreitung | 4/6 | 1,4 / 1,4 / 7,0 / 2,0 | 3,0 |
| | Überschreitung max. Temperaturdifferenz Zuluft/Raumluft (Abluft) | - | 6/6 | 68,1 / 67,4 / 54,9 / 46,6 / 2,0 / 90,7 | 54,9 |
| | Abweichung Sollwert Zuluftfeuchte | Überschreitung | 2/2 | 85,2 / 72,4 | 78,8 |
| | | Unterschreitung | 2/2 | 8,2 / 17,2 | 12,7 |
| | Abweichung Sollwert Zuluftdruck | Überschreitung | 0/3 | - | 0,0 |
| Betriebszeiten | Abweichung Sollwert Abluftdruck | Überschreitung | 3/3 | 3,2 / 53,1 / 6,7 | 21,0 |
| | | Unterschreitung | 0/3 | - | 0,0 |
| | Überschreitung Grenzwert max. CO ₂ -Konzentration | Überschreitung | 3/3 | 13,4 / 3,5 / 6,9 | 8,0 |
| | Abweichung von definierter Betriebs-/Laufzeit (Zeitabhängiger Betrieb) | - | 1/2 | 6,1 | 6,1 |
| | | Überschreitung | 3/6 | 22,6 / 22,6 / 39,3 | 28,2 |
| | | Unterschreitung | 0/6 | - | 0,0 |
| | Betriebszeitunterschreitung Nachtkühlbetrieb: Voraussetzungen für Nachtkühlbetrieb gegeben, aber Ventilator nicht in Betrieb | - | 1/2 | 11,6 | 11,6 |
| | Freie direkte Kühlung: Voraussetzung für freie direkte Kühlung gegeben, aber Außenluftanteil ist nicht 100% oder WRG läuft | - | 1/2 | 1,7 | 1,7 |
| | Fehlerhafte Ventilatorenregelung: Zu- und Abluftventilator nicht gleichzeitig in Betrieb (bidirektionale RLT-Anlagen) | - | 1/4 | 1,2 | 1,2 |
| | Fehlerhafte Klappenregelung: Umluftklappe wird nicht gleichzeitig zu Außen- und Fortluftklappe geregelt | - | 1/1 | 10,7 | 10,7 |
| | Fehlerhafte Klappenregelung: Außen- und Fortluftklappe arbeiten gegengleich zum Ventilator | - | 2/4 | 8,9 / 9,3 | 9,1 |
| | Gleichzeitiges Heizen und Kühlen (Teilklimaanlage) | - | 1/4 | 6,3 | 6,3 |
| | Gleichzeitiges Heizen und Kühlen: Ausgangszustand „Entfeuchten (und Heizen)“ und Vorehitzer oder WRG ist in Betrieb | - | 1/2 | 11,8 | 11,8 |
| | Leistung des Luft-Vorheiz-Registers nicht ausreichend | - | 2/3 | 0,1 / 0,2 | 0,2 |
| Leistung des Luft-Kühl-Registers nicht ausreichend | - | 3/5 | 3,6 / 1,8 / 13,6 | 6,3 | |
| Leistung des Luft-Nachheiz-Registers nicht ausreichend | - | 1/1 | 0,7 | 0,7 | |
| Leistung des Luft-Befeuchters nicht ausreichend | - | 2/2 | 3,3 / 1,6 | 2,5 | |

Abbildung 2: Zusammenstellung und Auswertung der Betriebsfehler und Häufigkeiten

4.2 Gebäudesimulationen und Parameterstudien Generisches Gebäudemodell

4.2.1 Modellierung und Simulationen

Um die Auswirkungen von Betriebsfehlern und unerwartetem NutzerInnenverhalten im Hinblick auf den Energiebedarf und thermischen Komfort quantifizieren zu können, wird im nächsten Arbeitsschritt ein generisches Gebäudemodell aufgebaut.

Das definierte Gebäudemodell soll ein für Deutschland möglichst typisches und repräsentatives Bürogebäude abbilden. Hierfür wurde als Grundlage das Mustergebäude nach VDI 6009-1 gewählt und dadurch ein Mix aus Ein-, Zwei und Mehrpersonenbüros am Standort München abgebildet. Der weitere Aufbau des Modells orientiert sich ebenfalls an den Randbedingungen des Nutzungsprofils für Einzel- bzw. Gruppenbüros nach DIN V 18599-10.

Aufgrund der Tatsache, dass die meisten Betriebsfehler während der Betriebsphase auftreten, wird das Gebäudemodell nicht als aktueller Neubaustandard, sondern als Bestandsgebäude abgebildet. Nichtsdestotrotz orientiert sich der Energiestandard des Modells an neueren Gebäuden, die mit entsprechender Gebäudetechnik ausgestattet sind. Resultierend wird der Energiestandard in Anlehnung an die DIN EN 15232-1, in der auf die Ermittlung der Energieeffizienz durch Gebäudeautomation fokussiert wird und somit in ähnlichem Kontext zu dieser Arbeit steht, gewählt. Dementsprechend wird in weiterer Folge ein neueres Bestandsgebäude, aber kein Neubaustandard untersucht. Auf Raumebene werden die internen Wärmegewinne nach DIN V 18599-10 bzw. DIN EN 15232-1 und die Belegungs- bzw. Nutzungsprofile von Personen (07:00 bis 18:00 Uhr) nach DIN V 18599-11 abgebildet. Für die interne Last durch Personenwärme werden pro Person 100 W angesetzt; damit entspricht der Wert nach DIN V 18599-10 einer mittleren Belegungsdichte. Sowohl für den Bekleidungsgrad als auch das Aktivitätslevel werden Standardwerte für Büronutzungen angesetzt. Hinsichtlich der solaren Wärmegewinne und zur Unterstützung des sommerlichen Wärmeschutzes wird die Verschattung der Fenster mit einem außenliegenden Sonnenschutz modelliert. Die Raumluftkonditionen werden ebenfalls in der DIN V 18599-10 vorgeschrieben und hierbei sind für das Heizen 21°C (minimaler Raumlufttemperatur-Sollwert) und für die Kühlung 24 °C (maximaler Raumlufttemperatur-Sollwert) angegeben. Außerdem wird darin geregelt, dass die Gebäudetechnik aufgrund von Aufheizvorgängen bzw. Frischluftspülungen der Räume durch die RLT-Anlage zwei Stunden vor dem Belegungsprofil der NutzerInnen in Betrieb geht und somit von 05:00 bis 18:00 Uhr aktiv ist. Zwischen 18:00 und 05:00 Uhr ist ein Absenkbetrieb vorgesehen und hierbei reduziert sich der minimale Raumlufttemperatur-Sollwert um 4 K [DIN V 18599-10].

Im Bereich der Gebäudetechnik wird die mechanische Lüftung als Teilklimaanlage (TKA) mit den folgenden Komponenten modelliert: Zuluft- und Abluftventilatoren, Umluftklappe, Wärmerückgewinnung (WRG), Vor- und Nachheizregister sowie Kühlregister. Dementsprechend sind die thermodynamischen Luftbehandlungsfunktionen heizen, kühlen, entfeuchten für die

Konditionierung zur Zu- und Abluftversorgung der Büroräume verantwortlich. Die modellierte RLT-Anlage orientiert sich an der Kategorie „Gebäudetechnik – Raumluftechnik“ des VDI-Mustergebäudes nach VDI 6009-1, welche ebenfalls als TKA ausgeführt ist. Außerdem konnte in der Exploration und Literaturrecherche festgestellt werden, dass in Büro- und Verwaltungsgebäuden die RLT-Anlagenkonfiguration dreimal so häufig als Teilklimaanlage ausgeführt ist, als wie Vollklimaanlagen [Werner, Chmella-Emrich et al., 2008]. Nach DIN 18599-10 ist pro Person ein Zuluftvolumenstrom von 40 m³/h zu gewährleisten und der Betriebsmodus wird mit konstantem Volumenstrom (CAV) bzw. mit ablufttemperaturabhängiger Zulufttemperaturregelung modelliert. Hinsichtlich der Raumlufqualität dient die CO₂ Konzentration als Indikator und nach [DIN EN 16798-1] darf diese um maximal 500 ppm im Vergleich zur Außenluftkonzentration ansteigen. Für die Auslegung der Ventilatoren wurden in Abhängigkeit des abgebildeten Gebäudestandards entsprechende Werte für die spezifische Ventilatorleistung (Specific Fan Power SFP) gewählt. Der Differenzdruck der Anlage beträgt 600 Pa für die Zuluft bzw. 500 Pa für die Abluft und wird jeweils durch einen Abluft- und Zuluftventilator mit einem Ventilatorwirkungsgrad von 65 % gefördert [Schramek, Recknagel et al., 2011]. Das Vorheiz- bzw. Nachheizregister wird mit Systemtemperaturen von 70 °C Vorlauftemperatur und 55 °C Rücklauftemperatur, das Kühlregister mit 6 / 12 °C, betrieben [DIN V 18599-7]. Die Funktion des Nachheizregisters beschränkt sich (in Kombination mit dem Kühlregister) ausschließlich auf Entfeuchtungsprozesse und wird als Taupunktregelung modelliert. In der [DIN EN 16798-1] sind die Grenzwerte für die relative Feuchte in der Raumluf mit 25 % r. F. bzw. 60 % r. F. angegeben und somit werden die beiden Aggregate aktiv sobald der obere Schwellenwert überschritten wird. Durch die Umluftklappe wird die notwendige Menge der nachströmenden Außenluft bedarfsabhängig geregelt und dient dazu, die Anlage effizienter zu betreiben bzw. einen geringeren Anteil des Zuluftvolumenstroms vollständig konditionieren zu müssen. Die Bereitstellung der Heizenergie zur Raumwärmeversorgung mittels Radiatoren und zur Konditionierung der Zuluft in den Heizregistern der Raumluftechnischen Anlage erfolgt durch einen modulierenden Gas-Brennwertkessel. Die Versorgung des Kühlregisters in der RLT-Anlage wird durch eine Kompressionskältemaschine (KKM) abgebildet, da diese Form der Energieumwandlung für Kälteprozesse die am häufigsten eingesetzte Variante in Bürogebäuden ist [Kube, Schimmel et al., 2017].

4.2.2 Vorbereitungen und Klassifikation zur Durchführung der Monte-Carlo-Simulationen

Das beschriebene generische Gebäude- und Anlagen-Simulationsmodell bildet die Grundlage zur Untersuchung des Einflusses von Technical Gaps und User-/Usage Gaps sowie weiteren unsicheren Randbedingungen auf den Energiebedarf und thermischen Komfort. Zur besseren Übersichtlichkeit der umfangreichen Betrachtungen aller Eingangsgrößen, werden im Folgenden

sogenannte Parametergruppen eingeführt. In den drei Parametergruppen A / B / C werden die unterschiedlichen Bereiche der Inputs zusammenfasst und diese setzen sich wie folgt zusammen:

- Parametergruppe A: Betriebsfehler (inkl. Bedien- und NutzerInnenfehler)
- Parametergruppe B: Konstruktive bzw. bauphysikalische Faktoren und Sollwerte Raumkonditionierung
- Parametergruppe C: Bauliche bzw. Mess-, Steuerungs- und Regelungstechnische (MSRT) Aspekte gebäudetechnischer Anlagen

Wie bereits im Kapitel 3.2 „Entwicklung dynamisch-thermischer Gebäudesimulationsmodelle mit Monte-Carlo-Methode“ beschrieben, ist die Definition von entsprechenden Wahrscheinlichkeitsverteilungen bzw. deren Wertebereichen ausschlaggebend für den weiteren Untersuchungsverlauf. Diese Entscheidungen für jeden Input-Parameter wirken sich in weiterer Folge sowohl auf die Unsicherheitsanalysen der Modelle als auch auf die Sensitivität der Eingangsgrößen aus und können dadurch stark beeinflusst werden. Deswegen wird im Rahmen dieses Forschungsvorhaben ein mehrstufiges Simulationsrahmenwerk aufgebaut, um hierbei diesen Anforderungen und einem hohen Detaillierungsgrad gerecht zu werden.

Die Monte-Carlo-Simulationen für das generische Referenz- und Anlagenmodell werden im ersten Schritt als relative Unsicherheits- bzw. Sensitivitätsanalysen und anschließend als spezifische UAs/SAs ausgeführt. Im Bereich der relativen Analysen wird für jeden Input die Wahrscheinlichkeitsverteilung mit einer Normalverteilung von $\pm 5\%$ Standardabweichung, in Anlehnung an [Hopfe, Hensen, 2011] [Ioannou, 2015], beschrieben. Durch die einheitliche Standardabweichung wird die gleiche Gewichtung aller Parameter sichergestellt, wenngleich diese Analyseform eine sehr theoretische Betrachtungsweise darstellt. Nichtsdestotrotz besteht der Vorteil dieser Methodik darin, dass auch Input-Parameter berücksichtigt werden können, für die keine zugrundeliegenden Informationen (z. B. fehlende Messwerte) verfügbar sind. Durch die relativen MCSs wird vorrangig auf eine erste Differenzierung der sensitiven und weniger sensitiven Eingangsgrößen abgezielt, um für die weiteren Bearbeitungsschritte eine Vorauswahl der Inputs treffen zu können.

Für den zweiten Schritt, den spezifischen UAs und SAs, wird die Auswahl der Wahrscheinlichkeitsverteilungen und Wertebereiche in Abhängigkeit der Eigenschaften und Charakteristik jedes einzelnen Parameters getroffen. Durch die Voruntersuchungen auf Basis der relativen UAs / SAs konnte die Anzahl der hierbei zu untersuchenden Eingangsgrößen bereits reduziert werden.

Die Betriebs-, Bedien- und NutzerInnenfehler in Parametergruppe A werden primär mit Gleichverteilungen abgebildet. Als Begründung dafür lässt sich anführen, dass Fehler über den

gesamten Wertebereich von 0 % bis 100 % variieren und hinsichtlich ihrer Fehlerausprägung mit gleicher Wahrscheinlichkeit auftreten können (z. B. klemmende Ventilstellung). Im Vergleich dazu wird eine Vielzahl der Eingangsparameter in den Parametergruppen B & C nicht mit den physikalisch möglichen Minimal- und Maximalwerten abgebildet, sondern die Auswahl wird auf Grundlage von Erkenntnissen aus der Literaturrecherche und Exploration getroffen. Als Beispiele lassen sich hierbei die Inputs mit Wechselwirkungen zu NutzerInnen anführen, sollte z. B. der Input „Minimaler Raumlufttemperatur-Sollwert“ einen thermisch unbehaglichen Zustand einnehmen, wird der Sollwert für das Heizen umgehend von den RaumnutzerInnen angepasst. Die detaillierten Angaben zu den Wahrscheinlichkeitsverteilungen der Input-Parameter können dem Anhang entnommen werden. Die Ergebnisse der Monte-Carlo-Simulationen werden in dieser Arbeit anhand von drei unterschiedlichen Zielgrößen untersucht. Dadurch sollen singuläre Betrachtungsweisen vermieden und die Wechselwirkungen zwischen den verschiedenen Bereichen des Performance Gaps (Energie Performance Gap – Komfort Performance Gap) analysiert werden.

- Energie Performance Gap: Primärenergiebedarf (PEB) [kWh/m²a]
- Komfort Performance Gap: Über- und Untertemperaturgradstunden (ÜTGS) [Kh/a] (in Anlehnung an Komfortband nach DIN EN 16798-1)

Im Bereich der Energie Performance Gaps wird die Berechnung der Primärenergiebedarfe mit den Primärenergiefaktoren für Erdgas von 1,1 und für Strom von 1,8 nach [DIN V 18599-1] durchgeführt.

4.2.3 Relative Unsicherheits- und Sensitivitätsanalysen mit Monte-Carlo-Simulationen

In diesem Kapitel wird die detaillierte Durchführung der relativen MCSs, basierend auf einer einheitlichen Normalverteilung mit $\pm 5\%$ Standardabweichung aller Inputs in Kombination mit den nachgelagerten UAs und SAs erläutert. Das Ziel ist die Identifizierung der maßgeblichen Eingangsgrößen für jede der drei Zielgrößen, bei separater Betrachtung der Parametergruppen und gleicher Gewichtung der Eingangsgrößen. Hierzu gliedert sich das Kapitel in die Bereiche Pre-Processing, wo die Input-Parameter bzw. Wahrscheinlichkeitsverteilungen definiert und dem Post-Processing, wo die Ergebnisse der UAs bzw. SAs diskutiert werden.

Relative MCS – Pre-Processing: Input-Parameter und Wahrscheinlichkeitsverteilungen

Die Grundlagen zur Auswahl der Input-Parameter und Definition von Wahrscheinlichkeitsverteilungen (einheitliche Normalverteilung mit $\pm 5\%$ Standardabweichung aller Inputs) wurde in den vorangegangenen Abschnitten erklärt. Die Wahrscheinlichkeitsverteilungen bzw. Wertebereiche der relativen UA und SA sind in Abhängigkeit der jeweiligen Parametergruppen im Anhang dargestellt. Einige Parameter werden mit einer limitierten bzw. beschränkten

Normalverteilung belegt, um die Über- bzw. Unterschreitung der Grenzwerte hinsichtlich technischer und physikalischer Eigenschaften zu vermeiden. Die nachstehende Auflistung zeigt, die Eingangsgrößen für die jeweilige Parametergruppe.

Input-Parameter für Parametergruppe A – Betriebsfehler (inkl. Bedien- und NutzerInnenfehler):

- error 1.1: Zuluft-Volumenstrom [$\text{l/s}\cdot\text{m}^2$]
- error 2.1: Differenzdruck Zuluftventilator [Pa]
- error 2.2: Differenzdruck Abluftventilator [Pa]
- error 2.4: Betriebsbeginn / Einschaltzeitpunkt RLT-Anlage [Uhrzeit]
- error 2.5: Betriebsende / Ausschaltzeitpunkt RLT-Anlage [Uhrzeit]
- error 3.1: Stellbereich Umluftklappe [%]
- error 4.1: Sperrtemperatur WRG [$^{\circ}\text{C}$]
- error 4.5: Rückwärmezahl (Wärmeübergang) WRG [1]
- error 5.1: Wärmeübergang Vorheizregister [1]
- error 5.2: Massenstrom Regelventil Vorheizregister [kg/s]
- error 5.3: Differenzdruck Pumpe Vor-/Nachheizregister [Pa]
- error 5.4: Temperaturspreizung Vorheizregister [K]
- error 5.6: Wärmeübergang Nachheizregister [1]
- error 5.7: Massenstrom Regelventil Nachheizregister [kg/s]
- error 5.8: Temperaturspreizung Nachheizregister [K]
- error 5.10: Wärmeübergang Kühlregister [1]
- error 5.11: Massenstrom Regelventil Kühlregister [kg/s]
- error 5.12: Differenzdruck Pumpe Kühlregister [Pa]
- error 5.13: Temperaturspreizung Kühlregister [K]
- error 5.19: Raumlufttemperatursensor (Offset) [$^{\circ}\text{C}$]
- error 6.1: Abluftfeuchtesensor (Offset) [% r.F.]
- error 8.1: Anzahl Personen [1]
- error 8.2: Regelung Sonnenschutz [W/m^2]
- error 8.3: Fensteröffnungszeit [h/d]

Input-Parameter für Parametergruppe B – Konstruktive bzw. bauphysikalische Faktoren und Sollwerte Raumkonditionierung:

- Infiltration [1/h]
- Fensterflächenanteil [1]
- U_g -Wert (Verglasung) [W/m²K]
- U-Wert Außenwand [W/m²K]
- Minimaler Raumlufttemperatur-Sollwert (Heizung) [°C]
- Maximaler Raumlufttemperatur-Sollwert (Kühlung) [°C]

Input-Parameter für Parametergruppe C – Bauliche bzw. Mess-, Steuerungs- und Regelungstechnische (MSRT) Aspekte gebäudetechnischer Anlagen

- Betriebsbeginn / Einschaltzeitpunkt Anlagentechnik [Uhrzeit]
- Betriebsende / Ausschaltzeitpunkt Anlagentechnik [Uhrzeit]
- Wirkungsgrad Wärmeerzeuger [1]
- Leistungszahl (Energy Efficiency Ratio EER) Kälteerzeuger [1]
- Vorlauftemperatur-Sollwert Heizregister [°C]
- Vorlauftemperatur-Sollwert Kühlregister [°C]
- Temperatur-Sollwert Nachtabsenkung [°C]

Relative MCS – Post-Processing: Unsicherheitsanalyse Parametergruppen A / B / C

Die folgende Abbildung 3 zeigt die Simulationsergebnisse in Form von drei Histogrammen und drei Box-Plots für die Zielgröße Primärenergiebedarf (Ergebnisse und Auswertungen der weiteren Zielgrößen Übertemperaturgradstunden und Untertemperaturgradstunden siehe Anhang) in Abhängigkeit der jeweiligen Parametergruppen A / B / C.

Bei der Zielgröße Primärenergiebedarf in Parametergruppe A beträgt der Median (schwarz gepunktete Linie) 112 kWh/m²a. Die blau gepunktete Linie visualisiert die positive bzw. negative Standardabweichung und beziffert sich bei den definierten Simulationsrandbedingungen auf 15 kWh/m²a. Daraus folgt eine Modellunsicherheit von ± 13 %, welche durch die Division von Standardabweichung bzw. Median berechnet und als Maß für die Robust herangezogen wird. In dem darunterliegenden Box-Plot lässt sich erkennen, dass der PEB der Parametergruppe A mit einer Wahrscheinlichkeit von 50 % in einem Bereich von 99 kWh/m²a und 123 kWh/m²a liegt. Darüber hinaus ist auch ein Ausreißer feststellbar, welcher den Maximalwert der Simulationen mit 158 kWh/m²a darstellt und im unteren Bereich beträgt der Minimalwert 87 kWh/m²a. Das bedeutet

im Umkehrschluss, dass sich der gesamte Wertebereich für den Primärenergiebedarf über 71 kWh/m²a (Maximalwert - Minimalwert) erstreckt und je nach Parameterkonfiguration innerhalb dieser Bandbreite liegt. Die Auswirkungen der Parametergruppen B & C schlagen sich nur geringfügig auf den PEB nieder und spielen somit im Vergleich zu den Betriebs-, Bedien- und NutzerInnenfehler (Parametergruppe A) eine untergeordnete Rolle. Das Histogramm der Parametergruppe B stellt sich als linksschiefe Verteilung dar und die Ergebniswerte befinden sich mit hoher Wahrscheinlichkeit im niedrigen Wertebereich. Lediglich vereinzelt sind Ausreißer in Richtung des Maximalwerts zu erkennen, die durch ungünstige Parameterkombinationen resultieren. Der glockenförmige Verlauf von Parametergruppe C verursacht die geringste Ausprägung und Variation der Zielgröße Primärenergiebedarf. Die genauen Zahlenwerte für die jeweiligen statistischen Kennwerte aller Zielgrößen können aus der nachfolgenden Tabelle 1 entnommen werden.

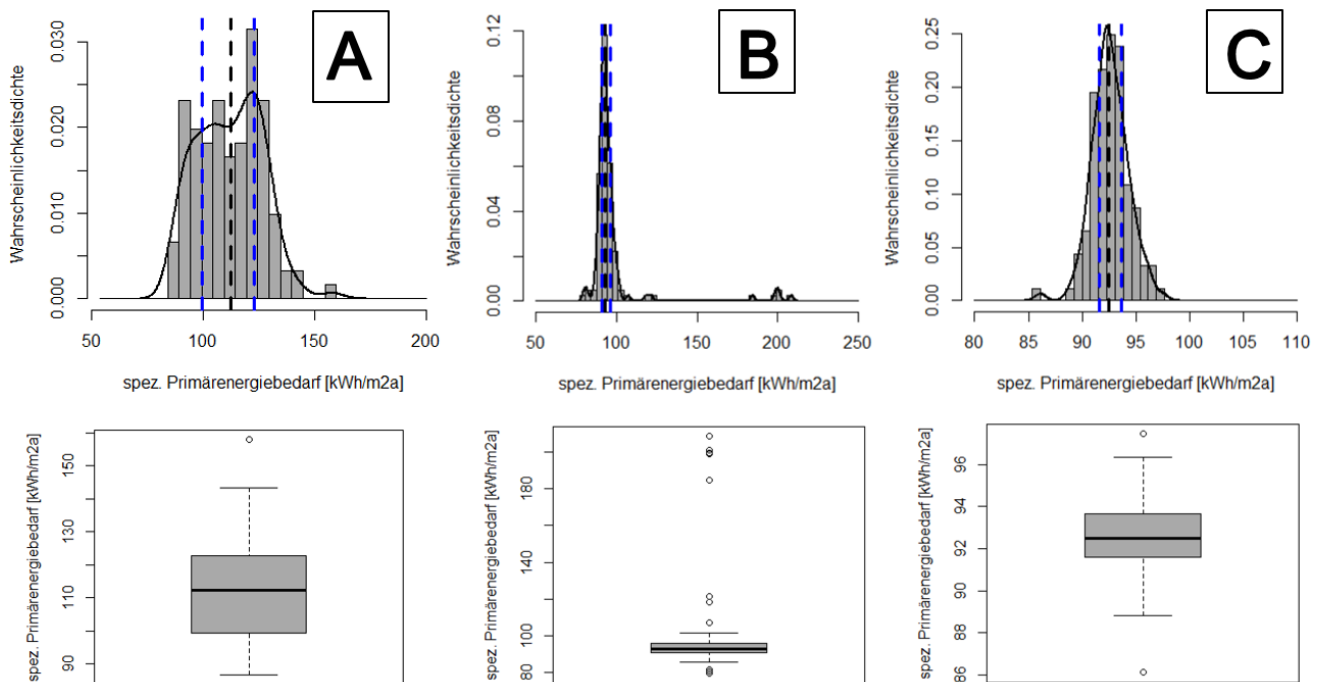


Abbildung 3: Histogramme und Box-Plots der Parametergruppe A / B / C für Zielgröße Primärenergiebedarf

Tabelle 1: Zusammenstellung statistischer Kennzahlen der Zielgrößen in Abhängigkeit der Parametergruppen

| Zielgröße | Primärenergiebedarf [kWh/m²a] | | | Übertemperaturgradstunden [Kh/a] | | | Untertemperaturgradstunden [Kh/a] | | |
|---------------------------|-------------------------------|------|-----|----------------------------------|-------|-----|-----------------------------------|-------|------|
| | A | B | C | A | B | C | A | B | C |
| Parametergruppe | | | | | | | | | |
| Minimum | 87 | 80 | 86 | 10 | 2 | 49 | 70 | 0 | 1 |
| 1.Quartil | 99 | 91 | 92 | 24 | 16 | 50 | 494 | 4 | 52 |
| Median | 112 | 93 | 93 | 36 | 47 | 51 | 1043 | 71 | 72 |
| Mean | 112 | 98 | 93 | 37 | 92 | 51 | 1052 | 438 | 78 |
| 3.Quartil | 123 | 96 | 94 | 47 | 113 | 52 | 1614 | 836 | 101 |
| Maximum | 158 | 209 | 97 | 87 | 949 | 58 | 3022 | 2434 | 230 |
| Standardabweichung | 15 | 22 | 2 | 16 | 148 | 2 | 652 | 622 | 40 |
| Modellunsicherheit | ±13% | ±23% | ±2% | ±45% | ±315% | ±4% | ±62% | ±870% | ±56% |

Relative MCS – Post-Processing: Sensitivitätsanalyse Parametergruppen A / B / C

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse der relativen Sensitivitätsanalysen für die Parametergruppen A / B / C diskutiert. Wie in Kapitel 2.4 „Gebäudesimulationen und Monte-Carlo-Methode“ dargestellt, können Sensitivitätsanalysen mittels unterschiedlicher Verfahren durchgeführt werden. Darin wurde auch bereits beschrieben, dass in diesem Forschungsprojekt die Sensitivitätsanalysen einerseits mit der grafischen Auswertung von Streudiagrammen bzw. anschließender Berechnung der Varianzen durch den Algorithmus „Conditional Variances Second Path“ nach Saltelli und andererseits mit dem Standardisierten Rang-Regressionskoeffizienten (SRRC) durchgeführt werden.

Die Ränge eins bis drei werden in der nachfolgenden Auswertungs-Tabelle 2 & Tabelle 3 grün hervorgehoben (siehe Anhang für Auswertungen der weiteren Parametergruppen) um dadurch die einflussreichsten Parameter der jeweiligen Analysemethode zu kennzeichnen. Diese Eingangsgrößen sind aufgrund ihrer hohen Signifikanz von besonderer Bedeutung und werden in den, auf die relativen UAs/SAs aufbauenden, spezifischen Analysen als Inputs weiterführend untersucht.

Durch den Vergleich der beiden Analysemethoden konnte die Übereinstimmung in den Auswertungen für die vorderen Ränge nachgewiesen werden (siehe Tabelle 2 & Tabelle 3). Die Ergebnisse der Streudiagramme zeigen ein eindeutiges Bild im Hinblick auf die relevantesten Eingangsgrößen der Parametergruppe A: bei allen drei Zielgrößen sind die Fehler „error 8.3 – Fensteröffnungszeit“ und „error 5.19 – Raumlufttemperatursensor (Offset)“ auf den ersten beiden

Plätzen zu finden. Bei der Auswertung der UTGS mit den Korrelationskoeffizienten belegt „error 8.1 – Anzahl Personen“ den zweiten Rang; auf dem dritten Rang unterscheiden sich die Resultate der Streudiagramme und Korrelationskoeffizienten geringfügig.

Abbildung 4 zeigt ergänzend zu Tabelle 2 die Ergebnisse der Streudiagramme aus allen Simulationsdurchläufen. Darin sind die ersten beiden Ränge (links / rechts) der Zielgrößen PEB, ÜTGS und UTGS abgebildet. Erwartungsgemäß wird dadurch der besonders starke Zusammenhang zwischen dem Input „error 8.3 – Fensteröffnungszeit“ und den UTGS nachgewiesen, was auf die längeren Fensteröffnungsdauern zurückzuführen ist.

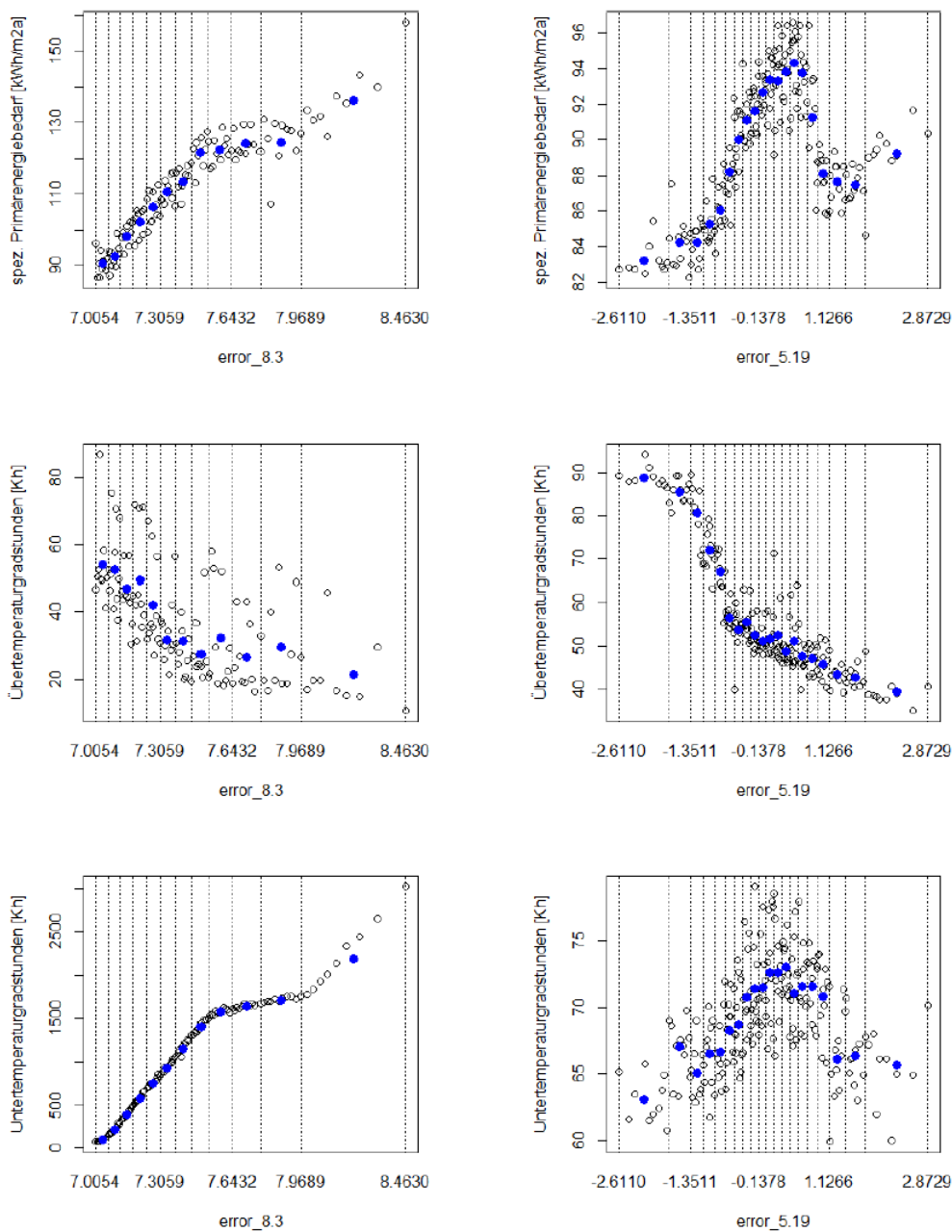


Abbildung 4: Streudiagramme der 3 Zielgrößen von relativer SA für Parametergruppe A (links/rechts: erster/zweiter Rang)

Tabelle 2: Rangliste für Parametergruppe A von relativer SA mit Varianz durch Streudiagramme

| Zielgröße | Primärenergiebedarf [kWh/m ² a] | | Übertemperaturgradstunden [Kh/a] | | Untertemperaturgradstunden [Kh/a] | |
|-----------|--|-----------------------|----------------------------------|---------|-----------------------------------|-----------------------|
| | Input | Varianz | Input | Varianz | Input | Varianz |
| #1 | error 8.3 | 113,6x10 ⁶ | error 5.19 | 203,9 | error 8.3 | 443,6x10 ³ |
| #2 | error 5.19 | 715,3x10 ⁴ | error 8.3 | 129,7 | error 5.19 | 9,0 |
| #3 | error 2.1 | 210,5x10 ⁴ | error 5.8 | 101,8 | error 8.1 | 4,1 |
| #4 | error 5.8 | 207,1x10 ⁴ | error 4.5 | 88,4 | error 5.3 | 3,5 |
| #5 | error 4.5 | 165,6x10 ⁴ | error 2.5 | 44,1 | error 4.5 | 3,0 |

Tabelle 3: Rangliste für Parametergruppe A von relativer SA mit SRCC-Regression

| Zielgröße | Primärenergiebedarf [kWh/m ² a] | | Übertemperaturgradstunden [Kh/a] | | Untertemperaturgradstunden [Kh/a] | |
|-----------|--|--------|----------------------------------|--------|-----------------------------------|--------|
| | Input | SRCC | Input | SRCC | Input | SRCC |
| #1 | error 8.3 | 0,952 | error 5.19 | -0,914 | error 8.3 | 0,999 |
| #2 | error 5.19 | 0,450 | error 8.3 | -0,681 | error 8.1 | -0,380 |
| #3 | error 8.2 | -0,212 | error 2.5 | -0,171 | error 1.1 | -0,333 |
| #4 | error 1.1 | 0,137 | error 8.1 | 0,152 | error 5.19 | 0,261 |
| #5 | error 2.4 | -0,135 | error 1.1 | -0,112 | error 5.10 | 0,260 |

Durch die Streudiagramme und Korrelationskoeffizienten konnte innerhalb der relativen MCSs eine gesamtheitliche und rasche Untersuchung des Gebäude- und Anlagenmodells mit einer großen Anzahl an Eingangsparametern durchgeführt werden. Resultierend konnte die eindeutige Identifikation der einflussreichsten und sensitivsten Input-Parameter vorgenommen werden. Außerdem hat der Vergleich der beiden Sensitivitätsindizes gezeigt, dass beide Indikatoren das gleiche Ergebnis liefern und sich insbesondere bei den relevantesten Inputs eine deckungsgleiche Reihenfolge abzeichnet. Es ergeben sich lediglich geringere Diskrepanzen bei den Platzierungen, umso kleiner die Varianzen bzw. Korrelationskoeffizienten werden, jedoch stand auch nicht im Fokus der Analysen die Inputs hinsichtlich ihrer detaillierten Reihenfolge genau einzuordnen. Basierend auf den Ergebnissen der relativen SA, werden aus den Parametergruppen die folgenden Eingangsgrößen in der spezifischen UA/SA berücksichtigt:

Parametergruppe A

- error 1.1 – Volumenstrom Zonenebene
- error 2.1 – Differenzdruck Zuluftventilator
- error 2.5 – Betriebsende RLT-Anlage
- error 5.8 – Temperaturspreizung Nachheizregister

- error 5.19 – Raumlufftemperatursensor
- error 8.1 – Anzahl Personen
- error 8.2 – Regelung Sonnenschutz
- error 8.3 – Fensteröffnungszeit

Parametergruppe B

- Minimaler Raumlufftemperatur-Sollwert
- Maximaler Raumlufftemperatur-Sollwert

Parametergruppe C

- Betriebsbeginn Anlagentechnik
- Betriebsende Anlagentechnik
- Wirkungsgrad Wärmeerzeuger
- Vorlauftemperatur-Sollwert Kühlregister

4.2.4 Spezifische Unsicherheits- und Sensitivitätsanalysen mit Monte-Carlo-Simulationen

Im zweiten Simulations- und Untersuchungsschritt werden spezifische Monte-Carlo-Simulationen, mit den auf Basis der relativen UAs / SAs selektierten Input-Parameter, durchgeführt. Hierbei wird zu Beginn vorrangig die Parametergruppe A der Betriebs-, Bedien- und NutzerInnenfehler analysiert. Dadurch soll die Anzahl der Eingangsgrößen eingeschränkt werden, um in weiterer Folge den Simulationsumfang und die damit verbundenen Rechenzeiten möglichst effizient zu gestalten. Darauf aufbauend wird anschließend ein Vergleich zwischen den drei Parametergruppen A / B / C vorgenommen. Hierbei werden die sensitivsten Eingangsgrößen aus den relativen Analysen der Parametergruppen B & C mit den einflussreichsten Parametern aus diesem Abschnitt kombiniert. Die Wahrscheinlichkeitsverteilungen und Wertebereiche für den ersten Schritt der spezifischen UA und SA von Parametergruppe A sind in Tabelle 4 aufgelistet. Darin wird ersichtlich, dass alle Inputs mit Ausnahme von „error 5.19 – Raumlufftemperatursensor“ und „error 8.1 – Anzahl Personen“, durch eine Gleichverteilung beschrieben werden. Diese Wahrscheinlichkeitsverteilung würde sich für die genannten Eingangsgrößen aufgrund der physikalischen Grenzwerte problematisch darstellen und wird somit mit einer Normalverteilung abgebildet.

Tabelle 4: Zusammenstellung der Input-Parameter und Wahrscheinlichkeitsverteilungen für Parametergruppe A

| Input-Parameter | | | Wahrscheinlichkeitsverteilung | | | |
|-----------------|---|-----------------------|-------------------------------|--------------------------|-------|-------|
| Code | Beschreibung | Einheit | Verteilung | Verteilung (μ ; sd) | Min. | Max. |
| error 1.1 | Volumenstrom Zonenebene | l/(s*m ²) | gleichverteilt | ~ U(0,00; 1,609) | 0 | 1,6 |
| error 2.1 | Differenzdruck Zuluftventilator | Pa | gleichverteilt | ~ U(0,0; 700,0) | 0 | 700 |
| error 2.5 | Betriebsende RLT | hh:mm | gleichverteilt | ~ U(05:00; 24:00) | 05:00 | 24:00 |
| error 5.8 | Temperaturspreizung Nachheizregister | K | gleichverteilt | ~ U(0,1; 50,0) | 0.1 | 50.0 |
| error 5.19 | Raumlufttemperaturse nsor (Offset) | °C | normalverteilt | ~ N(0,00; 0,97) | -2.09 | 2.35 |
| error 8.1 | Anzahl Personen | 1 | normalverteilt | ~ N(2,0; 0,1) | 0 | 4 |
| error 8.2 | Regelung Sonnenschutz | W/m ² | gleichverteilt | ~ U(0,0; 1000,0) | 0 | 1000 |
| error 8.3 | Fensteröffnungszeit | h/d | gleichverteilt | ~ U(0,0; 0,25) | 0 | 0,25 |

Spezifische MCS – Post-Processing: Unsicherheitsanalysen Parametergruppe A

Alle Zielgrößen werden, wie bereits in den relativen Analysen dargestellt, auch bei den Unsicherheitsanalysen mit spezifischen Monte-Carlo-Simulationen durch Histogramme und Box-Plots beschrieben.

Wie in unten dargestellter Abbildung 5 ersichtlich, charakterisiert sich das Histogramm für die Zielgröße Primärenergiebedarf als linksschiefe Verteilung bei dem der Median (schwarz gepunktete Linie) von 73 kWh/m²a und die Standardabweichung 11 kWh/m²a (blau gepunktete Linien) zu einer Modellunsicherheit von ± 15 % um den Erwartungswert führen. Die Übertemperaturgradstunden liegen mit einem Maximalwert von 217 Kh/a unterhalb des kritischen Wertes zur sommerlichen Überhitzung bei Nicht-Wohngebäuden von 500 Kh/a nach [DIN 4108-2]. Dementsprechend lässt sich festhalten, dass die Eingangsgrößen der Parametergruppe A von Betriebs-, Bedien- und NutzerInnenfehler generell nur ein geringes Gefahrenpotential für den sommerlichen Wärmeschutz darstellen. Im Gegensatz dazu, hat Parametergruppe A auf die Zielgröße Untertemperaturgradstunden erhebliche Auswirkungen und kann sich ausgehend von einem Median bei 170 Kh/a unter ungünstigen Umständen bzw. Parameterkombinationen bis auf 639 Kh/a erhöhen. Der starke Einfluss dieser Gruppe an Fehlern spiegelt sich ebenfalls in der großen Modellunsicherheit von ± 70 % wieder (siehe auch Tabelle 5).

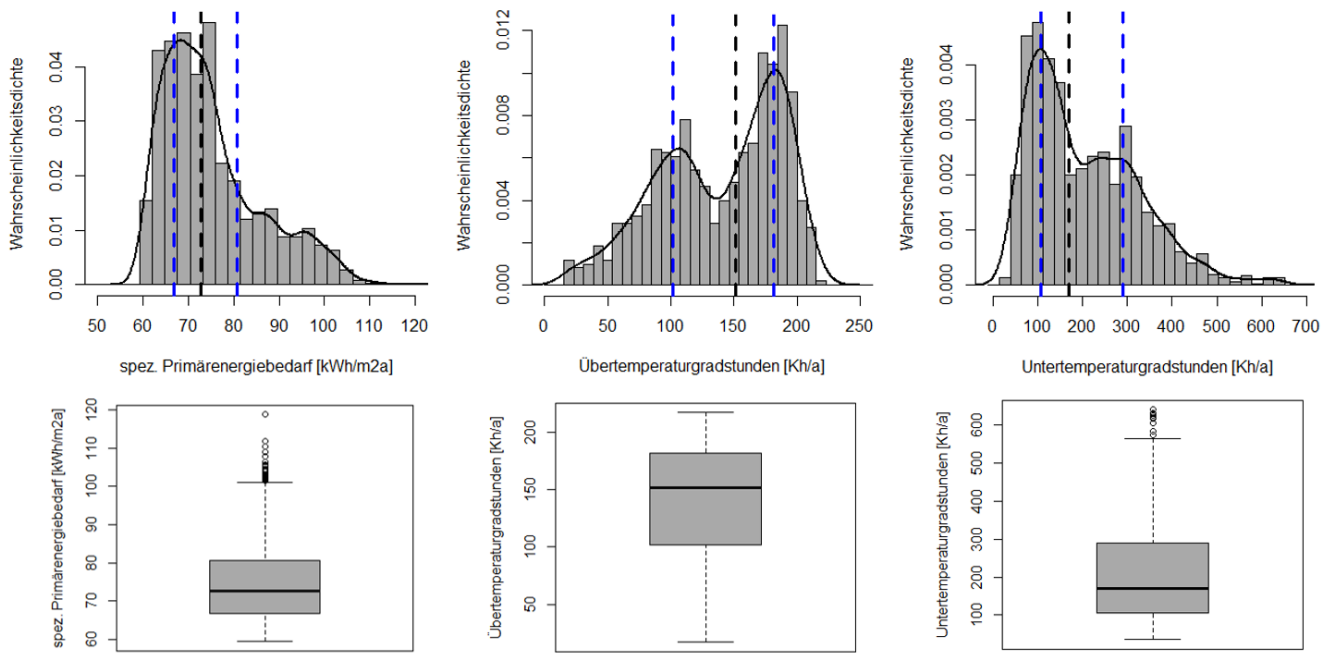


Abbildung 5: Histogramme und Box-Plots der Parametergruppe A für alle 3 Zielgrößen

Tabelle 5 fasst die statistischen Auswertungen für alle drei Zielgrößen unter Berücksichtigung der Parametergruppe A zusammen. Wie bereits bei den relativen Analysen ersichtlich, ist die Modellunsicherheit bei den UTGS mit $\pm 70\%$ am größten. Jedoch reduzieren sich die absoluten Werte für die Untertemperaturgradstunden von 3022 Kh/a (relative UA), bedingt durch die unterschiedlichen Wahrscheinlichkeitsverteilungen des Inputs „error 8.3 – Fensteröffnungszeit“ in den beiden Untersuchungsszenarien, nun auf 639 Kh/a. Dementsprechend schwierig bzw. nicht zielführend ist es, einen detaillierten Vergleich zwischen der theoretischen bzw. praxisbezogenen Vorgehensweise (relative / spezifische MCSs) anzustellen. Aus diesem Grund sollten daher nur Tendenzen abgeleitet werden und dabei immer die entsprechenden Wahrscheinlichkeitsverteilungen bzw. jeweiligen Wertebereiche berücksichtigt werden.

Tabelle 5: Zusammenstellung statistischer Kennzahlen der 3 Zielgrößen für Parametergruppe A

| Zielgröße | Primärenergiebedarf [kWh/m ² a] | Übertemperaturgradstunden [Kh/a] | Untertemperaturgradstunden [Kh/a] |
|------------------|--|----------------------------------|-----------------------------------|
| Minimum | 59 | 17 | 36 |
| 1.Quartil | 67 | 102 | 106 |
| Median | 73 | 151 | 170 |
| Mean | 75 | 139 | 205 |
| 3.Quartil | 81 | 182 | 289 |
| Maximum | 119 | 217 | 639 |

| Zielgröße | Primärenergiebedarf [kWh/m ² a] | Übertemperaturgradstunden [Kh/a] | Untertemperaturgradstunden [Kh/a] |
|--------------------|--|----------------------------------|-----------------------------------|
| Standardabweichung | 11 | 48 | 119 |
| Modellunsicherheit | ± 15 % | ± 32 % | ± 70 % |

Spezifische MCS – Sensitivitätsanalysen Parametergruppe A

In Abbildung 6 sind die Totaleffekte der spezifischen SAs von Parametergruppe A dargestellt. Bei der Betrachtung der Totaleffekte stellte sich für jede Zielgröße eine dominierende Eingangsgröße heraus. Sowohl bei Primärenergiebedarf (71 % Totaleffekt) als auch bei den Übertemperaturgradstunden (77 % Totaleffekt) sind die Schwankungen im Output zum Großteil auf den Bedien- bzw. NutzerInnenfehler „error 8.2 – Regelung Sonnenschutz“ zurückzuführen (siehe ebenfalls Tabelle 6). Die Unsicherheiten der Untertemperaturgradstunden werden zu 74 % durch „error 8.3 – Fensteröffnungszeit“ bestimmt.

Wird in diesem Zusammenhang der Vergleich zwischen relativer und spezifischer SA angestellt, so lässt sich festhalten, dass „error 8.2 – Regelung Sonnenschutz“ in den vorangegangenen relativen Analysen sich als nicht sensitiv in Bezug auf Primärenergiebedarf und Übertemperaturgradstunden herausstellte. Dies ist wiederum durch die unterschiedlichen Definitionen für Wahrscheinlichkeitsverteilungen bzw. Wertebereiche der relativen und spezifischen UA / SA begründbar.

Nichtsdestotrotz lassen sich daraus die wesentlichen Erkenntnisse ableiten, dass ein funktionstüchtiger bzw. korrekt betriebener Sonnenschutz nur sehr geringe Auswirkungen für die Zielgrößen bedeutet. Im Gegensatz dazu, verursacht jedoch ein fehlerhafter Sonnenschutz eine große Abweichung vom Erwartungswert und kann zu einem stark erhöhten energetischen Mehrverbrauch sowie eingeschränkter thermischer Behaglichkeit führen. Für „error 8.3 – Fensteröffnungszeit“ konnte die gegenläufige Bewegung beobachtet werden; in der relativen SA als einflussreicher Parameter identifiziert, spielt dieser nun aufgrund der reduzierten Fensteröffnungsdauer infolge der Wahrscheinlichkeitsverteilung eine untergeordnete Rolle. Darüber hinaus lässt sich gesamtheitlich festhalten, dass auf Basis der definierten Simulationsrandbedingungen vorrangig die Bedien- und NutzerInnenfehler für die Unsicherheiten in den Modelloutputs ausschlaggebend sind. Im Vergleich dazu spielen die Betriebsfehler mit Ausnahme von „error 2.5 – Betriebsende RLT-Anlage“, der sich an zweiter Stelle für die Zielgrößen PEB und UTGS bzw. am dritten Platz für die UTGS befindet, eine untergeordnete Rolle.

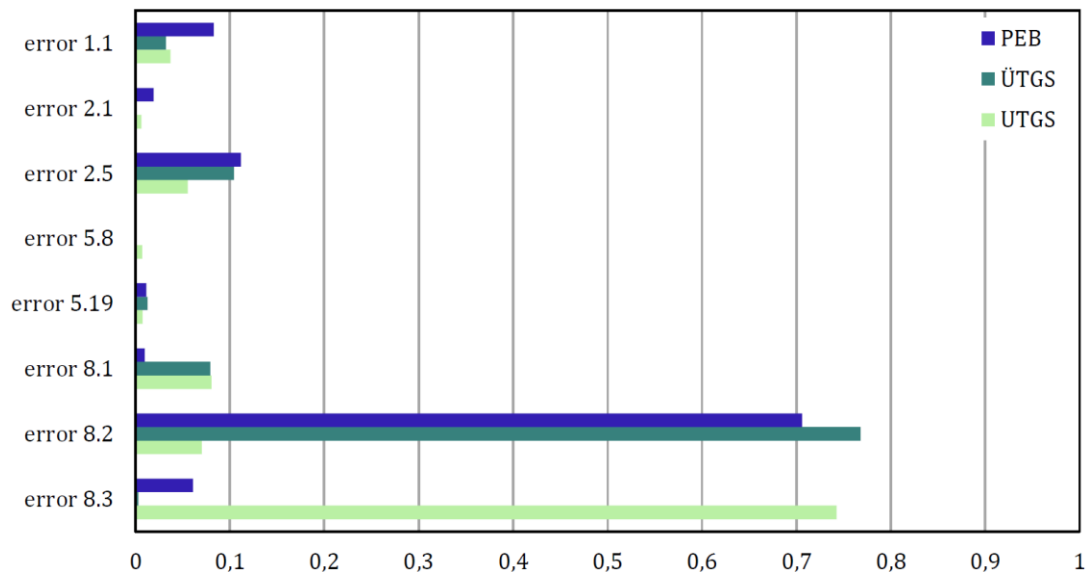


Abbildung 6: Totaleffekte der spezifischen Sensitivitätsanalysen von Parametergruppe A

Die Variablen mit dem größten Einfluss auf die Zielgrößen, sind in Tabelle 6 aufgeführt. Diese Input-Parameter erzeugen die größte Streuung in den dargestellten Verteilungen bzw. Zielgrößen und sind deshalb besonders sensitiv. Addiert man die Totaleffekte der zwei einflussreichsten Variablen von jeder Zielgröße, ergeben sich 0,71 (error 8.2 – Regelung Sonnenschutz) + 0,11 (error 2.5 – Betriebsende RLT-Anlage) = 0,82 für den PEB; 0,77 (error 8.2 – Regelung Sonnenschutz) + 0,10 (error 2.5 – Betriebsende RLT-Anlage) = 0,87 für die ÜTGS und 0,74 (error 8.3 – Fensteröffnungszeit) + 0,08 (error 8.1 – Anzahl Personen) = 0,82 für die UTGS. Dies bedeutet, dass 82 / 87 / 82 % der Modellunsicherheit der Zielgrößen, allein durch diese Eingangsgrößen verursacht werden.

Tabelle 6: Zusammenfassung der einflussreichsten Inputs der spezifischen SA von Parametergruppe A

| Rang | Input-Parameter | Totaleffekte |
|---|-------------------------------------|--------------|
| Primärenergiebedarf [kWh/m²a] | | |
| #1 | error 8.2 – Regelung Sonnenschutz | 0,71 |
| #2 | error 2.5 – Betriebsende RLT-Anlage | 0,11 |
| #3 | error 1.1 – Volumenstrom Zonenebene | 0,08 |
| #4 | error 8.3 – Fensteröffnungszeit | 0,06 |
| Übertemperaturgradstunden [Kh/a] | | |
| #1 | error 8.2 – Regelung Sonnenschutz | 0,77 |
| #2 | error 2.5 – Betriebsende RLT-Anlage | 0,10 |
| #3 | error 8.1 – Anzahl Personen | 0,08 |
| #4 | error 1.1 – Volumenstrom Zonenebene | 0,03 |

| Rang | Input-Parameter | Totaleffekte |
|--|-------------------------------------|--------------|
| Untertemperaturgradstunden [Kh/a] | | |
| #1 | error 8.3 – Fensteröffnungszeit | 0,74 |
| #2 | error 8.1 – Anzahl Personen | 0,08 |
| #3 | error 2.5 – Betriebsende RLT-Anlage | 0,06 |
| #4 | error 1.1 – Volumenstrom Zonenebene | 0,04 |

Auf Grundlage der Ergebnisse und den Auswertungen im Rahmen der spezifischen SA für Parametergruppe A werden nun die folgenden Betriebs-, Bedien- und NutzerInnenfehler weiterführend untersucht und mit Parametergruppe B bzw. C verglichen. Die Auswahl der Parameter erfolgt anhand der Erst- und Zweitplatzierten Eingangsgrößen bei den Totaleffekten.

Parametergruppe A

- error 2.5 – Betriebsende RLT-Anlage
- error 8.1 – Anzahl Personen
- error 8.2 – Regelung Sonnenschutz
- error 8.3 – Fensteröffnungszeit

Spezifische Monte-Carlo-Simulationen mit Unsicherheits- und Sensitivitätsanalysen

(Parametergruppe A / B / C)

Wie im vorangegangenen Kapitel beschrieben, werden nun basierend auf den Ergebnissen der spezifischen SA von Parametergruppe A die einflussreichsten Betriebs-, Bedien- und NutzerInnenfehler weiterführend untersucht und in Kombination mit den Parametergruppen B bzw. C analysiert. Die Wahrscheinlichkeitsverteilungen und Wertebereiche für den Vergleich der Parametergruppen, sind in Tabelle 7 beschrieben.

Tabelle 7: Zusammenstellung der Input-Parameter und Wahrscheinlichkeitsverteilungen für Parametergruppe A / B / C

| Input-Parameter | | Wahrscheinlichkeitsverteilung | | | |
|-----------------------------------|------------------|-------------------------------|-----------------------------|-------|-------|
| Beschreibung | Einheit | Verteilung | Verteilung (μ ; sd) | Min. | Max. |
| error 2.5 – Betriebsende RLT | h | gleichverteilt | $\sim U(05:00; 24:00)$ | 05:00 | 24:00 |
| error 8.1 – Anzahl Personen | 1 | normalverteilt | $\sim N(2,0; 1,0)$ | 0 | 4 |
| error 8.2 – Regelung Sonnenschutz | W/m ² | gleichverteilt | $\sim U(0,0; 1000,0)$ | 0 | 1000 |
| error 8.3 – Fensteröffnungszeit | h/d | gleichverteilt | $\sim U(0,0; 0,25)$ | 0 | 0,25 |

| Input-Parameter | | Wahrscheinlichkeitsverteilung | | | |
|---|---------|-------------------------------|-----------------------------|-------|-------|
| Beschreibung | Einheit | Verteilung | Verteilung (μ ; sd) | Min. | Max. |
| Minimaler Raumlufttemperatur-Sollwert | °C | normalverteilt | $\sim N(21,0; 0,97)$ | 18,9 | 23,4 |
| Maximaler Raumlufttemperatur-Sollwert | °C | normalverteilt | $\sim N(24,0; 0,97)$ | 21,9 | 26,4 |
| Betriebsbeginn Anlagentechnik | 1/h | gleichverteilt | $\sim N(05:00; 0,65)$ | 03:00 | 05:00 |
| Betriebsende Anlagentechnik | 1 | gleichverteilt | $\sim N(18:00; 0,65)$ | 18:00 | 21:00 |
| Wirkungsgrad Wärmeerzeuger | W/(m2K) | gleichverteilt | $\sim N(0,890; 0,045)$ | 0.88 | 0.99 |
| Vorlauftemperatur-Sollwert Kühlregister | °C | gleichverteilt | $\sim N(6,0; 0,3)$ | 6,0 | 14,0 |

Spezifische MCS – Post-Processing: Unsicherheitsanalyse Parametergruppen A / B / C

Abbildung 7 zeigt die statistische Auswertung der Monte-Carlo-Simulationen für alle drei Zielgrößen anhand von Histogrammen und Box-Plots. Die Kurvencharakteristik der Histogramme stellt eine logarithmische Normalverteilung, die sich durch den flachen Auslauf der Dichtefunktion auf einer Seite der Verteilung auszeichnet, das und kann durch die Vielzahl an Ausreißern bei den Box-Plots bestätigt werden. Daraus können die Rückschlüsse gezogen werden, dass sich hierbei ein Grenzbereich abzeichnet, jedoch durch besondere kritische Parameterkombinationen extrem hohe Werte in den Zielgrößen folgen können, auch wenn diese Extremfälle nur mit geringer Wahrscheinlichkeit eintreten.

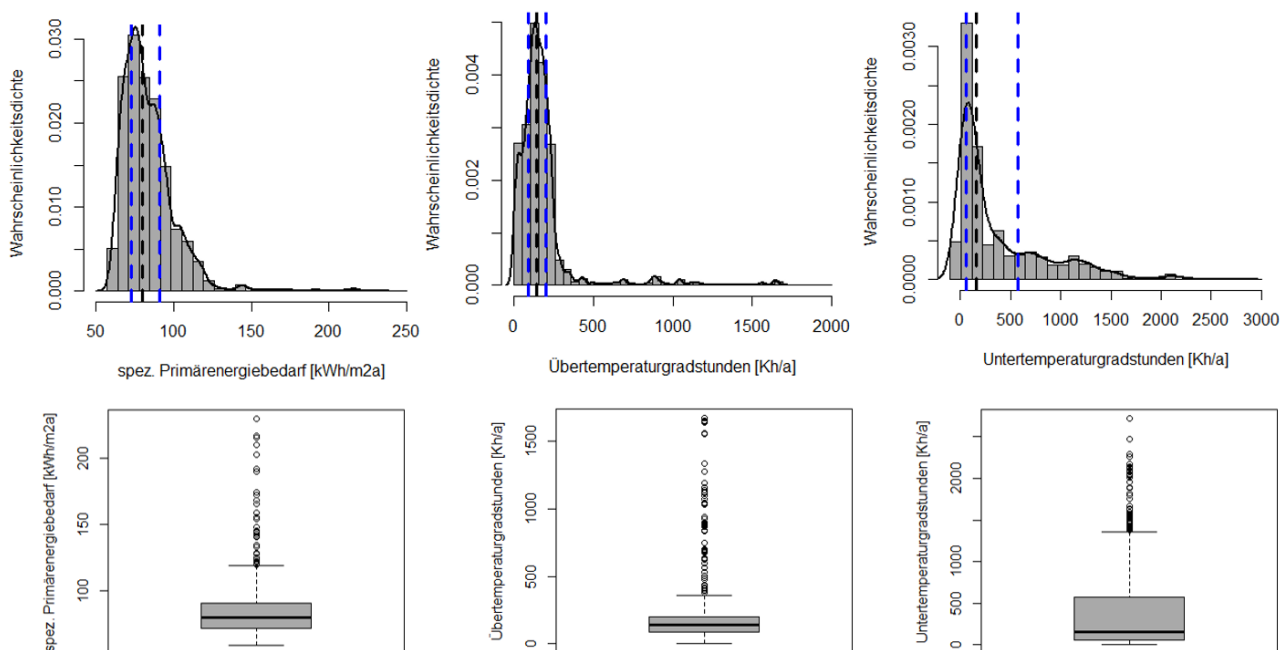


Abbildung 7: Histogramme und Box-Plots der Parametergruppe A / B / C für alle 3 Zielgrößen

Bei allen drei Zielgrößen sind nur geringe Abweichungen der Standardabweichungen zu den Medianen feststellbar. Als Beispiel lassen sich hierfür die Werte des Primärenergiebedarfs mit den statistischen Kenngrößen Median (80 kWh/m²a), Standardabweichung (18 kWh/m²a) und Modellunsicherheit ($\pm 23\%$) anführen (siehe auch Tabelle 8). Die Werte für die ÜTGS liegen zum Großteil und mit hoher Wahrscheinlichkeit bei einem unkritischen Niveau zwischen 88 Kh/a (1.Quartil) bis 200 Kh/a (3.Quartil), können jedoch infolge ungünstiger Parameterkombinationen bis auf 1669 Kh/a ansteigen. Die Ausprägung der UTGS zeigt ein ähnliches Bild, jedoch ist der Abstand zwischen den Quartilen ein deutlich größerer (Interquartilsabstand: ÜTGS 112 Kh/a; UTGS 518 Kh/a), was sich auch in einer erhöhten Modellunsicherheit niederschlägt.

Die folgende Tabelle 8 fasst die Ergebnisse aller drei Zielgrößen durch die statistischen Kenngrößen zusammen. Im Vergleich zu den vorangegangenen spezifischen Analysen mit Parametergruppe A (PEB $\pm 15\%$, ÜTGS $\pm 32\%$, UTGS $\pm 70\%$) wird nun eine erhöhte Modellunsicherheit bei allen Zielgrößen festgestellt. Dabei ist kann insbesondere eine große Zunahme bei den Über- und Untertemperaturgradstunden festgestellt werden. Dadurch kann schlussgefolgert werden, dass der Anstieg hauptsächlich durch die Eingangsgrößen der Parametergruppe B bzw. C und nur in geringerem Maße von den Betriebs-, Bedien- und NutzerInnenfehler beeinflusst wird.

Tabelle 8: Zusammenstellung statistischer Kennzahlen der Zielgrößen für die Parametergruppen

| Zielgröße | Primärenergiebedarf [kWh/m ² a] | Übertemperaturgrad- stunden [Kh/a] | Untertemperaturgrad- stunden [Kh/a] |
|---------------------------------|---|---------------------------------------|--|
| Minimum | 59 | 0 | 0 |
| 1.Quartil | 72 | 88 | 59 |
| Median | 80 | 143 | 157 |
| Mean | 84 | 178 | 381 |
| 3.Quartil | 91 | 200 | 577 |
| Maximum | 230 | 1669 | 2713 |
| Standard- abweichung | 18 | 203 | 467 |
| Modell- unsicherheit | $\pm 23\%$ | $\pm 142\%$ | $\pm 297\%$ |

Spezifische MCS – Sensitivitätsanalyse Parametergruppen A / B / C

Die nachfolgende Abbildung 8 zeigt, die Totaleffekte der spezifischen SA von Parametergruppe A / B / C. Der größte Einfluss für die Zielgröße Primärenergiebedarf geht von den Input-Parametern „Minimaler Raumlufthemperatur-Sollwert“ (37 % Totaleffekt) und „Maximaler Raumlufthemperatur-Sollwert“ (33 %) sowie „error 8.2 – Regelung Sonnenschutz“ (17 %) aus. Die Erklärung für die erheblichen Anteile der Sollwerte für das Heizen und Kühlen liegt in der Wahl der Wahrscheinlichkeitsverteilungen. Beide Eingangsgrößen wurden mit einer Standardabweichung von 0,97 belegt, um den gesamten relevanten Wertebereich für Heiz- und Kühlzwecke abzudecken. Demzufolge können sich durch das Sampling Parameterkombinationen ergeben, bei denen der Sollwert für die Kühlung, den Sollwert für die Heizung unterschreitet und somit zu einem gleichzeitigen Heizen und Kühlen auf Raumebene führt. Außerdem ist „error 2.5 – Betriebsende RLT-Anlage“ durch einen Totaleffekt von 11 % keinesfalls vernachlässigen und stellt somit den einflussreichsten Betriebsfehler dar.

Im Hinblick auf die Übertemperaturgradstunden wird die Unsicherheit zum Großteil vom Parameter „max. Sollwert Raumtemperatur“ mit einem Totaleffekt von 89 % ausgelöst. Die Begründung für diesen äußerst hohen Wert und die große Dominanz liegt darin, dass sich durch den Erwartungswert von 24 °C und einer Standardabweichung von 0,97 vereinzelt Stichproben mit Werten größer als 26 °C für den „max. Sollwert Raumtemperatur“ ergeben (Maximalwert 26,4 °C; siehe Tabelle 7). Dementsprechend erfolgt die Kühlung der Räume erst ab diesem Sollwert, während für die Berechnung der Übertemperaturgradstunden ein Grenzwert von 26°C nach [DIN 4108-2] zugrunde liegt. Dieser Umstand zeigt sich bei der Signifikanz für die Totaleffekte eindeutig und gemeinsam mit „error 8.2 – Regelung Sonnenschutz“ (Totaleffekt 7 %) kann nahezu die gesamte Unsicherheit beschrieben werden. Anlaog dazu wird die Unsicherheit in den Untertemperaturgradstunden zum Großteil durch den Parameter „min. Sollwert Raumtemperatur“ mit einem Totaleffekt von 86 % bestimmt. Wie bereits zuvor beschrieben, ist die hohe Relevanz dieser Eingangsgröße ebenfalls darauf zurückzuführen, dass einzelne Stichproben eine Unterschreitung (Minimalwert 18,9 °C; siehe Tabelle 7) des definierten Grenzwertes für die Auswertung der Untertemperaturgradstunden nach [DIN EN 16798-1] von 20°C hervorrufen.

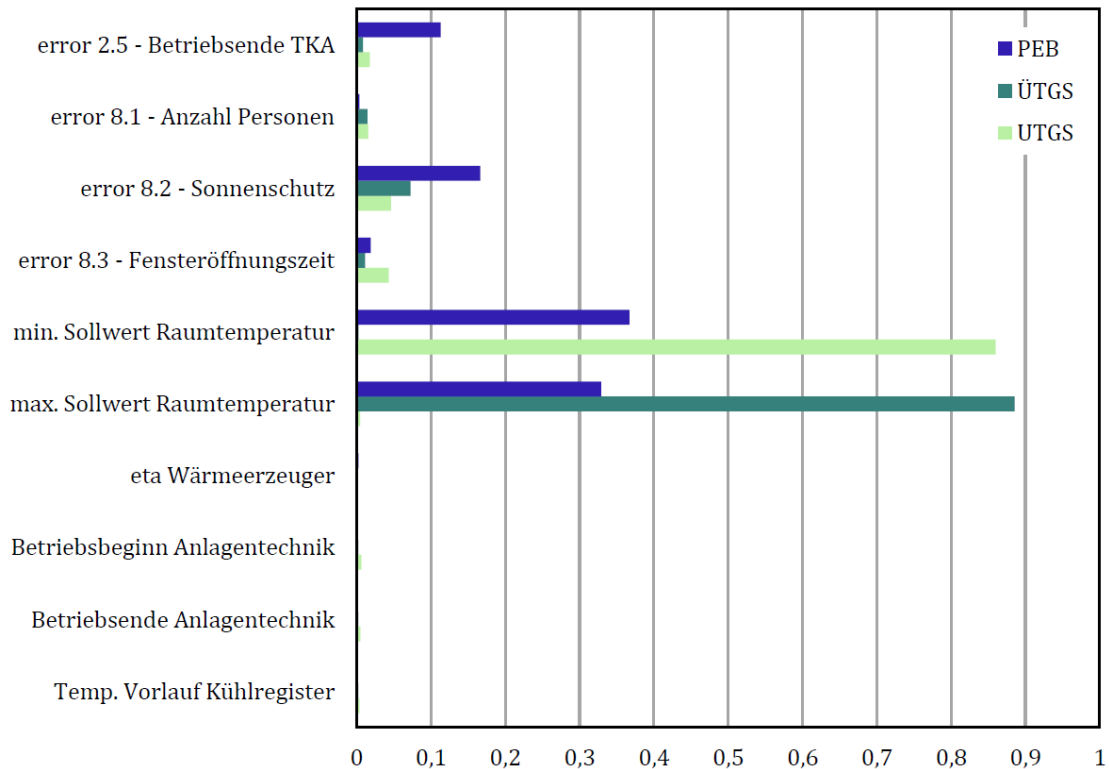


Abbildung 8: Totaleffekte der spezifischen SA von Parametergruppe A, B & C

Die Input-Parameter mit dem größten Einfluss auf die Zielfunktionen, sind der nachstehenden Tabelle 9 zu entnehmen. Um den gesamten Einfluss der sensitivsten Eingangsgrößen zu quantifizieren, werden die Totaleffekte von Rang 1 bis 3 für jede Zielgröße addiert und daraus ergeben sich für den Primärenergiebedarf 87 %, für die Übertemperaturgradstunden 98 % und für die Untertemperaturgradstunden 95 %. Somit kann nahezu vollständig die gesamte Unsicherheit in den Modelloutput der einzelnen Zielgrößen durch die drei einflussreichsten Parameter beschrieben werden.

Tabelle 9: Zusammenfassung der einflussreichsten Faktoren der spezifischen SA von Parametergruppe A, B & C

| Rang | Input-Parameter | Totaleffekte |
|---|--|--------------|
| Primärenergiebedarf [kWh/m²a] | | |
| #1 | Minimaler Raumlufthtemperatur-Sollwert | 0,37 |
| #2 | Maximaler Raumlufthtemperatur-Sollwert | 0,33 |
| #3 | error 8.2 – Sonnenschutz | 0,17 |
| Übertemperaturgradstunden [Kh/a] | | |
| #1 | Maximaler Raumlufthtemperatur-Sollwert | 0,89 |
| #2 | error 8.2 – Sonnenschutz | 0,07 |
| #3 | error 8.1 – Anzahl Personen | 0,02 |

| Rang | Input-Parameter | Totaleffekte |
|--|---------------------------------------|--------------|
| Untertemperaturgradstunden [Kh/a] | | |
| #1 | Minimaler Raumlufthemperatur-Sollwert | 0,86 |
| #2 | error 8.2 – Sonnenschutz | 0,05 |
| #3 | error 8.3 – Fensteröffnungszeit | 0,04 |

Diese Ergebnisse und Erkenntnisse dienen nun als Grundlage für die weiterführenden simulationstechnischen Untersuchungen im Kontext von realen Untersuchungsgebäuden. Dementsprechend werden in weiterer Folge jene Betriebs-, Bedien- und NutzerInnenfehler weiterführend untersucht, die auf Basis der Totaleffekte die ersten drei Plätzen für die jeweilige Zielgröße belegt haben.

- Min. Raumlufthemperatur-Sollwert
- Max. Raumlufthemperatur-Sollwert
- Regelung Sonnenschutz
- Anzahl Personen
- Fensteröffnungszeit

4.3 Gebäudesimulationen und Parameterstudien Reale Untersuchungsgebäude

4.3.1 Modellierungen und Simulationsrandbedingungen

In den vorangegangenen Abschnitten wurde die angewandte Methodik im Rahmen dieses Forschungsprojektes anhand eines generischen Gebäudemodells gezeigt. Die Ergebnisse der Monte-Carlo-Simulationen wurden in Form von Sensitivitäts- und Unsicherheitsanalysen dargestellt und darauf aufbauend relevante Erkenntnisse abgeleitet.

Im nächsten Arbeitsschritt erfolgt nun die Analyse und Untersuchung realer Gebäude. Hierbei wird einerseits ein Gebäude mit High-Tech Ansatz und andererseits ein Gebäude Low-Tech Aspekten ausgewählt (siehe „TGA-Bewertungsmatrix“ im Partnerprojekt „Nutzerkomfort durch low-tech Konzepte in Gebäuden“ [Lipp, Munoz et al., 2022]). Die beiden Untersuchungsobjekte werden simulationstechnisch abgebildet und in weiterer Folge hinsichtlich Performance Gaps und deren Wechselwirkungen zwischen Energiebedarf und thermischen Komfort verglichen.

Als Untersuchungsobjekte dienen zwei Gebäude in Berlin. Dabei entspricht das Gebäude vom BMI in der Krausenstraße (KRA) dem Low-Tech und das Gebäude vom BBSR am Reichpietschufer (RPU) dem High-Tech Ansatz. Der Großteil der Angaben bezieht sich auf Informationen und Unterlagen des BBSR. Nicht vorhandene Gebäudeinformationen werden in Form von normativen Grundlagen, allgemeinen Planungsgrundlagen, Literaturwerten oder ggf. mit Annahmen in Abhängigkeit von Gebäudetyp und Baualtersklasse ergänzt.

Pre-Processing: Auswahl der Input-Parameter und Definition der Wahrscheinlichkeitsverteilungen

Eine der wesentlichen Schnittstellen zwischen den beiden Forschungsprojekten „Robuste, nutzerfreundliche und kostengünstige TGA in Gebäuden“ und „Nutzerkomfort durch low-tech Konzepte in Gebäuden“ [Lipp, Munoz et al., 2022] bilden die Umfragen zum NutzerInnenverhalten. Auf Basis der ausgewerteten Fragebögen und deren Ergebnissen in Form von statistischen Kenngrößen können Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen abgeleitet und diese wiederum als Input für die Monte-Carlo-Simulationen verwendet werden. Hierfür wurden jene fünf Parameter, die sich in den Untersuchungen mit dem generischen Gebäudemodell als besonders sensitiv herausgestellt haben, in die Fragebögen integriert und werden nachfolgend beschrieben:

1. Input-Parameter „Minimaler Raumlufttemperatur-Sollwert“

Zur Definition der Wahrscheinlichkeitsverteilung für den Input-Parameter „Min. Raumlufttemperatur-Sollwert“ wurden Messdaten unterschiedlicher Räume in den beiden Bürogebäuden während der Heizperiode untersucht. Hierbei wurden vorrangig Räume ohne bzw. mit nur geringer solarer Einstrahlung berücksichtigt, um externe Wärmeeinträge und somit eine „Verfälschung“ des Heiz-Sollwerts auszuschließen. Dementsprechend wurden bei dem Untersuchungsgebäude „Krausenstraße“ die Räume in den unteren Geschoßen mit Orientierung Richtung Innenhof und

beim „Reichpietschufer“ die Räume mit Nord-Orientierung als repräsentative Zonen für die Auswertungen herangezogen. Hierbei konnte festgestellt werden, dass sich die Werte für die Raumluffttemperaturen während der Heizsaison in einem Wertebereich bewegen und meist bei ca. 21 – 24°C liegen. Den normativen Bezug für diese Messergebnisse liefert das Komfortband nach DIN EN 16798-1, wo in Abhängigkeit der Außenlufttemperatur ein Wertebereich für die operative Raumtemperatur angegeben ist (siehe Abbildung 9). Bis zu einer Außenlufttemperatur von 16°C, welche für die beiden Gebäude als Heizgrenztemperatur angesehen werden kann und folglich die Heizperiode abbildet, erstreckt sich der Wertebereich für die operative Raumtemperatur von 20 – 24 °C. Aus diesem Grund wird für den Input-Parameter „Min. Raumluffttemperatur-Sollwert“ eine Gleichverteilung zwischen diesen beiden Werten angenommen. Für die Punkt- bzw. Einzelsimulationen wird der „Min. Raumluffttemperatur-Sollwert“ mit 21°C nach DIN V 18599-10 definiert.

2. Input-Parameter „Maximaler Raumluffttemperatur-Sollwert“

Der Input-Parameter „Max. Raumluffttemperatur-Sollwert“ bildet analog zum „Min. Raumluffttemperatur-Sollwert“ den Sollwert für die Kühlung während der Sommermonate ab. Da ausschließlich beim „Reichpietschufer“ eine Kühlung durch dezentrale Umluftkühler möglich ist, wird diese Eingangsgröße nur bei den Simulationen für dieses Untersuchungsgebäude implementiert. Wie bereits zuvor beschrieben, wurde auch hier auf Basis von Messungen eine Auswertung und Analyse der Raumluffttemperaturen im Sommer vorgenommen. Dabei konnte festgestellt werden, dass sich die Messergebnisse sehr gut mit den operativen Raumtemperaturen der EN 16798-1 decken. In der Norm wird, wie in Abbildung 9 ersichtlich, das operative Temperaturband ab einer Außenlufttemperatur von 32°C mit 24 – 28°C angegeben. Resultierend wird dieser Wertebereich für die Wahrscheinlichkeitsverteilungen gewählt und mittels einer Gleichverteilung abgebildet. Der „Max. Raumluffttemperatur-Sollwert“ wird für die Punkt- bzw. Einzelsimulationen mit 24°C nach DIN V 18599-10 beziffert.

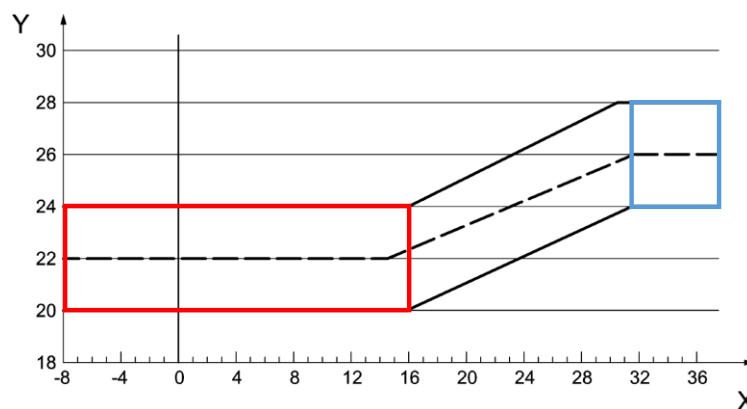


Abbildung 9: Komfortband nach EN 16798-1 für Wertebereich Input-Parameter Sollwerte Heizen / Kühlen (Y = operative Raumtemperatur [°C]; X = Außenlufttemperatur [°C])

3. Input-Parameter „Regelung Sonnenschutz“

Diese Eingangsgröße wurde auf Basis der Ergebnisse des generischen Gebäudemodells und der sich dargestellten großen Sensitivität auf alle drei Zielgrößen als Input für das Fragebogendesign an das Partnerprojekt „Nutzerkomfort durch low-tech Konzepte in Gebäuden“ übertragen. Dadurch wurden die wesentlichen Eigenschaften zum Sonnenschutz in Bezug auf den NutzerInnenkomfort in den Gebäuden abgefragt. Für die simulationstechnische Abbildung sind hier drei Faktoren zu nennen, die in der Gebäudemodellierung implementiert bzw. berücksichtigt werden. Erstens die Lage der Verschattungselemente: ob diese innenliegend oder außenliegend angeordnet sind, dient im Wesentlichen zur Kontrolle der Gebäudeangaben und Dokumentationsunterlagen. Die Hauptrolle spielt die Bedienbarkeit des Sonnenschutzes und hier wurde abgefragt: ob diese manuell bedienbar oder automatisch über die Gebäudeleittechnik (GLT) gesteuert werden. Bei beiden Untersuchungsgebäuden ist der Sonnenschutz für NutzerInnen manuell bedienbar und der einzige Unterschied besteht lediglich darin, dass beim „Reichpieteschufer“ dies elektrisch bzw. motorbetrieben und in der „Krausenstraße“ mechanisch bzw. händisch passiert. Um diesen Output der NutzerInnenbefragungen in die Gebäudemodelle überzuführen, wird die Eingangsgröße „Regelung Sonnenschutz“ über dem Simulationsparameter „Grenzbestrahlungsstärke“ definiert. Durch die Grenzbestrahlungsstärke wird angegeben, ab welcher solaren Einstrahlung auf das Außenfenster der Sonnenschutz geschlossen bzw. geöffnet wird. Die normativen Grundlagen sind in der DIN 4108-2 verankert und dort wird ein Wert von 150 W/m² für Nord-, Nordost- und Nordwestorientierte Fenster bzw. 200 W/m² für alle anderen Orientierungen angegeben (Referenzwerte für Punkt- bzw. Einzelsimulationen). Im Zusammenhang mit diesem Input-Parameter ist das Ziel, das gesamte Spektrum an möglichen Nutzungsszenarien bzw. möglichen NutzerInnenverhalten abzubilden. Dementsprechend werden an dieser Stelle die zwei Extremvarianten, also NutzerInnen die den Sonnenschutz dauerhaft geschlossen bzw. dauerhaft geöffnet haben, betrachtet. Resultierend wird der Wertebereich für diese Eingangsgröße, in Abhängigkeit der Strahlungsdaten für den entsprechenden Standort, zwischen 0 (Sonnenschutz dauerhaft geschlossen) – 1009 W/m² (Sonnenschutz dauerhaft geöffnet) gewählt. Abgerundet wurde die Auskunft über das NutzerInnenverhalten für diesen Input-Parameter mit der Frage nach der Veränderung der Temperatur sowohl im Winter als auch im Sommer: inwiefern der Sonnenschutz hier Anklang findet bzw. eingesetzt wird, um die Relevanz dieser Maßnahme nachzuweisen.

4. Input-Parameter „Anzahl Personen“

Diese Eingangsgröße wurde ebenfalls aufgrund des hohen, angestrebten Detaillierungsgrad der Modellierung in die Fragebögen integriert, um hier einen Mehrwert für die Simulationen zu generieren. Daher handelt es sich um die Abfrage: wie viele Einzel- bzw. Mehrpersonenbüros in den jeweiligen Gebäuden existieren und folglich, wie sich die Konstellation der Mehrpersonenbüros zusammensetzt (Zwei-, Drei-, Vier, Fünfpersonenbüros). Dadurch können einerseits die internen Wärmegewinne durch Personen und andererseits durch die elektrische Ausstattung bzw. Arbeitsgeräte realitätsnah modelliert werden. Im Vergleich dazu werden in der entsprechenden Norm DIN V 18599-10 für diese beiden Energieströme durch Wärmegewinne drei Kategorien „niedrig / mittel / hoch“ mit Pauschalwerten angegeben. Nichtsdestotrotz hat die abschließende Auswertung und Bewertung der Umfrageergebnisse gezeigt, dass die gesamte Bandbreite der DIN V 18599-10 in diesem Zusammenhang gute Übereinstimmungen liefert. Dementsprechend wird für diesen Input eine Normalverteilung mit dem Erwartungswert von 100 W („mittel“) pro Arbeitsplatz (AP) gewählt und resultiert in einem Minimal- und Maximalwert von 50 W/AP („niedrig“) bzw. 150 W/AP („hoch“). Für die Punkt- bzw. Einzelsimulationen wird der elektrische Anschlussleistung für die Arbeitsgeräte mit 100 W/AP („mittel“) nach DIN V 18599-10 festgelegt und hinsichtlich der Raumaufteilung bzw. Belegung wurden für die Referenzvarianten folgende Ausgangsszenarien (vgl. Erwartungswerte) in Absprache mit dem Auftraggeber definiert: das Gebäude in der „Krausenstraße“ wird durch Einzelbüros und jenes am „Reichpietschufer“ durch Zweipersonenbüros abgebildet.

5. Input-Parameter „Fensteröffnungszeit“

Die Dauer der Fensteröffnungszeit ist im Hinblick auf die Realität äußerst schwer allgemeingültig zu beschreiben bzw. nicht generell quantifizierbar und daher für die Gebäudesimulation eine äußerst kritische sowie sensible Eingangsgröße. Im Planungsprozess für zukünftige Gebäude bzw. der dynamisch-thermischen Simulationen können hier nur Annahmen hinsichtlich des späteren NutzerInnenverhaltens getroffen werden. Daher wird im Rahmen dieses Projektes besonderer Wert auf die Abfrage dieses Inputs gelegt. Resultierend wurde im Fragebogen sowohl für den Sommer als auch Winterfall das detaillierte Lüftungsverhalten abgefragt. Dies passierte einerseits über die Dauer bzw. Zeitspanne der Fensteröffnung pro Tag in der jeweiligen Jahreszeit und andererseits durch die Relevanz der Fensteröffnung zur Veränderung der Temperatur im Raum. Die abschließenden Auswertungen im Partner-Forschungsvorhaben haben bestätigt, dass hier allgemeingültige Aussagen nur schwer zu treffen sind und das Lüftungsverhalten äußerst unterschiedlich praktiziert wird. Beispielsweise erstreckt sich in der „Krausenstraße“ die Fensteröffnungsdauer pro Tag im Winter von weniger als 1 h (ca. 10 % der NutzerInnen) bis hin zu mehr als 5 h (ca. 20 % der der NutzerInnen). Der Großteil aller Befragten (ca. 50 %) hat angegeben,

im Winter täglich insgesamt zwischen 1 – 3 h zu lüften [Lipp, Munoz et al., 2022]. Diese langen Fensteröffnungszeiten im Gebäude „Krausenstraße“ während der Heizperiode konnten nach Rücksprache mit dem Fördergeber bzw. NutzerInnen einerseits auf Schadstoffe, die aus Baustoffen bzw. Bodenbelägen austreten und andererseits auf das regelmäßige Lüften als Corona-Schutz-Maßnahme zurückgeführt werden.

Um die Ergebnisse des NutzerInnenverhalten für die Fensteröffnungszeiten bestmöglich wiederzuspiegeln, werden für die Wahrscheinlichkeitsverteilungen die Eigenschaften der schiefwinkligen Verteilungen angewendet. Darüber hinaus werden wie bereits beim Input „Regelung Sonnenschutz“ die Extremvarianten von einem dauerhaft geöffneten bzw. dauerhaft geschlossen Fenster untersucht. Aufgrund der Tatsache, dass keine Information über den Fensteröffnungsmodus (z. B. gekippt, vollständig geöffnet, angelehnt, etc.) vorliegt, werden in den Simulationen durch die in den NutzerInnenbefragungen angegeben sehr langen Zeitintervalle für die Öffnungen, gekippte Fenster modelliert. Im Gegensatz dazu, wird bei den Referenzsimulationen in Form der Punkt- bzw. Einzelsimulationen von einem idealen NutzerInnenverhalten hinsichtlich des Lüftungsverhaltens angenommen, welches sich am Komfortband der DIN EN 16798-1 orientiert.

Simulationsrandbedingungen: Wetterdatensätze DWD TRY 2015 & DWD TRY 2045

Neben Betriebsfehlern in Gebäudetechnik (Technical Gap) und dem NutzerInnenverhalten (User / Usage-Gap) werden in diesem Forschungsprojekt auch die Auswirkungen des Klimawandels auf den Gebäudebetrieb berücksichtigt. Zu diesem Zweck werden auf Basis der Testreferenzjahre (TRY) des Deutschen Wetterdienstes (DWD) zukünftige Wetterdatensätze verwendet und in die Simulationen implementiert. Mittels der zukünftigen Wetterdatensätze von DWD-TRY 2045 sollen die Auswirkungen und Folgen des anthropogenen Klimawandels in Form der steigenden Außenlufttemperatur dargestellt werden. Dabei liegt der Betrachtungszeitraum zwischen den Jahren 2030 bzw. 2060 und wird mit Referenzjahr 2045 beschrieben.

Auf Basis dieses Klimaberatungsmodul des DWD wird auch eine Klima- und Standortanalyse für beide Gebäude durchgeführt. Es lässt sich festhalten, dass bei dem gegenwärtigen DWD-TRY 2015 die Außenlufttemperatur einen Maximalwert von ca. 31 °C im Hochsommer erreicht; der Minimalwert im Winter beträgt Mitte Januar ca. -15 °C, was eine sehr gute Übereinstimmung mit der Norm-Außentemperatur nach DIN EN 12831 für Berlin mit -14 °C darstellt. Im Gegensatz dazu, erhöhen sich bei dem Prognose-Wetterdatensatz DWD-TRY 2045 die Temperaturen sowohl im Sommer auf max. 35 °C als auch Winter auf -6 °C als Tiefsttemperatur. Die nachfolgende Abbildung 10 zeigt die Gegenüberstellung der Wetterdatensätze DWD TRY 2015 und DWD TRY 2045 anhand der Außenlufttemperaturen und Jahresdauerlinien für das Gebäude am Standort Krausenstraße in Berlin.

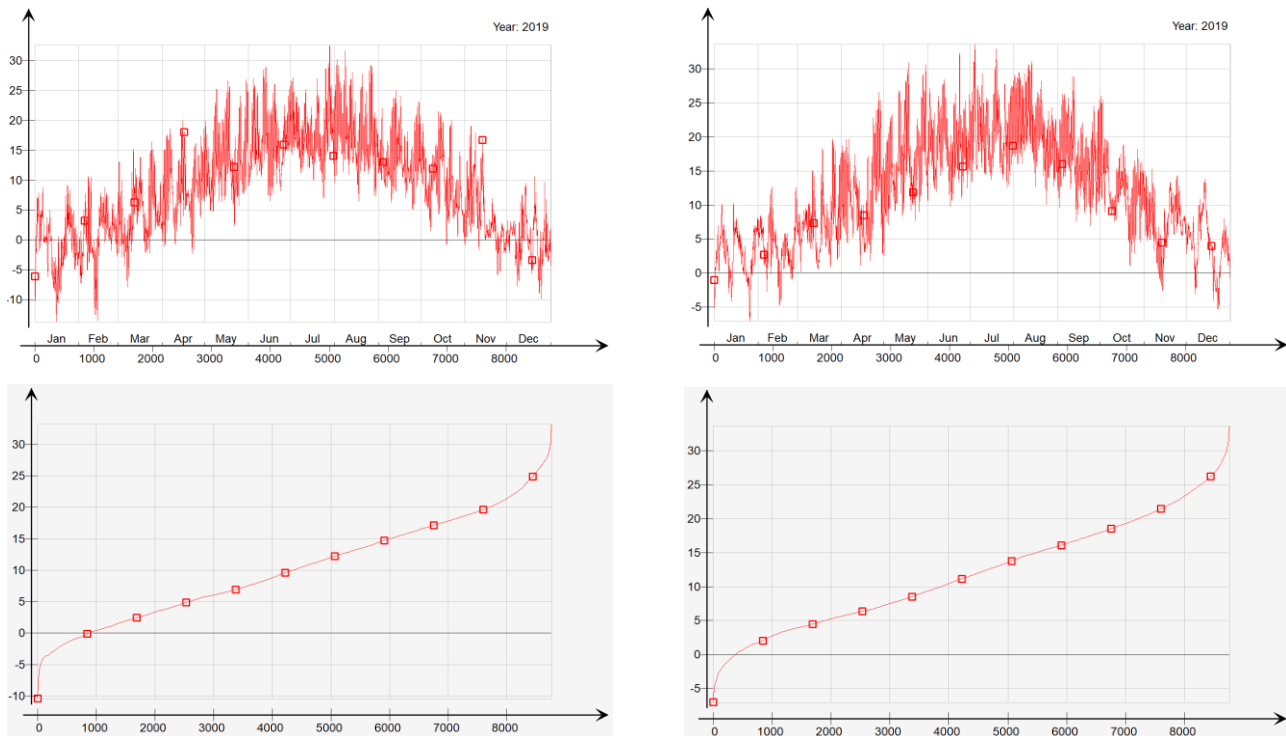


Abbildung 10: Außenlufttemperaturen und Jahresdauerlinien für DWD TRY 2015 (links) und DWD TRY 2045 (rechts) am Standort Krausenstraße

4.3.2 Vorbemerkungen zu den Simulationsergebnissen Reale Untersuchungsobjekte

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der Unsicherheits- und Sensitivitätsanalysen auf Basis der Monte-Carlo-Simulationen für die beiden Untersuchungsgebäude dargestellt. Dabei werden die Ergebnisse anhand der Energie Performance Gaps mit den Zielgrößen Primär- bzw. Endenergiebedarf für Heizen (und Kühlen bei „Reichpietschufer“) sowie des Komfort Performance Gaps mit den Zielgrößen Über- und Untertemperaturgradstunden beschrieben. Für die Auswertungen zum thermischen Komfort werden aus Gründen der Vergleichbarkeit Süd-orientierte Zonen, die sich in mittleren Geschossen befinden und dementsprechend nach oben (Decke) und unten (Fußboden) adiabatisch sind, gewählt.

In den Ergebnisdarstellungen werden aus Gründen der Lesbarkeit und Überschaubarkeit folgende Abkürzungen bzw. Indexe in Anlehnung an die DIN EN 15232 für die Input-Parameter eingeführt:

- Index: 400 / Input-Parameter: Punktsimulation / Wertebereich: –
- 111 / Min. Raumlufthtemperatur-Sollwert / 20 – 24°C (Punktsimulation: 21°C)
- 114 / Max. Raumlufthtemperatur-Sollwert / 24 – 28°C (Punktsimulation: 24°C)
- 611 / Regelung Sonnenschutz / dauerhaft geschlossen (min. Grenzbestrahlungsstärke) – dauerhaft geöffnet (max. Grenzbestrahlungsstärke) (Punktsimulation: 200 W/m²)

- 811 / Anzahl Personen / 1 – 3 (KRA) bzw. 1 – 5 (RPU) (Punktsimulation: KRA: 1 Person; RPU: 2 Personen)
- 823 / Fensteröffnungszeit / dauerhaft geschlossen – dauerhaft geöffnet (Punktsimulation: idealer NutzerInnen als Funktion des Komfortbandes nach DIN EN 16798-1)

4.3.3 Simulationsergebnisse Gebäude mit Low-Tech Ansatz

Krausenstraße (DWD TRY 2015)

Die Auswertungen der „Krausenstraße“ werden anhand der Energieströme für die Bereiche Raumwärmeversorgung, Trinkwarmwasserbereitung, Betriebsstrom gebäudetechnischer Anlagen und Beleuchtung sowie NutzerInnenstrom für Arbeitsgeräte vorgenommen. Der erste bzw. oberste Ergebniseintrag in Abbildung 11 und Abbildung 12 zeigt die Punkt- bzw. Einzelsimulation für die jeweiligen Zielgrößen. Anschließend werden darunter die resultierenden Werteverteilungen der Monte-Carlo-Simulationen mittels Box-Plots dargestellt.

Wie in Abbildung 11 ersichtlich, ergibt die Punktsimulation einen Primärenergiebedarf von 110 kWh/m²a und einen Endenergiebedarf für Wärme (EEB_W) von 90 kWh/m²a sowie für den thermischen Komfort 2500 Kh/a Übertemperatur- und 90 Kh/a Untertemperaturgradstunden.

Die Variation des Heiz-Sollwerts (Index 111) mittels der Eingangsgröße „Min. Raumlufttemperatur-Sollwert“ (20 – 24 °C) bewirkt beim PEB kaum Veränderungen. Im Gegensatz dazu sind beim EEB_W die Auswirkungen der erhöhten / reduzierten Solltemperaturen sehr gut erkennbar. Dadurch lässt sich der Nachweis anstellen, dass pro Kelvin Temperaturreduktion-/erhöhung ein energetischer Mehrbedarf- bzw. Einsparung von ca. 5 % die Folge ist. Im Bereich der Übertemperaturgradstunden (UETGS) steigen die Werte durch den erhöhten Heiz-Sollwert bis zu 3200 Kh/a weiter an und verstärken das grundlegende Überhitzungsproblem in den Zonen (Referenzwert Punktsimulation 2500 Kh/a). Diese Problematik der thermischen Unbehaglichkeit in Bezug auf die Überhitzungsproblematik wurde auch in den Ergebnissen der NutzerInnenbefragungen festgestellt [Lipp, Munoz et al., 2022] und konnte somit simulationstechnisch nachgewiesen bzw. bestätigt werden. Für die Zielgröße Untertemperaturgradstunden (UNTGS) ergeben sich hier als einziger Input kritische Parameterkonstellationen; wenn der Heiz-Sollwert im Bereich von 20°C liegt, führt dies zu einem starken Anstieg der UNTGS. Die Begründung dafür liegt darin, dass sich der Heiz-Sollwert auf die Raumlufttemperatur bezieht und die Auswertungen für den thermischen Komfort nach DIN EN 16798-1 auf die operative Raumtemperatur (siehe Abbildung 9).

Der Einfluss der Eingangsgröße „Regelung Sonnenschutz“ (Index 611) führt de facto zu keinen Auswirkungen auf die beiden Energiebedarfe (PEB, EEB_W) und resultiert somit in keinem Energie Performance Gap. Im Bereich der UETGS sind sehr wohl Veränderungen feststellbar und sowohl

ein nicht funktionierender Sonnenschutz, der dauerhaft geöffnet ist, als auch das NutzerInnenverhalten in Form von hohen Grenzbestrahlungsstärken verstärken in diesem Zusammenhang die Überhitzungsproblematik in den Zonen.

Die Personenanzahl (Index 811) führt beim PEB zu einem großen Energie Performance Gap und im Extremfall (Belegung mit 3 Personen und 150 W Anschlussleistung pro Arbeitsplatz) sogar zu einer Erhöhung von ca. 90 % gegenüber dem Ausgangsszenario der Einzelsimulation. Dies ist auf den erhöhten elektrischen Energiebedarf für den NutzerInnenstrom durch Arbeitsgeräte zurückzuführen. Im Gegensatz dazu, reduziert sich der Endenergiebedarf für das Heizen, umso mehr Personen bzw. Arbeitsgeräte sich in der Zone befinden und erhöhte interne Wärmegewinne vorhanden sind. Diese Thematik zeigt eindeutig die Notwendigkeit der wechselseitigen Betrachtungen von Energie Performance Gap und Komfort Performance Gap in diesem Zusammenhang. Die internen Wärmegewinne durch Personen und Geräte führen im worst-case sogar zu einem Anstieg der UETGS um den Faktor 2 (Referenz 2500 Kh/a; max. Wert 5000 Kh/a). Die letzte variierende Eingangsgröße „Fensteröffnungszeit“ (Index 823) führt aufgrund der ganzjährigen Abbildung des Fehlerfalls (definierte Fensteröffnung auch im Winter) zu einem geringen Anstieg bei Primär- und Endenergiebedarf Wärme. Die größte Auswirkung ist für diesen Input bei der Zielgröße UETGS infolge des Lüftungsverhalten zu erkennen. Im Sommer wird das bereits stark überhitzte Gebäude durch die einströmende warme Außenluft über die gekippten Fenster zusätzlich aufgeheizt und führt somit zu einem extremen Anstieg der UETGS auf bis zu 6000 Kh/a.

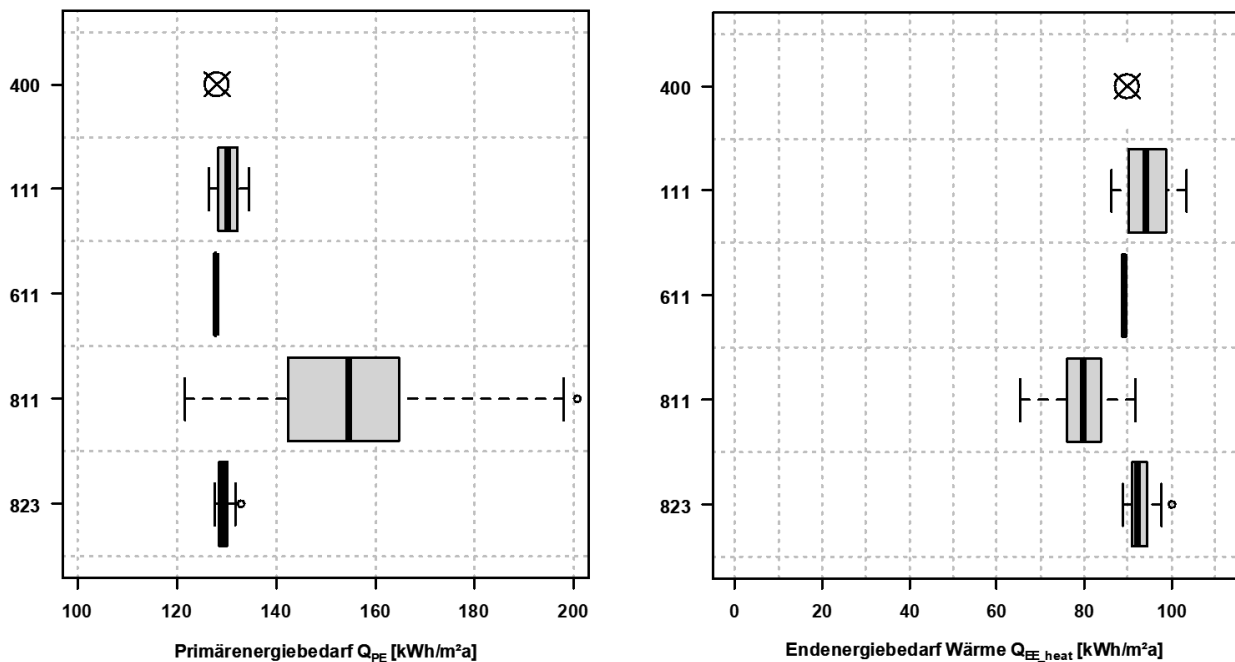


Abbildung 11: Box-Plots für Zielgrößen Energie Performance Gap und Gebäude „KRA“ (DWD TRY 2015)

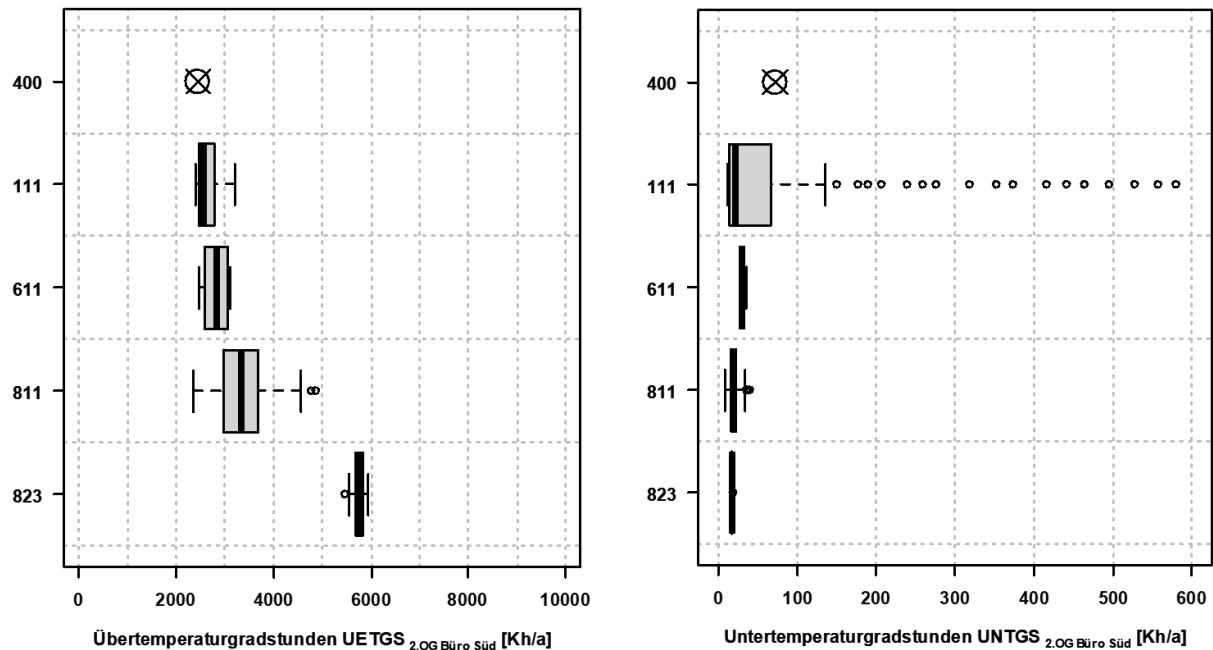


Abbildung 12: Box-Plots für Zielgrößen Komfort Performance Gap und Gebäude „KRA“ (DWD TRY 2015)

Krausenstraße (DWD TRY 2045)

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse der Monte-Carlo-Simulationen für die „Krausenstraße“ unter Berücksichtigung des anthropogenen Klimawandels durch die resultierende Erhöhung der Außenlufttemperaturen analysiert. Dafür wird der Wetterdatensatz vom DWD für das repräsentative Testreferenzjahr 2045 (Zeitraum 2030 bis 2060) am definierten Standort des Gebäudes verwendet. Die unten stehende Abbildung 13 und Abbildung 14 zeigen eine sehr ähnliche Charakteristik der Ergebnisse im Vergleich zu den vorangegangenen Untersuchungen ohne die zukünftigen Klimaveränderungen. Im Wesentlichen bestehen die Hauptunterschiede darin, dass sich bei allen Simulationsszenarien die Überhitzungsproblematik durch den Anstieg der Übertemperaturgradstunden weiter zuspitzt und sich sowohl der PEB als auch der EEB-Wärme durch die reduzierten Transmissions- und Lüftungswärmeverluste infolge der steigenden Außenlufttemperaturen reduzieren. Bei diesen definierten Simulationsrandbedingungen sinkt der PEB im Bereich der Punktsimulationen um ca. 10 % von zuvor 110 kWh/m²a (DWD TRY 2015) auf nun 100 kWh/m²a und der EEB-Wärme sinkt um ca. 30 % von 90 kWh/m²a (DWD TRY 2015) auf 65 kWh/m²a. Eine ähnliche Ausprägung ist bei der Variation aller Eingangsgrößen der Fall und kann als analog zu den oben beschriebenen Auswertungen gesehen werden. In diesem Fall führen die variierten Sollwerte für die Heizung (20 – 24 °C) bei der Zielgröße Endenergiebedarf Wärme zu einer Differenz von ca. 7 % je Kelvin Temperaturabweichung vom Referenzwert mit 21 °C. Die Begründung für den um 2 Prozentpunkte erhöhten, prozentualen Einfluss der Heiz-Raumtemperatur im Vergleich zur oben genannten Variante „DWD TRY 2015“ (ca. 5 % je Kelvin

Temperaturunterschied) liegt darin, dass sich durch den Zukunftswetterdatensatz der Endenergiebedarf für Wärme (EEB_W) reduziert und sich somit der relative Einfluss von stochastischen Schwankungen vergrößert. Die größten absoluten Veränderungen stellen die Übertemperaturgradstunden dar: hierbei verdoppelt sich der Wert der Punktsimulation gegenüber dem Szenario ohne die klimatischen Anpassungen (DWD TRY 2015: 2500 Kh/a; DWD TRY 2045: 5000 Kh/a). Die Variation aller Eingangsgrößen führt ebenfalls zu einem verstärkten Komfort Performance Gap durch die Klimawandeleffekte.

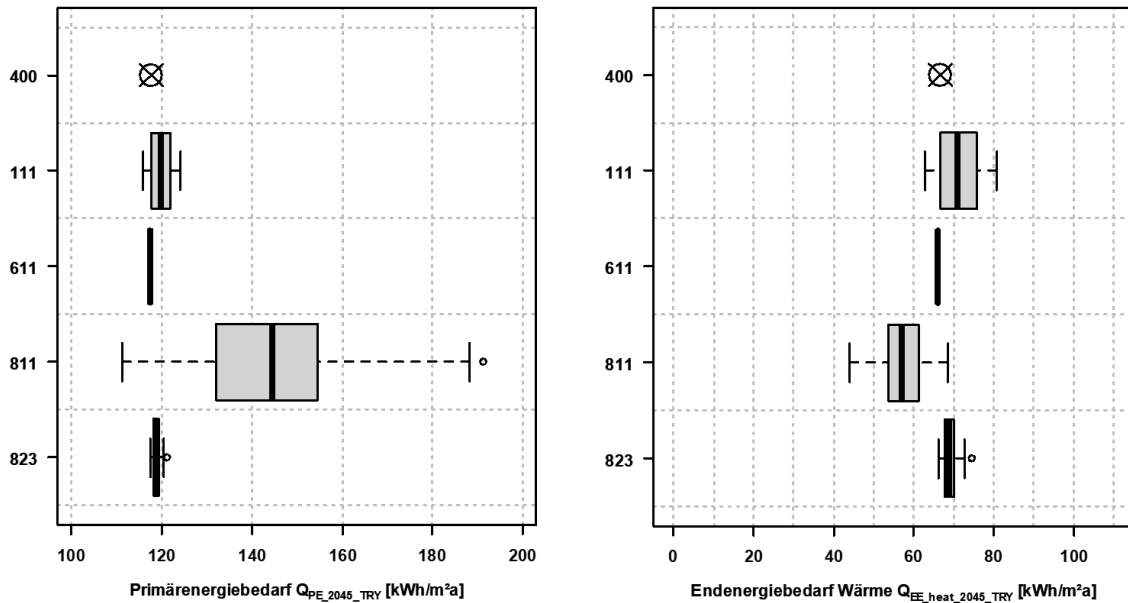


Abbildung 13: Box-Plots für Zielgrößen Energie Performance Gap und Gebäude „KRA“ (DWD TRY 2045)

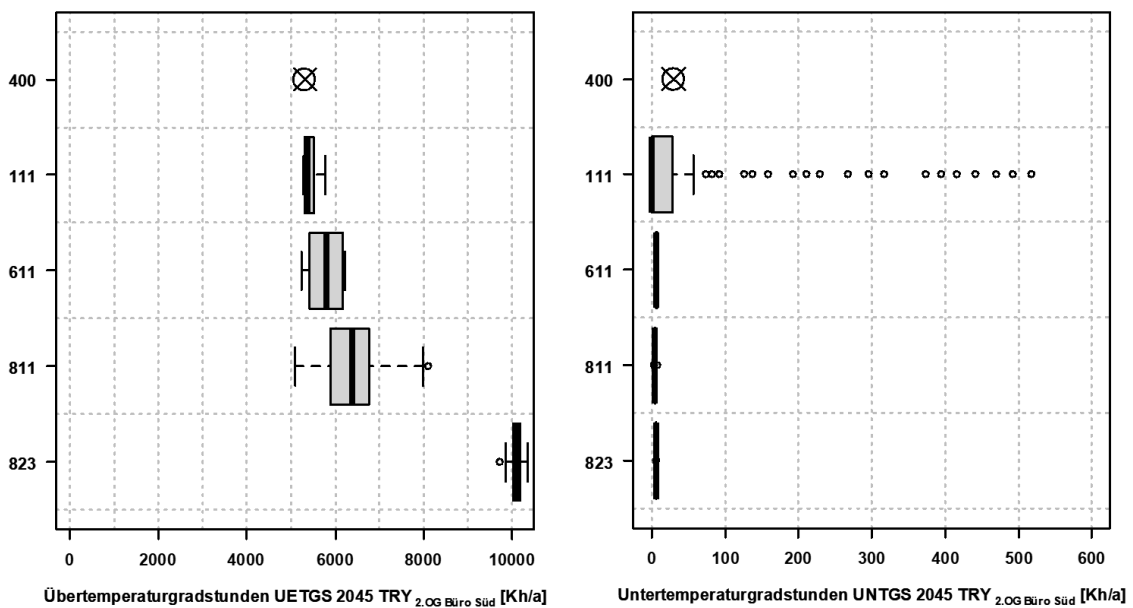


Abbildung 14: Box-Plots für Zielgrößen Komfort Performance Gap und Gebäude „KRA“ (DWD TRY 2045)

4.3.4 Simulationsergebnisse Gebäude mit High-Tech Ansatz

Reichpietschufer (DWD TRY 2015)

Die Energieströme für das Untersuchungsgebäude „Reichpietschufer“ werden durch die vorhandene und umfangreichere Gebäudetechnik um den Kühlbedarf (KB) infolge der dezentralen Umluftkühler in den Räumen bzw. Kühlregister in RLT-Anlage, den Betriebsstrom für die RLT-Anlage sowie die beiden Luftherhitzer (Vor- und Nachheizregister) für Heizzwecke erweitert. Aus diesem Grund wird für diese Untersuchungen in Bezug auf den Energie Performance Gap eine weitere Zielgröße „Endenergiebedarf Kühlung“ (EEB_K) eingeführt. Darüber hinaus besteht ein weiterer Unterschied zu den vorangegangenen Untersuchungen der „Krausenstraße“ in der Anzahl der zu variierenden Input-Parameter, da hier der Einfluss der Eingangsgröße „Max. Raumlufttemperatur-Sollwert“ (Index 114) in Bezug auf die dezentralen Umluftkühlgeräte untersucht werden kann.

Abbildung 15 bzw. Abbildung 16 zeigen die Referenzwerte der Punktsimulationen und ergeben für die einzelnen Zielgrößen folgende Werte: PEB 120 kWh/m²a, EEB_W 42 kWh/m²a, EEB_K 6 kWh/m²a, UETGS 100 Kh/a und UNTGS 5 Kh/a. Die Auswertungen der Monte-Carlo-Simulationen für die Variation der einzelnen Input-Parameter haben folgende Ergebnisse gebracht: die Veränderung des Heiz-Sollwertes durch den Input „Min. Raumlufttemperatur-Sollwert“ (Index 111) beeinflusst den PEB, EEB_K und UETGS nur minimal. Die größten Veränderungen können hierbei für die Zielgrößen EEB_W und UNTGS festgestellt werden. In Abhängigkeit des eingestellten Heiz-Sollwertes ergibt sich ausgehend vom Referenzwert 21 °C ein reduzierter (20 – 21 °C) bzw. erhöhter (21 – 24 °C) Endenergiebedarf Heizung, welcher durchschnittlich mit ca. 13 % pro Kelvin Temperaturabweichung quantifiziert werden kann. In diesem Zusammenhang sei jedoch darauf hingewiesen, dass der energetische Mehrverbrauch des Heizwärmebedarfs jedoch keinen linearen Verlauf darstellt. Das bedeutet, umso größer der Ausgangswert des Heiz-Sollwertes ist, umso stärker nimmt der Heizwärmebedarf (und dessen prozentuale Einsparung) mit jedem zusätzlichen Grad zu (siehe Abbildung 15: „Endenergiebedarf Wärme“ Box-Plot Index 111 linkssteile bzw. rechtsschiefe Verteilung). Bei niedrigen Werten für diesen Input können sich im Bereich von 20 °C ungünstige Parameterkombinationen für die Zielgröße Untertemperaturgradstunden ergeben (siehe Abbildung 16 Index 111), welche durch den Unterschied zwischen der Raumlufttemperatur und der operativen Raumtemperatur zu erklären sind.

Der Input „Max. Raumlufttemperatur-Sollwert“, welcher den Sollwert zur Kühlung beschreibt, hat Einfluss auf den EEB_K und die UETGS. Durch einen reduzierten bzw. höher eingestellten Sollwert (24 – 28 °C; ausgehend vom Referenzwert 24 °C) kann auf endenergetischer Betrachtungsweise eine durchschnittliche Kühlenergie von ca. 14 % pro Kelvin eingespart werden. Hierbei stellt sich bei der Verteilung die gegenläufige Charakteristik zu Index 111 (Variation Sollwert Heizung) dar und

das energetische Einsparpotential des Kühlbedarfs entspricht ebenso keinem linearen Verlauf. Das bedeutet, umso niedriger der Ausgangswert des Kühl-Sollwerts ist, umso stärker nimmt der Kühlbedarf (und dessen prozentuale Einsparung) mit jedem zusätzlichen Grad zu (siehe Abbildung 15: „Endenergiebedarf Kühlung“ Box-Plot Index 114 linkssteile bzw. rechtsschiefe Verteilung). Für die Zielgröße UETGS ergeben sich bei höheren Input-Werten thermisch unbehagliche Zustände, die auf die Charakteristik des Komfortbandes nach DIN EN 16798-1 zurückzuführen sind. Während bei den Simulationen der Sollwert zur Kühlung von z. B. 28 °C ganzjährig als konstant angesetzt wird, bildet dieser Wert in der Norm erst bei hohen Außenlufttemperaturen ab 32 °C den oberen Grenzwert. Dementsprechend können sich für diese Fälle die UETGS bis zu 3500 Kh/a erhöhen und zu Überhitzungsproblemen führen.

Die Regelung des Sonnenschutzes (Index 611) bewirkt mit Ausnahme der UNTGS bei allen Zielgrößen eine Veränderung. Der geringe Anstieg beim PEB ist vorrangig auf den ansteigenden Kühlbedarf infolge von einem geöffneten Sonnenschutz zurückzuführen. Während ein dauerhaft geschlossener Sonnenschutz nur zu einem minimal reduzierten KB führen würde, im Umkehrschluss aber auch zu einem erhöhten Beleuchtungsenergiebedarf, erhöht sich der KB bei einem dauerhaft geöffneten Sonnenschutz um mehr als den Faktor 2 dramatisch. Die Verringerung des EEB_W durch längere Zeiträume in den sich der Sonnenschutz im geöffneten Zustand befindet und sich resultierend die solaren Wärmegewinne erhöhen, wirkt sich in der Betrachtung des PEB aufgrund des relativ niedrigen Primärenergiefaktors (PEF) für die Fernwärme (Berlin: 0,45 [Vattenfall, 2022]) kaum aus. Der Aspekt des geöffneten Sonnenschutzes über längere Zeiträume hat ebenfalls Einfluss auf die Zielgröße UETGS und durch die erhöhten, solaren Einträge können bis zu 1000 Kh/a erreicht werden.

Die beiden weiteren Inputs „Anzahl Personen“ (Index 811) und „Fensteröffnungszeit“ (Index 823) verursachen ausschließlich einen Energie Performance Gap, haben aber aufgrund der funktionierenden Heiz- bzw. Kühlsysteme keine Auswirkungen auf den Komfort Performance Gap. Bei einer erhöhten Personenanzahl wird die überschüssige Wärmemenge durch die dezentralen Umluftkühler „weggekühlt“ und die einströmende Kaltluft wird im Winter bei dem Input „Fensteröffnungszeit“ durch das Heizsystem (Erhöhung Zielgröße EEB_W) bzw. im Sommer der zusätzliche Wärmeeintrag durch das Kältesystem (Erhöhung Zielgröße EEB_K) kompensiert.

Im Bereich des Energie Performance Gap zeigt sich für die Personenanzahl folgendes Bild: der stark ansteigende PEB ist sowohl auf einen erhöhten Kühlbedarf als auch erhöhten Betriebsstrom für die Arbeitsgeräte infolge steigender Personenanzahlen zurückzuführen. Der verringerte EEB_W ist dabei durch den niedrigen PEF von 0,45 kaum ausschlaggebend.

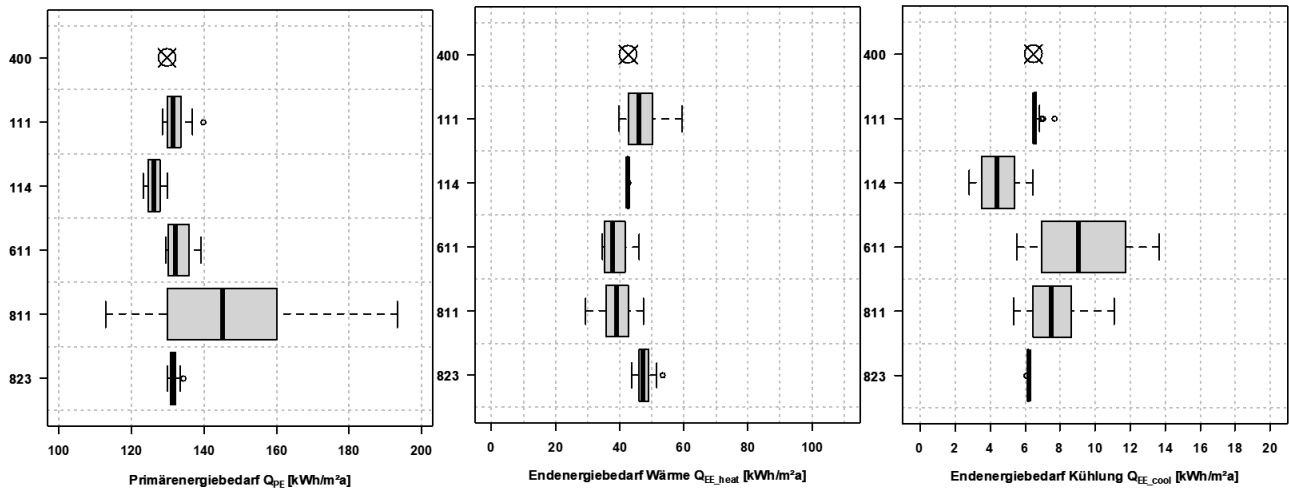


Abbildung 15: Box-Plots für Zielgrößen Energie Performance Gap und Gebäude „RPU“ (DWD TRY 2015)

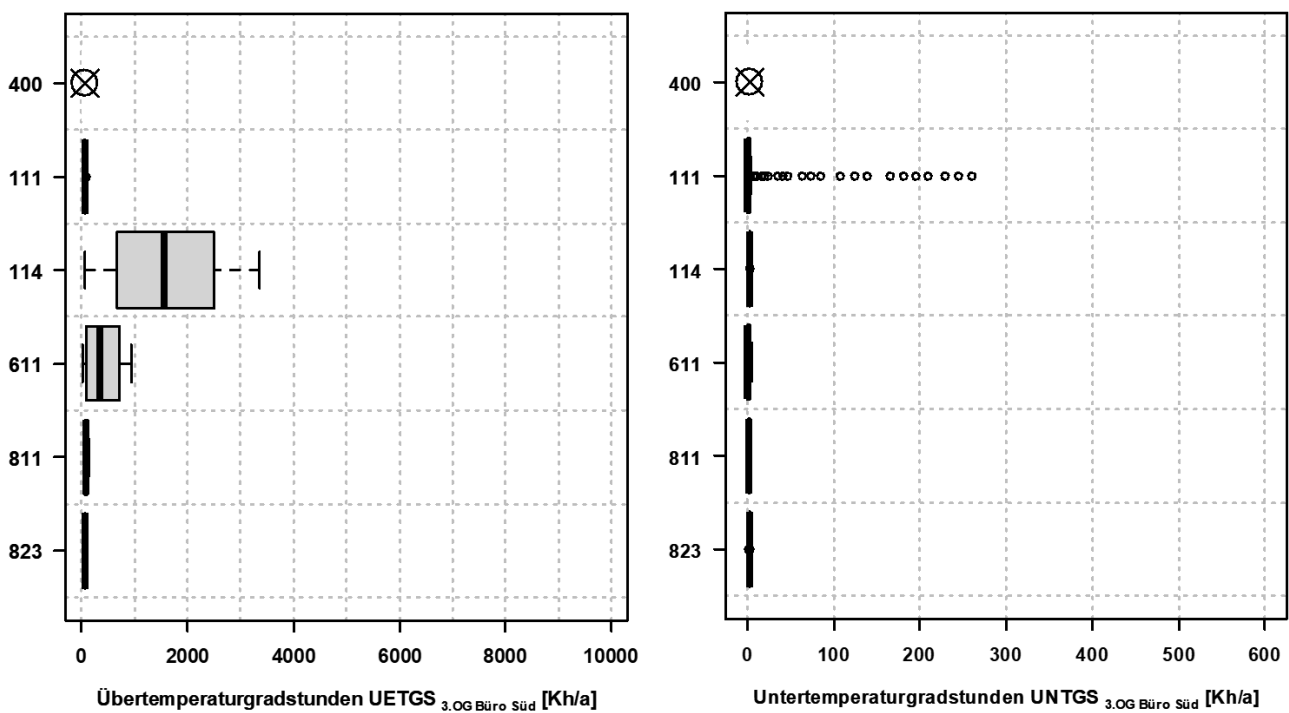


Abbildung 16: Box-Plots für Zielgrößen Komfort Performance Gap und Gebäude „RPU“ (DWD TRY 2015)

Reichpietschufer (DWD TRY 2045)

In diesem Abschnitt werden die Auswirkungen der Klimawandelszenarien für das „Reichpietschufer“ durch den DWD TRY 2045 Wetterdatensatz analysiert. Wie in Abbildung 17 und Abbildung 18 ersichtlich, bleibt die grundlegende Charakteristik und Ausprägung aller Ergebnisse der Monte-Carlo-Simulationen auch in diesem Zusammenhang zu den vorhergehenden Untersuchungen gleich.

In Bezug auf den PEB lässt sich festhalten, dass die eingesparte Heizenergie infolge verringerter Transmissions- und Lüftungswärmeverluste durch den erhöhten Kühlbedarf infolge steigender Außenlufttemperaturen und solar Einstrahlung ausgeglichen wird und somit in einem „Nullsummenspiel“ resultiert.

Die geringer werdende Signifikanz der Heizanforderungen wird durch den Input „Min. Raumlufttemperatur-Sollwert“ ersichtlich. Jedoch steigt das prozentuale Energieeinsparpotential für die Zielgröße Endenergiebedarf Wärme pro Kelvin Temperaturreduktion-/erhöhung um zwei Prozentpunkte von ca. 12 % (DWD TRY 2015) auf durchschnittlich ca. 14 % bei diesem Wetterdatensatz DWD TRY 2045 an. Dieser Sachverhalt lässt sich auf den geringer werdenden Referenzwert für den Heizwärmebedarf zurückführen und führt somit zu einer erhöhten Relevanz von stochastischen Schwankungen im Gebäudebetrieb. Dieser Sachverhalt führt beim Endenergiebedarf Kühlung zu einem gegenläufigen Effekt und im Vergleich zur Variante mit dem Wetterdatensatz DWD TRY 2015 verringert sich in diesem Fall der relative Einfluss von der Eingangsgröße „Sollwert Kühlung“ um zwei Prozentpunkte auf durchschnittlich ca. 12 % pro Kelvin Temperaturreduktion.

Der EEB_W verringert sich nun bei dieser Variante mit der Klimaerwärmung deutlich und die Sollwerte für die Kühlung spielen nun eine übergeordnete Rolle. Der max. Wert (Sollwert Kühlung 24 °C) für den EEB_K verdoppelt sich bei dem Input „Min. Raumlufttemperatur-Sollwert“ nahezu. Hinsichtlich des thermischen Komforts ergeben sich nur kleinere Veränderungen, was auf die implementierte Kühlfunktion der dezentralen Geräte zurückzuführen ist.

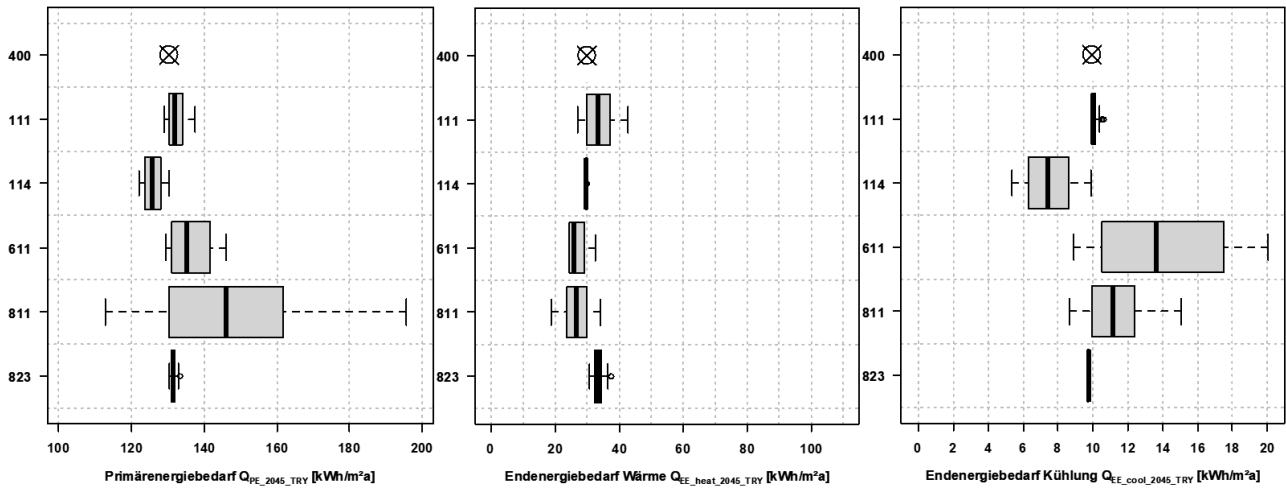


Abbildung 17: Box-Plots für Zielgrößen Energie Performance Gap und Gebäude „RPU“ (DWD TRY 2045)

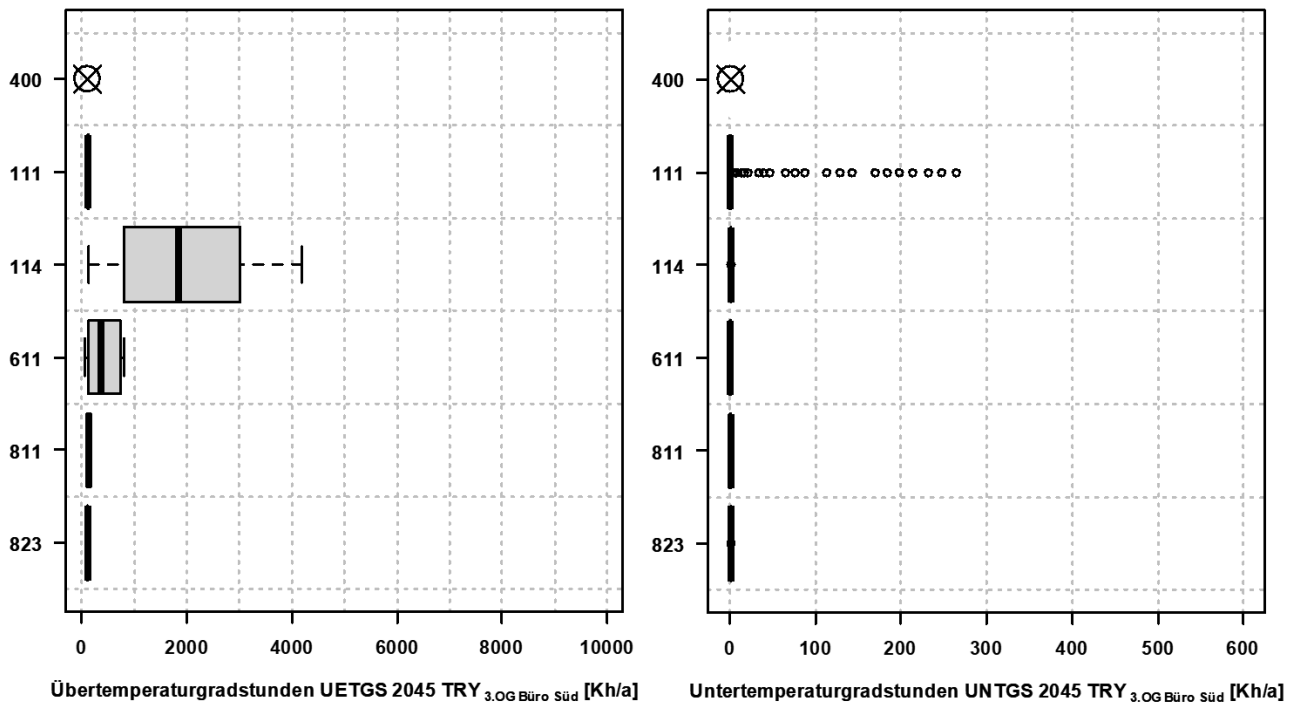


Abbildung 18: Box-Plots für Zielgrößen Komfort Performance Gap und Gebäude „RPU“ (DWD TRY 2045)

4.3.5 Vergleich der Simulationsergebnisse beider Untersuchungsgebäude

In diesem Kapitel werden die Simulationsergebnisse der beiden Untersuchungsgebäude gegenübergestellt und analysiert. Dabei sollen erste Erkenntnisse im Hinblick auf die Auswirkungen von Performance Gaps abgeleitet werden. Darüber hinaus werden die Wechselwirkungen zwischen Energiebedarf und thermischen Komfort im Kontext von Low-Tech und High-Tech Gebäuden verglichen.

Die nachstehende Tabelle 10 zeigt die Simulationsergebnisse der Zielgrößen für korrekte bzw. fehlerfreie Betriebszustände (Index 400 / Punktsimulation) beider Untersuchungsgebäude. Dabei wird ersichtlich, dass sich für die Zielgröße „Primärenergiebedarf“ nur geringe Unterschiede sowohl zwischen den beiden Gebäuden als auch für die Klimaveränderungen ergeben. Das Gebäude mit Low-Tech Ansatz in der Krausenstraße (ohne Kühlung) weist durch die zukünftige Erderwärmung einen reduzierten Primärenergiebedarf von ca. 8 % auf. Jedoch hat diese „Energieeinsparung“ auch negative Auswirkungen auf den thermischen Komfort. Die Übertemperaturgradstunden, welche sich von 2445 Kh/a auf 5314 Kh/a mehr als verdoppeln, zeigen eine bereits vorherrschende Überhitzungsproblematik, die sich zukünftig weiter verschärft. Der Effekt des reduzierten Energiebedarfs durch klimatische Veränderungen in Form des Prognose-Wetterdatensatzes DWD TRY 2045 wird bei beiden Gebäuden insbesondere mittels der Zielgröße „Endenergiebedarf Wärme“ ersichtlich. Sowohl beim Low-Tech (ca. 25 %) als auch beim High-Tech Gebäude (ca. 30 %) verringert sich dieser Wert erheblich und zeigt somit, dass Heizkonzepte in Zukunft eine untergeordnete Rolle einnehmen werden. Demgegenüber unterstreicht die Zielgröße „Endenergiebedarf Kühlung“, welche sich beim RPU infolge der Klimaveränderung um ca. ein Drittel erhöht, die Notwendigkeit innovativer und energieeffizienter Kühlkonzepte bzw. passiver Maßnahmen zur Kühlung für zukünftige Gebäude. Gesamtheitlich betrachtet wird beim Gebäude mit High-Tech Ansatz der reduzierte Heizwärmebedarf durch den erhöhten Kühlbedarf kompensiert; der thermische Komfort stellt sich für das RPU aufgrund der umfangreichen Gebäudetechnik (u.a. Umluftkühlgeräte) in beiden Klimaszenarien als unkritisch heraus. Resultierend kann somit an dieser Stelle festgehalten werden, dass sich unter der Voraussetzung korrekter Betriebszustände für das Objekt mit High-Tech Ansatz in Bezug auf Energiebedarf und thermischen Komfort die Gebäudeperformance besser darstellt. Jedoch stellt diese grundlegende Voraussetzung von dauerhaft korrekten und fehlerfrei vorherrschenden Betriebszuständen hohe Anforderungen und Anstrengungen an die energetischen Qualitätssicherungsmaßnahmen im Gebäudebetrieb. In der Praxis wurde gezeigt, dass ein vollständig korrekter Gebäudebetrieb nur selten erreicht wird und somit wiederum Low-Tech Konzepte mit erhöhter Robustheit angestrebt werden sollten. Dementsprechend könnte man diese unterschiedlichen Bedürfnisse und Wechselwirkungen mit den einfachen Worten: „So viel Technik wie nötig und so wenig wie möglich“ zusammenfassen.

Tabelle 10: Übersicht der Simulationsergebnisse für korrekte Betriebszustände (Index 400 / Punktsimulation) beider Untersuchungsgebäude

| | KRA (400 / Punktsimulation) | | RPU (400 / Punktsimulation) | |
|---------------------------------------|-----------------------------|--------------|-----------------------------|--------------|
| | DWD TRY 2015 | DWD TRY 2045 | DWD TRY 2015 | DWD TRY 2045 |
| Q_{PE} [kWh/m ² a] | 128,1 | 117,7 | 129,8 | 130,4 |
| Q_{EE_heat} [kWh/m ² a] | 89,9 | 66,7 | 42,7 | 29,9 |
| Q_{EE_cool} [kWh/m ² a] | - | - | 6,5 | 10,0 |
| UETGS [Kh/a] | 2445 | 5314 | 58 | 108 |
| UNTGS [Kh/a] | 73 | 30 | 3 | 2 |

Im Hinblick auf die Simulationsergebnisse mit den fehlerhaften Betriebszuständen bzw. unerwartetem NutzerInnenverhalten haben sich für beide Gebäude die internen Wärmegewinne (Anzahl Personen / Arbeitsgeräte) als Input dem größten Potential für den steigenden Energiebedarf bzw. Performance Gap herausgestellt. An zweiter Stelle ist hierbei der „Heiz-Sollwert“ zu nennen und für das Gebäude mit High-Tech Ansatz stellt sich mit der Eingangsgröße „Regelung Sonnenschutz“ ebenfalls die gleiche Sensitivität dar. Der wesentliche Unterschied zwischen dem Gebäude mit Low-Tech (KRA) und High-Tech (RPU) Ansatz besteht in den verschiedenen Ursachen für den Komfort Performance Gap. Während sich in der KRA die Fensteröffnungszeit und internen Wärmegewinne als einflussreichste Stellschrauben darstellen, sind in diesem Zusammenhang für das RPU der Sollwert für die Kühlung und die Regelung des Sonnenschutzes zu nennen.

Die Simulationsergebnisse mit dem veränderten Klima zeigen eine ähnliche Charktersitk bzw. Ausprägung und haben keine Veränderungen dieser Reihenfolgen zur Folge. Die weiterführende und detaillierte Analyse der fehlerhaften Betriebszustände wird im nachfolgenden Kapitel 5 „Zusammenfassung und Ausblick“ vorgenommen.

4.5 Ergebnisse der Lebenszykluskostenberechnungen

Neben den dynamisch-thermischen Gebäude- und Anlagensimulationen zur Quantifizierung des Energiebedarfs während der Betriebsphase beider Gebäude werden auch die Kosten über den gesamten Lebenszyklus (LCC) der beiden Untersuchungsobjekte untersucht.

Bevor die Ergebnisse betrachtet werden, muss vorweg erwähnt werden, dass die zu untersuchenden Gebäude sich in ihrer Geometrie, Größe und in ihrer Baualtersklasse und der damit vorhandenen thermischen Gebäudehülle unterscheiden. Das Gebäude RPU besitzt gegenüber KRA einen halb so großen mittleren Wärmedurchgangskoeffizienten und infolgedessen um ein Vielfaches weniger Transmissionswärmeverluste über die thermische Gebäudehülle. Des Weiteren ist die zu beheizende Fläche in KRA ca. das 1,75-fache von RPU. In Abbildung 19 wird die benötigte Endenergie und die dazu berechneten Energiekosten, über den Betrachtungszeitraum von 50 Jahren, dargestellt.

Betrachtet man zuerst die Energiebedarfe, aus den vom BBSR vorgelegten, Energieausweisen wird deutlich, dass die benötigte Heizenergie in KRA höher ist als in RPU. Dies liegt an den höheren Transmissionswärmeverlusten aufgrund der schlechten thermischen Gebäudehülle und zusätzlichen Wärmeverlusten durch die natürliche Belüftung. Somit ergeben sich für RPU nur halb so hohe Energiekosten für Wärme als bei KRA. Der Strombedarf hingegen ist bei RPU ca. viermal höher als bei KRA. Grund dafür ist zum einen die zusätzliche TGA (elektrische Durchlauferhitzer für Warmwasser, RLT-Anlage, Kühlung) und zum anderen die größere benötigte Energie für die Beleuchtung. Da Strom und Wärme bei der Berechnung unterschiedlich bepreist werden (Verhältnis Strom : Fernwärme = 2,5 : 1) ergeben sich beträchtliche Unterschiede in den Energiekosten. Demnach sind die zu erwartenden Kosten für den Energiebedarf, aus den Energieausweisen, für den High-Tech Ansatz ca. 350 €/m² höher als beim Low-Tech, obwohl das Low-Tech Gebäude einen um einiges höheren Heizwärmebedarf hat.

Die simulierten Energiebedarfe liefern dahingegen weiterführende Ergebnisse. Bei beiden Gebäuden wird der benötigte Energiebedarf für Wärme um circa 40 % reduziert im Vergleich zum Energiebedarf aus den Energieausweisen. Der Strombedarf allerdings verdreifacht sich für KRA, bei RPU steigt er nur leicht. Dies hat zur Folge, dass die Energiekosten für das Low-Tech um ca. 250 €/m² höher sind als beim High-Tech Ansatz. Diese Differenz zu den vorhergehenden Ergebnissen wird durch die unterschiedlichen Berechnungsmethoden der Energiebedarfe hervorgerufen. Während die EnEV ein statisches Berechnungsmodell verwendet, wird in der Simulation eine dynamische Berechnung durchgeführt. Um Gewissheit über diese Problematik zu erlangen, müssten in weiterer Folge die tatsächlichen Verbräuche untersucht werden. Da nur die Energieverbräuche von KRA vorhanden sind, kann hier kein endgültiger Vergleich stattfinden. Aus Abbildung 19 lässt sich jedoch schlussfolgern, dass KRA mit den tatsächlichen Energieverbräuchen

die höchsten Energiekosten von allen Varianten aufweist. Es scheint, dass die benötigte Energie für die Beleuchtung weit über den berechneten Wert des Energieausweises hinausgeht.

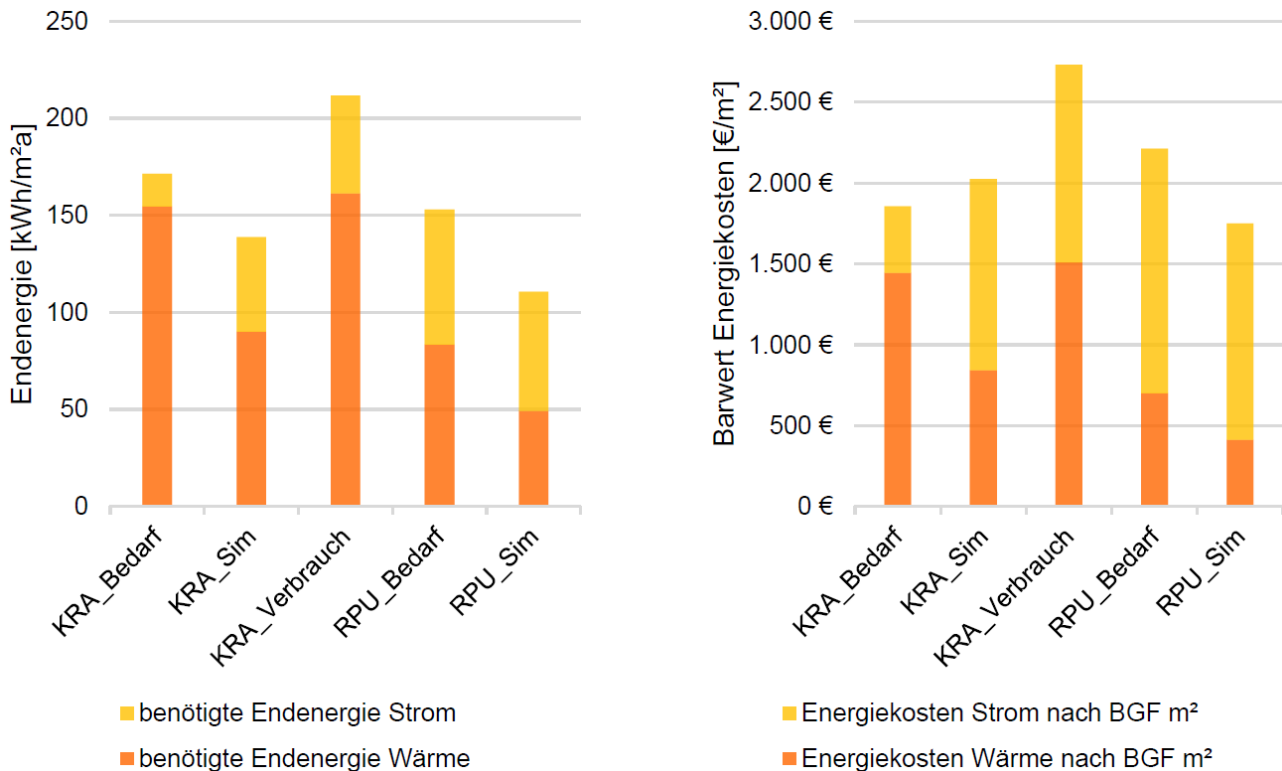


Abbildung 19: Endenergie und Energiekosten für beide Untersuchungsgebäude in Abhängigkeit unterschiedlicher Berechnungsgrundlagen

Die Energiekosten eines Gebäudes sind ein Hauptbestandteil der Lebenszykluskosten, jedoch dürfen Herstellungskosten, Ersatzinvestitionen, regelmäßige Instandsetzungs-, Inspektions- und Wartungskosten nicht vernachlässigt werden. Somit ergeben sich folgende kumulierte Betriebskosten der Gebäude KRA und RPU über einen Zeitraum von 50 Jahren.

Die Abbildung 20 zeigt, dass die zu erwartenden regelmäßigen Kosten und Ersatzinvestitionen bei dem High-Tech Gebäude um ein Vielfaches höher sind als beim Low-Tech Gebäude. Dies liegt an den zusätzlichen TGA Modulen, welche zusätzlich nach der überschrittenen Nutzungsdauer ersetzt werden müssen. Das gleiche gilt für die Fenster, weshalb in KRA ein größerer Betrag berechnet wird, da mehr Fenster als in RPU ersetzt werden müssen. Aufgrund der unterschiedlichen Flächen der Gebäude können die gesamten Kosten nicht miteinander verglichen werden. Aus diesem Grund wurden die Gesamtkosten auf die Bruttogrundfläche pro m² normiert, womit sich die folgenden Werte in der übernächsten Abbildung 21 ergeben.

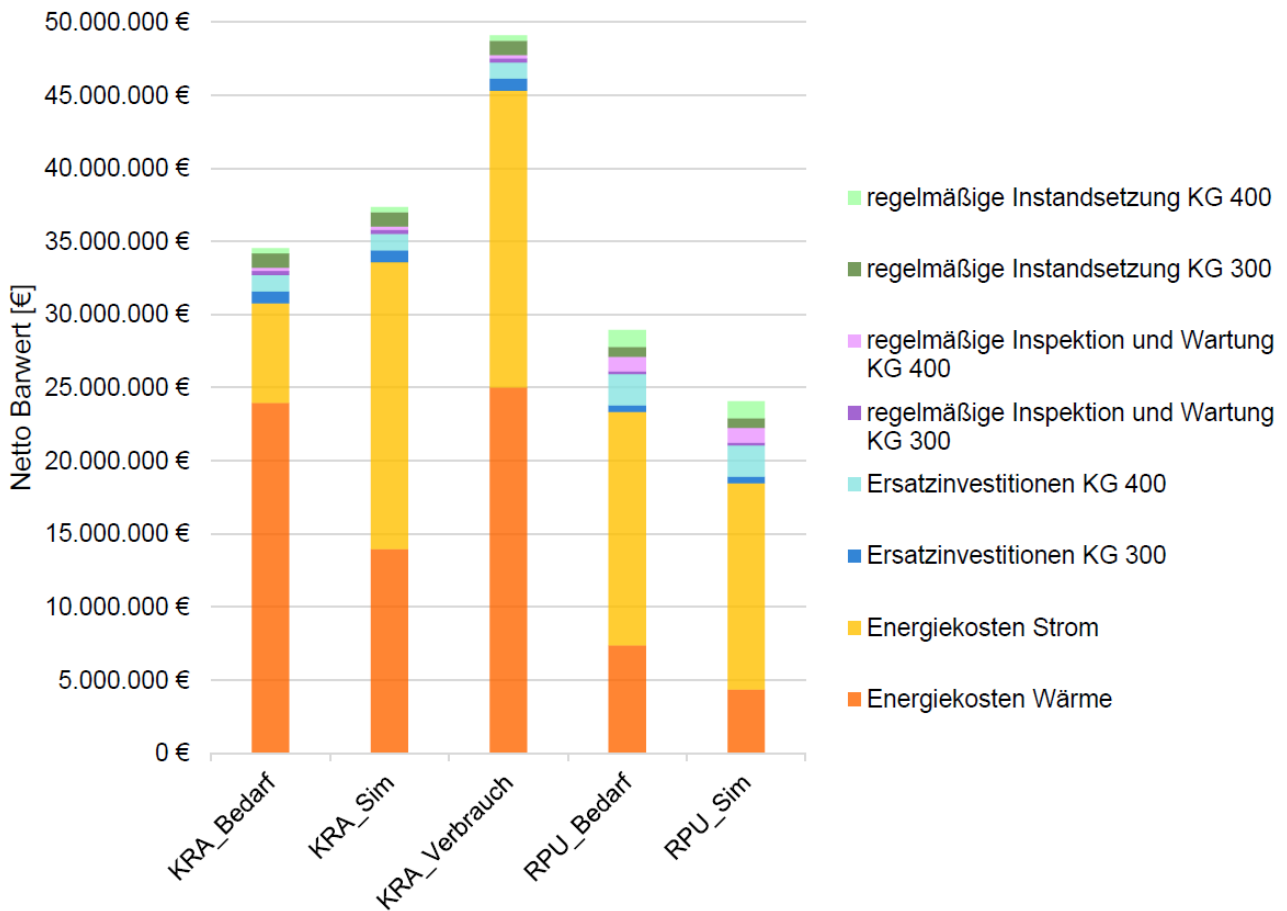


Abbildung 20: Gesamte Betriebskosten für beide Untersuchungsgebäude in Abhängigkeit unterschiedlicher Berechnungsgrundlagen

Zuerst werden wieder die Ergebnisse der Berechnungen mit den Energiebedarfen untersucht. Dabei ist das Low-Tech Gebäude gegenüber dem High-Tech um circa 650 €/m² günstiger. Bei den Ergebnissen aus dem simulierten Energiebedarf ist der Low-Tech Ansatz nur 30 €/m² günstiger. Trotz der höheren Energiekosten des Low-Tech Gebäudes (siehe Abbildung 19) sind die Gesamtkosten günstiger als die im High-Tech. Grund dafür sind die höheren kumulierten Kosten aus Ersatzinvestitionen, regelmäßige Instandsetzungs-, Inspektions- und Wartungskosten der komplexeren und umfangreicheren TGA des High-Tech Gebäudes. Die Betriebskosten von KRA mit dem tatsächlichen Energieverbrauch sind am höchsten. Da es keine Vergleichsvariante (RPU mit Verbrauchswerten) gibt, kann in diesem Zusammenhang keine final bevorzugte Variante bzw. Gebäudetechnikstandard aus den untersuchten Varianten abgeleitet werden.

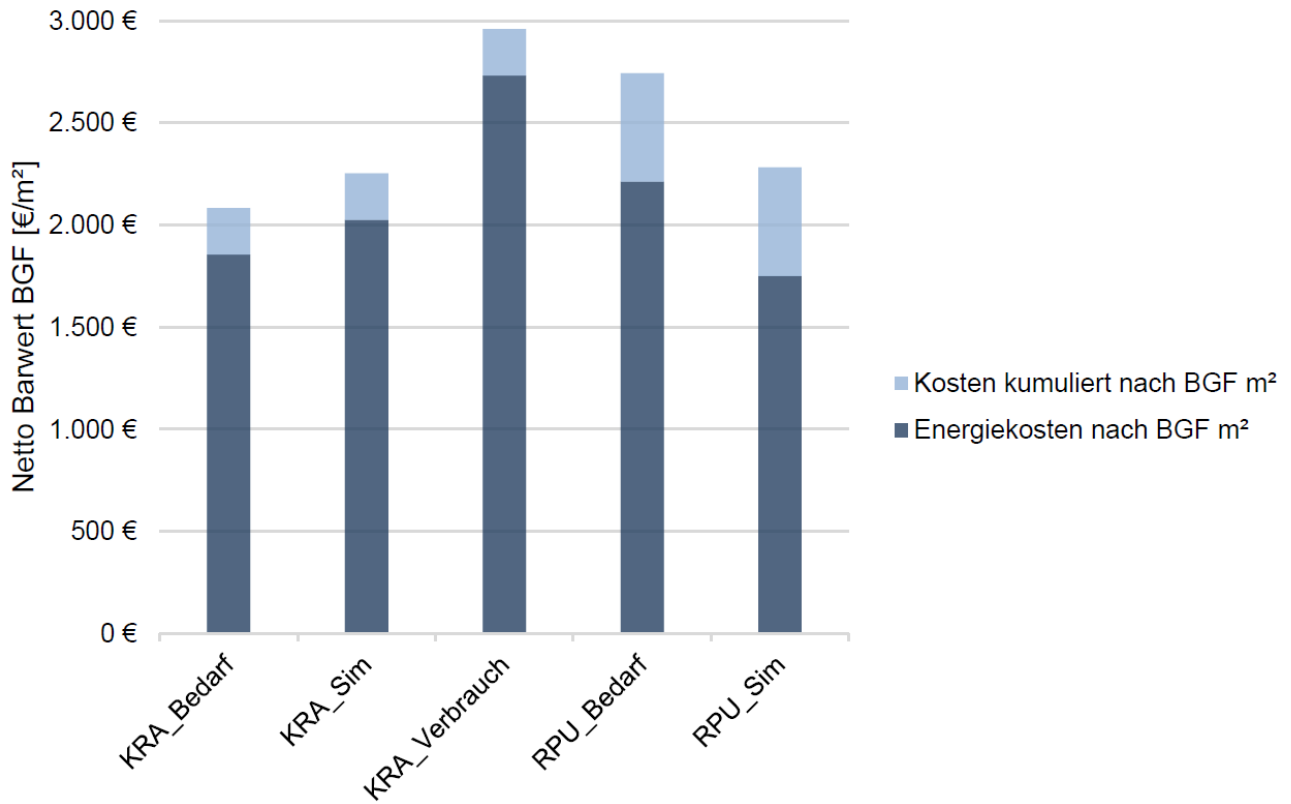


Abbildung 21: Betriebskosten pro m² BGF für beide Untersuchungsgebäude in Abhängigkeit unterschiedlicher Berechnungsgrundlagen

5 Zusammenfassung und Ausblick

In diesem abschließenden Kapitel wird das Forschungsprojekt „Robuste, nutzerfreundliche und kostengünstige TGA in Gebäuden“ und die damit gesammelten Erkenntnisse sowie Erfahrungen zusammengefasst. Darüber hinaus werden auch die wesentlichen Herausforderungen und Grenzen des Projekts, sowie deren Möglichkeiten und Potentiale für zukünftige, praxisnahe Anwendungen diskutiert. Schließlich werden im Ausblick weiterführende Fragestellungen und Entwicklungen im Kontext dieser Arbeit thematisiert.

Der anthropogene Klimawandel in Kombination mit zunehmender Ressourcenknappheit stellt uns Menschen und die Umwelt vor großen Herausforderungen. Der Gebäudesektor soll sich, der deutschen Bundesregierung zufolge, bis 2045 zu einem klimaneutralen Gebäudebestand transformieren. Um dieses Klimaziel zu erreichen, müssen wirksame Strategien und Maßnahmen entwickelt sowie umgesetzt werden. Dabei nimmt die Energieeffizienz von Bestandsgebäuden, aufgrund des großen Potentials an möglichen Energieeinsparungen, eine wesentliche Rolle ein. In diesem Zusammenhang muss der Fokus insbesondere auf die Reduktion von Performance Gaps und Optimierung der Gebäudeperformance gelegt werden. Zu diesem Zweck braucht es den Grundsatz, dass der korrekte und fehlerfreie Gebäudebetrieb durch robuste Anlagentechnik sichergestellt wird. Das bedeutet, dass Gebäude in der Betriebsphase robust (vgl. stabil, fehlertolerant, widerstandsfähig) gegenüber Betriebsfehlern, NutzerInnenfehlerverhalten und Klimawandel sein müssen. Um gegen die Ursachen für Performance Gaps vorzubeugen, müssen energetische Qualitätssicherungsmaßnahmen im Gebäude- und Anlagenbetrieb eingesetzt werden. Dadurch können fehlerhafte Betriebszustände aufgezeigt und Betriebsfehler identifiziert werden. Resultierend können energetische Mehrverbräuche und folglich erhöhte CO₂ Emissionen sowie negative Auswirkungen auf den NutzerInnenkomfort verhindert werden.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde eine Forschungsmethodik aufgebaut und angewendet, mit der Fehler technischer Komponenten, unerwartetes NutzerInnenverhalten sowie klimatische Veränderungen untersucht werden können. Die simulationstechnische Abbildung dieser Faktoren ermöglicht die Quantifizierung der Auswirkungen von Performance Gaps hinsichtlich Energieeffizienz und thermischer Behaglichkeit. In dem mehrstufig, aufeinander aufbauenden Prozess werden zuerst fehlerhafte Betriebszustände identifiziert und anschließend unterschiedliche Analyseszenarien für Performance Gaps mittels dynamisch-thermischer Gebäude- und Anlagensimulationen durchgeführt. Dadurch können Potentiale zur Verbesserung des Gebäudebetriebs im Hinblick auf Energieeffizienz und NutzerInnenkomfort abgeleitet und ein Beitrag für den zukünftig, angestrebten klimaneutralen Gebäudebestand geleistet werden.

Betriebsfehler werden in der Literatur als eine nicht zulässige Abweichung von zumindest einer charakteristischen Eigenschaft vom Normalzustand definiert. Die Ursachen für Betriebsfehler sind

vielfältig und die Auswirkungen können verschiedenste Formen annehmen. Neben Systemfehlern in der Automation und Hardwarefehlern sind hierbei auch Fehler durch menschliches Versagen zu nennen. Die fehlerhaften Betriebszustände führen meistens nicht zu einem vollständigen Ausfall des Gesamtsystems, sondern zu Abweichungen und Beeinträchtigungen im Gebäudebetrieb. Dementsprechend können Betriebsfehler negative Auswirkungen auf Energieverbrauch, Treibhausgasemissionen und NutzerInnenkomfort zur Folge haben.

Mit Hilfe von Fehlererkennungs- und Diagnoseverfahren können Betriebsfehler in der Gebäudetechnik identifiziert bzw. analysiert und folglich beseitigt werden. Auf Basis von [Auer, Lauss et al., 2020] konnte in diesem Projekt ein Beitrag zu diesem FDD-Prozess durch den Aufbau eines regelbasierten Modells zur Fehlererkennung in gebäudetechnischen Anlagen geleistet werden. Durch die Kombination von einzelnen Indikatoren und Verknüpfung von logischen Operatoren entsteht ein Gleichungssystem, das ein prozessorientiertes Modell und virtuelles Abbild der jeweiligen Anlagentechnik darstellt. Die darin definierten Betriebsregeln ermöglichen die Analyse der Zusammenhänge und Wechselwirkungen in gebäudetechnischen Anlagen auf Grundlage von Automationsdaten. Die allgemeingültige Anwendbarkeit wurde anhand der exemplarischen Untersuchung von sieben RLT-Anlagen in zwei unterschiedlichen Nicht-Wohngebäuden demonstriert. Im Zuge der praxisnahen Untersuchungen und Analysen konnte eine Vielzahl von typischen Betriebsfehlern, Problemen und Unregelmäßigkeiten sowie deren Muster festgestellt werden. Das Modell zeigt auf, welche Betriebsfehler zu welchen Zeitpunkten im Gebäude- und Anlagenbetrieb auftreten und macht somit den Handlungsbedarf für einen fehlerfreien Gebäudebetrieb sichtbar. Die identifizierten Betriebsfehler wurden in weiterer Folge in Form eines Fehlerkatalogs zusammengefasst und in die folgenden übergeordneten Fehlergruppen kategorisiert:

- Sollwerte
- Abhängigkeiten und Zusammenspiel
- Leistungen
- Betriebszeiten

Das Modell kann unterstützend für den Prozess zur Fehlererkennung eingesetzt werden und im Rahmen des Projekts wurde die Evaluierung des Modells anhand realer Betriebsdaten von diversen RLT-Anlagen in zwei konkreten Untersuchungsgebäuden durchgeführt. Dabei wurden insgesamt sieben unterschiedliche RLT-Anlagen untersucht und Energie Performance Gaps in Form von gestiegenen Endenergiebedarfen von 8,2 % bis 36,2 % über ein Betrachtungsjahr festgestellt. In diesem Zusammenhang gibt es Betriebsfehler die einen besonders großen Einfluss auf die Energieeffizienz aufweisen. Durch die Überschreitung der definierten Betriebszeit werden

durchschnittlich 8 % des jährlichen Energiebedarfs verursacht. Im Gegensatz dazu, wurden auch Betriebsfehler identifiziert, die eine Reduktion des Energieverbrauchs im Durchschnitt von bis zu 21 % durch die Unterschreitung der Zulufttemperatur hervorrufen. Hierbei ist jedoch eine mehrdimensionale Betrachtungsweise notwendig, um die Wechselwirkungen zwischen dem Energie Performance Gap und Komfort Performance Gap zu berücksichtigen. Obwohl durch Betriebsfehler Energie eingespart wird, kann dies im Umkehrschluss auch zu thermischer Unbehaglichkeit führen und sich resultierend in Produktivitätseinbußen niederschlagen. Die meisten Betriebsstörungen, wie z. B. eine klemmende Bypassklappe oder eine fehlerhafte Regelungsstrategie der Wärmerückgewinnung, werden anlagenintern ausgeglichen. Diese „kompensierbaren“ Fehler wirken sich zwar in einem erhöhten Energieverbrauch aus, haben aber keine direkten Auswirkungen auf den Komfort. Auf Basis der durchgeführten Feldstudien konnten Rückschlüsse für besonders relevante und sensitive Datenpunkte bzw. Indikatoren zur Überprüfung von Performance Gaps gezogen werden:

- Betriebszustand der Anlage (Ein / Aus)
- Zeitschaltprogramm
- Außenlufttemperatur
- Sollwert Zulufttemperatur
- Anlagenzustand Kühlen
- Abluft- bzw. Raumlufthtemperatur

Die durchgeführten Untersuchungen zeigten, dass ohne entsprechende Werkzeuge zur energetischen Qualitätssicherung im Gebäudebetrieb, fehlerhafte Betriebszustände oft unerkant bleiben und somit Performance Gaps verursachen. Das entwickelte Modell zur Fehlerkennung in gebäudetechnischen Anlagen soll dabei helfen Performance Gaps in Gebäuden zu identifizieren. Durch die Auswertungen und Analysen von RLT-Anlagen konnten Empfehlungen zur Überprüfung von sensiblen Datenpunkten bzw. welche priorisiert überwacht werden sollten, abgeleitet werden. Dementsprechend sollten die Informationen und Erkenntnisse auch von Gebäude- und Anlagenbetreibern verwendet werden, um Betriebsfehler sowie energetische Optimierungspotentiale zu erkennen. Um die Klimaschutzziele der Bundesregierung zu erreichen, die Treibhausgasemissionen im Gebäudesektor drastisch zu senken, müssen Methoden zur Fehlererkennung im Gebäudebetrieb angewendet werden. Büro- und Verwaltungsgebäude sind in Deutschland für ca. 7 % des gesamten Gebäudeenergieverbrauchs verantwortlich und bieten daher ein großes Energieeinsparpotential [Dena, 2018]. In dieser Arbeit wurde der Entwicklungsprozess eines modellbasierten Ansatzes zur Fehlerkennung aufgezeigt und durch die Anwendung der

Methodik bzw. Analyse von unterschiedliche Automationsdaten konnte die Funktion des Modells zur Identifikation fehlerbehafteter RLT-Anlagen nachgewiesen werden.

Die durch die exemplarische Anwendung des Modells identifizierten Betriebsfehler in der Gebäudetechnik bilden in weiterer Folge die Grundlage für den darauf aufbauenden Simulationsblock. Aus der Problemstellung geht hervor, dass die Bestimmung eines punktgenauen und exakten Energiebedarfs von Gebäuden de facto nicht möglich ist. Dies liegt zum einen in der Tatsache, dass bei Energiebedarfsrechnungen die thermische Charakteristik der Bauwerke und Anlagensysteme mittels Parametern beschrieben wird, die oft nicht präzise bestimmbar sind und somit als unsichere Randbedingungen gelten. Hinzu kommen Pauschalisierungen und Vereinfachungen komplexer und aufwendiger Zusammenhänge, um die Modelle übersichtlich und einfach zu halten. Des Weiteren basieren die bisherigen Ansätze für die Planung von Gebäuden bzw. Gebäudetechnik meist auf statischen Berechnungsmethoden und Auslegungsszenarien, welche z. B. extreme Ereignisse, die aber nur mit geringer Wahrscheinlichkeit eintreten, berücksichtigen. Dies ist heutzutage für die Planung von energieeffizienten und klimaneutralen Gebäuden nicht mehr ausreichend. Darüber hinaus können TGA-Systeme mehrere korrekte Betriebszustände einnehmen und eine Vielzahl der Parameter bewegt sich in einem Wertebereich bzw. sind nicht statisch zu betrachten. Zur Abbildung dieser Dynamik wird in diesem Forschungsprojekt ein Prozess aufgebaut, der die statistische Variation unterschiedlicher Input-Parameter ermöglicht. Um diese Dynamik und unsichere Randbedingungen in dynamisch-thermischen Gebäude- und Anlagensimulation abbilden zu können, wird die Monte-Carlo-Methode eingesetzt. Dadurch ist es möglich, unsichere Randbedingungen wie z. B. das NutzerInnenverhalten, Parameter in der TGA oder unterschiedliche Betriebsfehler gebäudetechnischer Anlagen auf deren Einfluss und Wechselwirkungen in den Zielgrößen zu bewerten und zu vergleichen. Durch die Simulation der anvisierten Lastgänge werden synthetische Daten sowohl zum korrekten bzw. angestrebten als auch zum fehlerhaften Betrieb durch die Implementierung definierter Betriebsfehler bzw. unerwartetem NutzerInnenverhalten erzeugt. Dadurch kann die Quantifizierung der Auswirkungen von Betriebsfehlern und die Identifikation von robusten Systemen in der TGA vorgenommen werden. Neben einer energetischen Betrachtung erfolgte auch eine Behaglichkeitsanalyse mittels der Unterstützung durch Simulationsmodelle.

Im Bereich der thermisch-dynamischen Gebäudesimulationen werden in einem ersten Schritt neben den identifizierten Betriebsfehlern auch der Einfluss des NutzerInnenverhaltens sowie unsichere Randbedingungen in der technischen Gebäudeausrüstung und bauliche Faktoren anhand eines generischen Gebäudesimulationsmodells abgebildet. In Kombination mit Unsicherheits- und Sensitivitätsanalysen werden durch Monte-Carlo-Simulationen die Veränderungen und Auswirkungen auf den Energieverbrauch und thermischen Komfort quantifiziert. Darüber hinaus

können durch den gewählten Forschungsansatz an dieser Stelle die einflussreichsten Input-Parameter und relevante Stellschrauben in Bezug auf Energie Performance Gaps und Komfort Performance Gaps abgeleitet werden. Dadurch konnten die sensitivsten Betriebs-, Bedien- bzw. NutzerInnenfehler in Bürogebäuden und die Modellunsicherheit für die drei Zielgrößen Primärenergiebedarf sowie Über- und Untertemperaturgradstunden ermittelt werden.

Die spezifischen Unsicherheits- und Sensitivitätsanalysen haben gezeigt, dass Betriebs-, Bedien- und NutzerInnenfehler zu einem hohen energetischen Mehrverbrauch führen und sich alle drei Zielgrößen stark erhöhen. Bei ungünstigen Parameterkombinationen beziffert sich der Anstieg des Primärenergiebedarfs um den Faktor 2,5 gegenüber dem Median. Um die dafür ausschlaggebenden Input-Parameter identifizieren zu können, wurde die rechenintensiven Methode der Sobol'-& Jansen Schätzer eingesetzt. Dadurch konnte festgestellt werden, dass der energetische Mehrverbrauch vorrangig auf NutzerInnenfehler zurückzuführen ist und hierbei der Heiz-Sollwert (minimale Raumlufthtemperatur-Sollwert) einen größeren Einfluss als der maximale Raumlufthtemperatur-Sollwert hat. Dementsprechend kann festgehalten werden, dass in diesem Zusammenhang die Betriebsfehler in der Gebäudetechnik gegenüber dem NutzerInnenfehlerverhalten eine untergeordnete Rolle spielen. Das gleiche Szenario stellte sich für den thermischen Komfort in Form der Über- und Untertemperaturgradstunden dar. Hierbei ergeben sich durch die Betriebs- und NutzerInnenfehler unbehagliche Raumlufthzustände und führen je nach Fehlerfall zu einer starken Überhitzungsproblematik bzw. zu kühlen operativen Raumtemperaturen. Die Untertemperaturgradstunden werden von einer Eingangsgröße Heiz-Sollwert (minimale Raumlufthtemperatur-Sollwert) dominiert und die Regelung des Sonnenschutzes sowie die Fensteröffnungszeit sind nur in geringem Maße für die Zunahme der UNTGS verantwortlich. Analog dazu spiegelt sich der Anstieg der Übertemperaturgradstunden in erster Linie im Input-Parameter maximaler Raumlufthtemperatur-Sollwert wieder, wenngleich dies auch noch teilweise auf die Sonnenschutzbedienung sowie die Personenanzahl zurückzuführen ist. Anhand der Simulationsergebnisse des generischen Gebäudemodells ist also festzuhalten, dass sich grundsätzlich die NutzerInnenverhalten stärker auf alle drei Zielgrößen auswirken, als die abgebildeten Betriebsfehler in der Gebäudetechnik.

In der spezifischen UA und SA wurde neben der absoluten Modellunsicherheit und Sensitivität von Betriebsfehlern und NutzerInnenverhalten auch mit dem relativen Einfluss von bauphysikalischen Inputs und baulichen sowie MSRT Faktoren gebäudetechnischer Anlagen (Parametergruppen B & C) verglichen. Damit wurde die Verknüpfung zu vorangegangenen Studien und Untersuchungen in diesem Forschungsgebiet geschaffen, die sich u. a. mit der Fehlererkennung und Betriebsoptimierung, nicht aber nicht mit der simulationstechnischen Abbildung von Betriebs-, Bedien- und NutzerInnenfehlern beschäftigten.

In dem Forschungsbericht „Evaluierung von Energiekonzepten für Bürogebäude“ [Fisch, Plesser et al., 2007] konnte keine relevante Abhängigkeit zwischen den baulichen Faktoren und der Anzahl an Übertemperaturgradstunden festgestellt werden. Im Gegensatz dazu wurde in dieser Arbeit belegt, dass ein fehlerhafter Sonnenschutz signifikante Abhängigkeiten für alle drei untersuchten Zielgrößen aufweist. Das Forschungsprojekt „Big Data in der Gebäudeautomation“ [Auer, Lauss et al., 2020] ermittelte die Betriebszeit von RLT-Anlagen als sehr großes Energieeinsparpotenzial. Dies konnte im Rahmen dieser Forschungsarbeit bestätigt werden und wurde insbesondere durch die Ergebnisse der spezifischen UA und SA unterstrichen. Der Betriebsfehler „error 2.5 – Betriebsende RLT-Anlage“ erzielte nach dem minimalen und maximalen Raumlufttemperatur-Sollwert und dem NutzerInnenfehler „error 8.2 – Regelung Sonnenschutz“ die vierthöchste Signifikanz für die Zielgröße Primärenergiebedarf. Diese Rangfolge stimmt zudem mit der Einstufung der Autoren des Projekts „OASE II – Betriebsprognose und Betriebsdiagnose im Praxistest“ [Ruth, Jensch et al., 2008] überein, die den Einsatz der Sonnenschutzvorrichtungen und die eingestellten Raumsolltemperaturen, als Hauptgründe für den Performance Gap ausmachten.

In den Untersuchungen des Projekts „Evaluierung von Energiekonzepten für Bürogebäude“ [Fisch, Plesser et al., 2007], weisen die 19 untersuchten Bürogebäude eine große Streuung der Primärenergieverbrauchswerte zwischen 135 kWh/m²a und 454 kWh/m²a auf. Der minimale und maximale Verbrauch unterscheidet sich demnach um den Faktor 3,4. Ein Vergleich der absoluten Messwerte mit den Simulationsergebnissen dieser Arbeit ist kaum möglich. Es ist aber hervorzuheben, dass das minimale und maximale Ergebnis der Zielgröße PEB in der spezifischen UA und SA, durch den Faktor 3,9 getrennt ist. Die Streuungen der realen Verbrauchswerte und Simulationsergebnisse befinden sich damit in einer vergleichbaren Größenordnung, was die Plausibilität der Simulationsergebnisse unterstreicht.

Aufbauend auf den Untersuchungen mit generischem Gebäudemodell wurde im nächsten Schritt die simulationstechnische Analyse von Performance Gaps zweier realer Untersuchungsgebäude im Kontext von High-Tech und Low-Tech Ansätzen durchgeführt. Durch diesen mehrstufigen Simulationsprozess können nun detailgenau die Parameter mit dem größten Einfluss auf den Gebäudebetrieb weiterführend untersucht werden. Die unsicheren Randbedingungen für das NutzerInnenverhalten werden in diesem Abschnitt auf Basis der Auswertungen des Partner-Forschungsprojektes „Nutzerkomfort durch low-tech Konzepte in Gebäuden“ [Lipp, Muñoz-Czerny et al., 2022] in das Simulationsmodell implementiert. Darüber hinaus fließen in die simulationstechnischen Untersuchungen neben den Betriebsfehlern der Gebäudetechnik und dem unerwartetem Nutzerverhalten auch die Aspekte zukünftiger, klimatischer Veränderungen durch Prognose-Wetterdatensätze mit ein.

In diesen Untersuchungen hat sich gezeigt, dass unabhängig vom Gebäudetyp die Variation des Primärenergiebedarfs am stärksten von NutzerInnenverhalten in Bezug auf die Personenanzahl und deren zugehörigen Arbeitshilfen (User-/Usage Gap) abhängig ist. Diese unsicheren Randbedingungen können zu einem erhöhten Primärenergiebedarf von ca. 50 % im Vergleich zur Punktsimulation führen. Als Abhilfe und Vorkehrungsmaßnahme sei in diesem Zusammenhang einerseits die Verwendung von energieeffizienten Arbeitsgeräten und resultierende Reduktion des NutzerInnenstrom zu nennen. Andererseits sollten die Anforderungen und Nutzungsszenarien für den Gebäudebetrieb bereits in der Planungsphase genau definiert und festgelegt bzw. spätere mögliche Umstrukturierungsmaßnahmen und Adaptierungen berücksichtigt werden. Darüber hinaus wird der Einsatz von erneuerbaren Energiequellen direkt am Standort z. B. durch Nutzung von PV-Anlagen empfohlen, um den ev. anfallenden Strom-Mehrverbrauch regenerativ abdecken zu können.

Als nächstes folgt bei der Betrachtung des steigenden Primärenergiebedarfs die Variation des Heiz-Sollwertes und der Fensteröffnung, wobei durch den Primärenergiefaktor von 0,45 hierbei die Auswirkungen erst bei der Analyse des Endenergiebedarfs deutlich ersichtlich werden. Dadurch hat sich gezeigt, dass sich der Endenergiebedarf für die Heizung beim Low-Tech Gebäude um ca. 15 % gegenüber der Punktsimulation und durchschnittlich pro Kelvin Temperaturerhöhung um 5 % (DWD TRY 2015) bzw. 7 % (DWD TRY 2045) erhöht. Im Gegensatz dazu, bewirken die Veränderungen des Sollwerts für das Heizen beim High-Tech Gebäude deutlich größere Auswirkungen und führen zu einem verstärktem Energie Performance Gap. Hierbei wurde ein durchschnittlicher endenergetischer Mehrverbrauch von 13 % (DWD TRY 2015) bzw. 14 % (DWD TRY 2045) pro Kelvin Temperaturzunahme berechnet; gegenüber der Punktsimulation entsteht somit im Extremfall ein bis zu 40 % höherer Heiz-Endenergiebedarf. Durch die Variation des Sollwerts für die Kühlung konnte beim High-Tech Gebäude ein erhöhter endenergetischer Kühlbedarf von durchschnittlich 14 % (DWD TRY 2015) bzw. 12 % (DWD TRY 2045) je Kelvin Temperaturabnahme quantifiziert werden. Durch die Berechnung dieser spezifischen Kennzahlen könnte abgeleitet werden, dass sich im Rahmen dieses Projektes Low-Tech Gebäude im Hinblick auf Temperaturanpassungen für Heizzwecke durch NutzerInnen robuster als High-Tech Gebäude darstellen. Jedoch muss in diesem Zusammenhang auf die unterschiedlichen Referenzwerte der Energiebedarfe hingewiesen werden: der geringere Heizungs-Endenergiebedarf vom RPU, aufgrund des verbesserten Energiestandards, führt zu einem vergrößerten relativen Einfluss von stochastischen Schwankungen bzw. Unsicherheiten. Nichtsdestotrotz ist diese Erkenntnis in erster Linie auf die Wechselwirkung zwischen den statischen Heizflächen (Heizkörper / Radiatoren) und der RLT-Anlage zurückzuführen. Infolge der ablufttemperaturabhängigen Zulufttemperaturregelung steigt bei erhöhten Heiz-Sollwerten auch der Wärmebedarf für die RLT-Anlage durch die Konditionierung des

Zuluftvolumenstroms. Die Öffnung der Fenster kann mit einem erhöhten Endenergiebedarf für Wärme von bis zu 10 % für das Low-Tech und bis zu 25 % für das High-Tech Gebäude beziffert werden. Dadurch wird mit dem nächsten Indikator unterstrichen das, das Low-Tech Gebäude im Hinblick auf die Robustheit im Zusammenhang mit dem Energie Performance Gap besser funktioniert als jenes mit dem High-Tech Ansatz. Um Performance Gaps infolge von Bedien- und NutzerInnenfehlern vermeiden zu können, sollte in diesem Zusammenhang generell eine regelmäßige Schulung und NutzerInnensensibilisierung angestrebt werden, um über die Auswirkungen und Folgen von möglichen Interaktionen zwischen Gebäudetechnik und NutzerInnen aufzuklären. Es sollte jedoch keinesfalls auf Maßnahmen zurückgegriffen werden, die eine Interaktionen zwischen NutzerInnen und TGA vollständig unterbinden und den NutzerInnen jegliche Möglichkeiten nehmen in die Gebäudetechnik auf Raumebene einzugreifen. Wie bereits in diverser Literatur und im Partnerprojekt „Nutzerkomfort durch low-tech Konzepte in Gebäuden“ [Lipp, Muñoz-Czerny et al., 2022] beschrieben, würde diese Einschränkung zu einer geringeren NutzerInnenzufriedenheit und Akzeptanz gegenüber dem Gebäude führen.

Im Bereich des thermischen Komforts ist unabhängig vom Gebäudetyp der Fokus auf die Übertemperaturgradstunden zu richten. Die Untertemperaturgradstunden spielen eine untergeordnete Rolle und führen lediglich bei der Verringerung des Heiz-Sollwerts zu erhöhten Werten. Wird jedoch diese Verringerung des Heiz-Sollwerts bewusst von NutzerInnen durchgeführt, ist diese Diskrepanz nicht als Komfort Performance Gap zu werten, da NutzerInnen diese Temperatureinstellung beabsichtigt wählen. Ein Komfort Performance Gap durch Untertemperaturgradstunden würde dann auftreten, wenn die Raum-Solltemperatur infolge eines Betriebsfehlers z. B. durch ein klemmendes Heizkörperventil, zu klein dimensionierte Wärmeabgabesysteme oder zu geringe Vorlauftemperaturen auftreten würden. In diesem Fall sei auf das entwickelte Modell zur Fehlererkennung und deren relevante und sensitive Datenpunkte bzw. Indikatoren zur Überprüfung von Performance Gaps verwiesen.

Im Hinblick auf die Übertemperaturgradstunden ergibt sich folgendes Bild: beim Gebäude mit High-Tech Ansatz wird der Komfort Performance Gap am stärksten von der Fensteröffnungszeit, gefolgt von den internen Wärmegewinnen (Personenanzahl / Arbeitsgeräte) und der Regelung des Sonnenschutzes verursacht. Dementsprechend wurde auf Basis der durchgeführten Simulationen für das Low-Tech Gebäude ein erhöhtes Überhitzungspotential identifiziert. Diese Problematik konnte durch die NutzerInnenbefragungen im Partnerprojekt bestätigt werden und eine Vielzahl der befragten Personen hat auf die unbehaglichen (zu warmen) Raumlufttemperaturen hingewiesen [Lipp, Muñoz-Czerny et al., 2022]. Durch die Simulationen mit den Prognose-Wetterdatensätzen konnte gezeigt werden, dass sich diese Problematik aufgrund des Klimawandels weiterhin verschärfen und folglich zu erhöhten Übertemperaturgradstunden führen wird. An dieser Stelle sei

jedoch darauf verwiesen, dass normativ zugrundeliegende Temperaturbänder bzw. Grenztemperaturen auch kritisch hinterfragt bzw. im Hinblick auf die Gebäudetypen (Low-Tech / High-Tech) weiterführend untersucht werden sollten; im Fall einer Erweiterung bzw. Adaptierung der Wertebereiche für Low-Tech Gebäude, würden diese in weiterer Folge (noch) besser abschneiden bzw. geringere Über- und Untertemperaturgradstunden aufweisen. Wie bereits bei den Untertemperaturgradstunden beschrieben, ergeben sich durch einen erhöhten Heiz-Sollwert Übertemperaturgradstunden, jedoch wird dieser Vorgang durch NutzerInnen bewusst gesteuert und somit, unter der Voraussetzung das keine Betriebsfehler vorliegen, nicht als Komfort Performance Gap betrachtet. Diese Thematik spielt auch beim Gebäude mit High-Tech Ansatz in Form des maximalen Raumlufttemperatur-Sollwerts eine Rolle. Mit erhöhtem Sollwert für die Kühlung würden die Übertemperaturgradstunden ansteigen, da jedoch von NutzerInnen gewünscht wird dies nicht als Einschränkung bzw. Beeinträchtigung des Gebäudebetriebs gewertet. Daher nimmt die Regelung des Sonnenschutzes die Schlussrolle für den thermischen Komfort beim High-Tech Gebäude ein. Ein dauerhaft geöffneter bzw. manuell verriegelter Sonnenschutz, unabhängig ob durch NutzerInnen oder einen Betriebsfehler verursacht, wirkt sich drastisch auf den Kühl-Endenergiebedarf und die Übertemperaturgradstunden aus. Als Abhilfe und Maßnahme sollte in diesem Zusammenhang für zukünftige Bauprojekte besonderes Augenmerk auf die Planung, Einbau und den Betrieb bzw. Überwachung des Sonnenschutzes geachtet werden. An dieser Stelle wird auf Projekte wie z. B. das Low-Tech Bürogebäude von Baumschlager-Eberle 22/26 in Lustenau verwiesen. Passive Konzepte sollten verstärkt in den Fokus der Betrachtungen bzw. Überlegungen gerückt werden und hierbei wird auf ein aktives Sonnenschutzsystem vollständig verzichtet. Die solaren Einträge werden beim 22/26 Gebäude durch erhöhte Laibungstiefen kompensiert und dadurch kann die Gefahr eines nicht funktionierenden bzw. fehlerhaften Sonnenschutzes vollständig umgangen werden, ohne dabei eine Überhitzungsproblematik des Gebäudes (in Kombination mit weiteren passiven Maßnahmen wie z. B. Nachtlüftung, Speichermassen, etc.) zu verursachen. Darüber hinaus werden sowohl Investitions- und Betriebskosten eingespart.

Abschließend wurden für die beiden Untersuchungsgebäude die Lebenszykluskosten berechnet, um dadurch auch eine wirtschaftliche bzw. gesamtheitliche Betrachtungsweise zu ermöglichen und Ergebnisse in einem umfangreichen Forschungskontext zu liefern. Hierbei lässt sich zusammenfassend festhalten, dass bei einer Betrachtung der Lebenszykluskosten eines Gebäudes bestimmte Bedingungen eingehalten werden müssen, damit eine klare Vergleichbarkeit gewährleistet werden kann. Die Unterschiede in Geometrie, thermischer Gebäudehülle und benötigter Energie (gemessen, berechnet bzw. simuliert) können dazu führen, dass die Ergebnisse zu einer erschwerten Vergleichbarkeit führen. Ungeachtet dessen, lassen sich aus den Untersuchungsergebnissen folgende Schlussfolgerungen ableiten:

- Durch die jährliche Preissteigerung der Energiekosten von 5 % besitzt die Energieeffizienz von Gebäuden das größte Einsparpotential bei den Lebenszykluskosten. Die Ergebnisse zeigen, dass eine optimierte thermische Gebäudehülle einen Großteil der Energiekosten reduzieren kann. Einen signifikanten Beitrag zu den Energiekosten leistet der Stromverbrauch bei der Beleuchtung der Gebäude. Somit lassen sich hohe Kosten durch die Nutzung von energieeffizienten Leuchtmitteln reduzieren
- Die kumulierten Kosten aus Ersatzinvestitionen, regelmäßige Instandsetzungs-, Inspektions- und Wartungskosten der KG 400 können dazu führen, dass High-Tech Gebäude höhere Betriebskosten als Low-Tech Gebäude haben, obwohl diese höheren Energiekosten aufweisen
- Abhängig von der genutzten Methode, zur Erfassung der Energieverbräuche bzw. -bedarfe, können die Ergebnisse der Energiekosten gegensätzlich voneinander abweichen

Schlussendlich zeigen die Lebenszyklusberechnungen, dass bei richtiger Ausführung Low-Tech Gebäude im Betrieb, kostengünstiger als High-Tech Gebäude sein können. Demzufolge besitzen Low-Tech Gebäude das Potenzial den Gebäudesektor, durch eine ressourcenschonende und energiesparende Bauweise, ganzheitlich zu verändern. Pilotprojekte wie 22/26 von Baumschlager Eberle Architekten zeigen, dass innovative Gebäudekonzepte mit wenig Gebäudetechnik funktionieren können.

Quellenverzeichnis

[Auer, Lauss et al., 2020] Auer, T.; Lauss, L.; Heissler, M.; Maderspacher, J.; Reiß D., Mehnert, J.; Rumpel, B.; Stüber, S.; Hannen, M.; Plessner, S.; Pinkernell, C.; Kröker, A.; Gentemann, R. *Big Data in der Gebäudeautomation*. Forschungsbericht, Lehrstuhl für Gebäudetechnologie und klimagerechtes Bauen, Technische Universität München, 2020. <https://mediatum.ub.tum.de/1546757>
doi:10.14459/2020md1546757

[BMWi, 2019] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie BmWi. *Energieeffizienz in Zahlen. Entwicklung und Trends in Deutschland 2019*. Bundesministerium für Wirtschaft und Energie. Online, 2019. Verfügbar unter: <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/energieeffizienz-in-zahlen-2019.pdf>

[Dena, 2022] Deutsche Energie-Agentur GmbH. *Keine Energiewende ohne Wärmewende*. Online, 2022. <https://www.dena.de/themen-projekte/energieeffizienz/gebäude/>

[Dena, 2018] Deutsche Energie-Agentur GmbH. *Statistiken und Analysen zur Energieeffizienz im Gebäudebestand*. Online, 2021. https://www.dena.de/fileadmin/user_upload/8162_dena-Gebaeudereport.pdf

[Dexter, Pakanen, 2001] Dexter, A.; Pakanen, J. *Building Energy Management System - Demonstration Automated Fault Detection and Diagnosis Methods in Real Buildings*. Annex 34, International Energy Agency (IEA), Espoo, Finland, 2001.

[DIN 4108-2, 2013] Deutsches Institut für Normung DIN. *Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden - Teil 2: Mindestanforderungen an den Wärmeschutz*. Norm, 2013.

[DIN EN 12831, 2017] Deutsches Institut für Normung DIN. *Energetische Bewertung von Gebäuden - Verfahren zur Berechnung der Norm-Heizlast - Teil 1: Raumheizlast*. Norm, 2017.

[DIN EN 15232-1, 2017] Deutsches Institut für Normung DIN. *Energieeffizienz von Gebäuden - Teil 1: Einfluss von Gebäudeautomation und Gebäudemanagement*. Norm, 2017.

[DIN 16798-1, 2021] Deutsches Institut für Normung DIN. *Energetische Bewertung von Gebäuden – Lüftung von Gebäuden – Teil 1: Eingangsparmeter für das Innenraumklima zur Auslegung und Bewertung der Energieeffizienz von Gebäuden bezüglich Raumluftqualität, Temperatur, Licht und Akustik*. Norm, 2021.

[DIN V 18599-1, 2018] Deutsches Institut für Normung DIN. *Energetische Bewertung von Gebäuden - Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung - Teil 1: Allgemeine Bilanzierungsverfahren, Begriffe, Zonierung und Bewertung der Energieträger*. Norm, 2018.

[DIN V 18599-7, 2018] Deutsches Institut für Normung DIN. *Energetische Bewertung von Gebäuden - Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung - Teil 7: Endenergiebedarf von Raumlufttechnik- und Klimakältesystemen für den Nichtwohnungsbau*. Norm, 2018.

[DIN V 18599-10, 2018] Deutsches Institut für Normung DIN. *Energetische Bewertung von Gebäuden - Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung - Teil 10: Nutzungsrandbedingungen, Klimadaten*. Norm, 2018.

[DIN V 18599-11, 2018] Deutsches Institut für Normung DIN. *Energetische Bewertung von Gebäuden - Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung - Teil 11: Gebäudeautomation*. Norm, 2018.

[DIN 18960, 2020] Deutsches Institut für Normung DIN. *Nutzungskosten im Hochbau*. Norm, 2020.

[Fisch, Plesser et al., 2007] Fisch, N.; Plesser, S.; Bremer, C. *EVA. Evaluierung von Energiekonzepten für Bürogebäude*. Forschungsbericht, Institut für Gebäude und Solartechnik, Technische Universität Braunschweig, 2007.

[Hopfe, Hensen, 2011] Hopfe, C.; Hensen, J. *Uncertainty analysis in building performance simulation for design support*. *Energy and Buildings*, 43. Auflage, 2798-2805. 2011. https://www.researchgate.net/publication/258291390_Uncertainty_analysis_in_building_performance_simulation_for_design_support

[IDA, 2022] EQUA Solutions AG. *IDA Indoor Climate and Energy (ICE)*. Computer Software, Version 4.8 SP 2, EQUA Simulation AB, Zug, Schweiz, 2022. Verfügbar unter: <https://www.equa.se/de>

[Ioannou, 2015] Ioannou, A. *Energy performance and comfort in residential buildings: Sensitivity for building parameters and occupancy*. *Energy and Buildings*, 92, 216–233, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.01.055>

[Kahlenborn, Porst et al., 2021] Kahlenborn, W.; Porst, L.; Voß, M. *Klimawirkungs- und Risikoanalyse 2021 für Deutschland*. Forschungsbericht, Online, Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau, 2021. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/5750/publikationen/2021-06-10_cc_26-2021_kwra2021_kurzfassung.pdf, zuletzt geprüft am 09.05.2022.

[Kube, Schimmel et al., 2017] Kube, M.; Schimmel, M.; Rhiemeier, J.-M.; Barckhausen, A.; Fehr, J.; Büttner, S.; Unger, M.; Piégsa, A.; Bottner, F. *Marktverfügbaren Innovationen mit hoher Relevanz für die Energieeffizienz in der Industrie*. Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, Projekt-Nr.: 102/16-05, Berlin, 2017.

[Lauss, Auer, 2020] Lauss, L.; Auer, T. *Simulation based analysis and evaluation of operational faults in building technology*. In Monsberger, M., Hopfe, C.J., Krüger, M. & Passer, A. (Eds.). *BauSIM 2020*, 8th Conference of IBPSA Germany and Austria, 23-25- September 2020, Graz University of Technology, Austria, Proceedings. Graz: Technische Universität Graz, 2020.

[Lipp, Muñoz-Czerny et al., 2022] Lipp, B.; Muñoz-Czerny, U.; Zelger, T.; Bell, D.; Gruber, E.; Huber, M. *Nutzerkomfort durch low-tech Konzepte in Gebäuden*. Forschungsprojekt, Österreichisches Institut für Bauen und Ökologie IBO, Wien, 2022.

[Maderspacher, 2019] Maderspacher, J. *Robuste Optimierung in der Gebäudesimulation. Entwicklung einer Methode zur robusten Optimierung für die energetische Sanierung von Gebäuden unter unsicheren Randbedingungen*. Dissertation, Lehrstuhl für energieeffizientes und nachhaltiges Planen und Bauen, Technische Universität München, 2016.

[Mojic, Luzzatto et al., 2018] Mojic, I., Luzzatto, M., Haller, M., Lehmann, M., Benz, M. & van Velsen, S. *ImmoGap: Einfluss der Kombination aus Nutzerverhalten und Gebäudetechnik auf den Performance Gap bei Mehrfamilienhäusern*. Rapperswil, 2018. Verfügbar unter https://www.minergie.ch/media/501469_haller_sb_immogap.pdf

[Réhault, Lichtenberg et al., 2014] Réhault, N.; Lichtenberg, G.; Schmidt, F., et al. *ModQS – Modellbasierte Qualitätssicherung des energetischen Gebäudebetriebs*. Forschungsbericht. Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE, Freiburg, 2014.

[Ritter, Mair et al., 2014] Ritter, V., Mair, R. *Nachhaltiges LowTech Gebäude. Konzepte für klimaverträgliche, energieeffiziente „Low Tech“ Gebäude*. Forschungsbericht, Lehrstuhl für energieeffizientes und nachhaltiges Planen und Bauen, Universität Liechtenstein, 2014.

[Schmidt, 2018] Schmidt, J. *Sensitivitätsanalyse wesentlicher Einflussfaktoren auf den Energiebedarf von Wohngebäuden. Eine Untersuchung der DIN V 4108 in Verbindung mit DIN V 4701*. Masterarbeit, Lehrstuhl für Bauphysik, Technische Universität München, 2016.

[Schulz, Knodt et al., 2017] Schulz, D.; Knodt, D.; Konietzny, S.; et al. *MONALisa – Automatisiertes MONitoring, Alarming und VisuaLisieren von Sensordaten der technischen Gebäudeausrüstung zur Erschließung niedrig investiver Energieeinsparpotentiale*. Forschungsbericht. Fraunhofer-Institut für intelligente Analyse- und Informationssysteme IAIS, Stuttgart, 2017.

[Schramek, Recknagel et al., 2011] *Taschenbuch für Heizung & Klimatechnik 13/14*: Digitalversion (eBook). München: Oldenbourg Industrieverlag, 76. Aufl., 2012.

[Siemens, 2018] Siemens AG. *Portfolio Energiemanagement*. Veröffentlichung, Siemens AG - Building Technologies, 2018.

[Statista, 2022] Statista. *Strom- und Energiepreise in Deutschland*, Statista. Online, 2022. Verfügbar unter: <https://de.statista.com/statistik/studie/id/10091/dokument/strom-und-energiepreise-statista-dossier/>

[UBA, 2022] Umweltbundesamt UBA. *Energiesparende Gebäude*. Online, 2022. Verfügbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/energiesparen/energiesparende-gebäude#eigentümer>

[Werner, Chmella-Emrich et al., 2008] Werner, P., Chmella-Emrich, E.; Vilz, A. *Folgen des Klimawandels: Gebäude und Baupraxis in Deutschland*. Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung BMVBS, 2008. Verfügbar unter <https://dnb.info/988933985/34>

[Vattenfall, 2022] Vattenfall GmbH. *Primärenergiefaktor - Stadtwärme erhält Bestwerte bei der Energieeffizienz*. Online, 2022. Verfügbar unter: <https://wärme.vattenfall.de/fernwärme/fernwärme-berlin/primärenergiefaktor/>

[VDI Ressourceneffizienz, 2022] Verein Deutscher Ingenieure VDI, Zentrum Ressourceneffizienz. *Ressourceneffizienz im Bauwesen*. Online, 2022. Verfügbar unter: <https://www.ressourcen-deutschland.de/themen/bauwesen/>

[VDI 6009-1, 2002] Verein Deutscher Ingenieure VDI. *Facility Management: Anwendungsbeispiele aus dem Gebäudemanagement*. Richtlinie, 2002.

Abbildungsverzeichnis

| | |
|--|----|
| Abbildung 1: Grafische Darstellung des Forschungsansatzes bzw. Workflow | 4 |
| Abbildung 2: Zusammenstellung und Auswertung der Betriebsfehler und Häufigkeiten | 20 |
| Abbildung 3: Histogramme und Box-Plots der Parametergruppe A / B / C für Zielgröße Primärenergiebedarf | 27 |
| Abbildung 4: Streudiagramme der 3 Zielgrößen von relativer SA für Parametergruppe A (links/rechts: erster/zweiter Rang)..... | 29 |
| Abbildung 5: Histogramme und Box-Plots der Parametergruppe A für alle 3 Zielgrößen..... | 33 |
| Abbildung 6: Totaleffekte der spezifischen Sensitivitätsanalysen von Parametergruppe A..... | 35 |
| Abbildung 7: Histogramme und Box-Plots der Parametergruppe A / B / C für alle 3 Zielgrößen.... | 37 |
| Abbildung 8: Totaleffekte der spezifischen SA von Parametergruppe A, B & C..... | 40 |
| Abbildung 9: Komfortband nach EN 16798-1 für Wertebereich Input-Parameter Sollwerte Heizen / Kühlen (Y = operative Raumtemperatur [°C]; X = Außenlufttemperatur [°C]) | 43 |
| Abbildung 10: Außenlufttemperaturen und Jahresdauerlinien für DWD TRY 2015 (links) und DWD TRY 2045 (rechts) am Standort Krausenstraße | 47 |
| Abbildung 11: Box-Plots für Zielgrößen Energie Performance Gap und Gebäude „KRA“ (DWD TRY 2015) | 49 |
| Abbildung 12: Box-Plots für Zielgrößen Komfort Performance Gap und Gebäude „KRA“ (DWD TRY 2015) | 50 |
| Abbildung 13: Box-Plots für Zielgrößen Energie Performance Gap und Gebäude „KRA“ (DWD TRY 2045) | 51 |
| Abbildung 14: Box-Plots für Zielgrößen Komfort Performance Gap und Gebäude „KRA“ (DWD TRY 2045) | 51 |
| Abbildung 15: Box-Plots für Zielgrößen Energie Performance Gap und Gebäude „RPU“ (DWD TRY 2015) | 54 |
| Abbildung 16: Box-Plots für Zielgrößen Komfort Performance Gap und Gebäude „RPU“ (DWD TRY 2015) | 54 |
| Abbildung 17: Box-Plots für Zielgrößen Energie Performance Gap und Gebäude „RPU“ (DWD TRY 2045) | 56 |

| | |
|--|----|
| Abbildung 18: Box-Plots für Zielgrößen Komfort Performance Gap und Gebäude „RPU“ (DWD TRY 2045) | 56 |
| Abbildung 19: Endenergie und Energiekosten für beide Untersuchungsgebäude in Abhängigkeit unterschiedlicher Berechnungsgrundlagen | 60 |
| Abbildung 20: Gesamte Betriebskosten für beide Untersuchungsgebäude in Abhängigkeit unterschiedlicher Berechnungsgrundlagen | 61 |
| Abbildung 21: Betriebskosten pro m ² BGF für beide Untersuchungsgebäude in Abhängigkeit unterschiedlicher Berechnungsgrundlagen | 62 |

Tabellenverzeichnis

| | |
|---|----|
| Tabelle 1: Zusammenstellung statistischer Kennzahlen der Zielgrößen in Abhängigkeit der Parametergruppen | 28 |
| Tabelle 2: Rangliste für Parametergruppe A von relativer SA mit Varianz durch Streudiagramme | 30 |
| Tabelle 3: Rangliste für Parametergruppe A von relativer SA mit SRCC-Regression..... | 30 |
| Tabelle 4: Zusammenstellung der Input-Parameter und Wahrscheinlichkeitsverteilungen für Parametergruppe A..... | 32 |
| Tabelle 5: Zusammenstellung statistischer Kennzahlen der 3 Zielgrößen für Parametergruppe A | 33 |
| Tabelle 6: Zusammenfassung der einflussreichsten Inputs der spezifischen SA von Parametergruppe A..... | 35 |
| Tabelle 7: Zusammenstellung der Input-Parameter und Wahrscheinlichkeitsverteilungen für Parametergruppe A / B / C..... | 36 |
| Tabelle 8: Zusammenstellung statistischer Kennzahlen der Zielgrößen für die Parametergruppen | 38 |
| Tabelle 9: Zusammenfassung der einflussreichsten Faktoren der spezifischen SA von Parametergruppe A, B & C | 40 |
| Tabelle 10: Übersicht der Simulationsergebnisse für korrekte Betriebszustände (Index 400 / Punktsimulation) beider Untersuchungsgebäude | 58 |

Anhang

Relative Unsicherheits- und Sensitivitätsanalysen: Zusammenstellung Input-Parameter und Wahrscheinlichkeitsverteilungen Parametergruppe A

| Input-Parameter | | | Wahrscheinlichkeitsverteilung | | | |
|-----------------|--|-----------------------|-------------------------------|----------------------------|--------|-------|
| Code | Beschreibung | Einheit | Verteilung | Verteilung (μ ; s) | Min. | Max. |
| error_1.1 | Volumenstrom Zonenebene | l/(s*m ²) | normalverteilt | ~ N(1,238; 0,062) | 1,1 | 1,4 |
| error 2.1 | Differenzdruck Zuluftventilator | Pa | normalverteilt | ~ N(600,0; 30,0) | 527 | 672 |
| error_2.2 | Differenzdruck Abluftventilator | Pa | normalverteilt | ~ N(500,0; 25,0) | 440 | 560 |
| error 2.4 | Betriebsbeginn TKA | h | normalverteilt | ~ N(05:00; 0,65) | 3.60 | 6.57 |
| error 2.5 | Betriebsende TKA | h | normalverteilt | ~ N(18:00; 0,65) | 16,4 | 19,6 |
| error 3.1 | Stellbereich Umluftklappe | 1 | normalverteilt (begrenzt) | ~ N(0,000; 0,053) | 0,0005 | 0,141 |
| error 4.1 | Sperrtemperatur WRG | °C | normalverteilt | ~ N(3,0; 0,15) | 2,6 | 3,4 |
| error 4.5 | Wärmeübergang WRG | 1 | normalverteilt | ~ N(0,750; 0,038) | 0,66 | 0,84 |
| error 5.1 | Wärmeübergang Vorheizregister | 1 | normalverteilt (begrenzt) | ~ N(1,0; 0,05) | 0,88 | 0,99 |
| error 5.2 | Massenstrom Regelventil Vorheizregister | kg/s | normalverteilt (begrenzt) | ~ N(0,00; 0,009) | 0,0001 | 0,022 |
| error 5.3 | Differenzdruck Pumpe Vor-/Nachheizregister | Pa | normalverteilt | ~ N(30000; 1500) | 26374 | 33626 |
| error 5.4 | Temperaturspreizung Vorheizregister | K | normalverteilt | ~ N(15,0; 0,750) | 13,4 | 16,8 |
| error 5.6 | Wärmeübergang Nachheizregister | 1 | normalverteilt (begrenzt) | ~ N(1,0; 0,05) | 0,87 | 0,99 |
| error 5.7 | Massenstrom Regelventil Nachheizregister | kg/s | normalverteilt (begrenzt) | ~ N(0,00; 0,009) | 0,0001 | 0,024 |
| error 5.8 | Temperaturspreizung Nachheizregister | K | normalverteilt | ~ N(15,0; 0,75) | 13,2 | 16,8 |
| error 5.10 | Wärmeübergang Kühlregister | 1 | normalverteilt (begrenzt) | ~ N(1,0; 0,05) | 0,87 | 0,99 |
| error 5.11 | Massenstrom Regelventil Kühlregister | kg/s | normalverteilt (begrenzt) | ~ N(0,00; 0,018) | 0,0002 | 0,047 |
| error 5.12 | Differenzdruck Pumpe Kühlregister | Pa | normalverteilt | ~ N(30000; 1500) | 26374 | 33626 |

| Input-Parameter | | | Wahrscheinlichkeitsverteilung | | | |
|-----------------|-----------------------------------|------------------|-------------------------------|-------------------------|------|------|
| Code | Beschreibung | Einheit | Verteilung | Verteilung ($\mu; s$) | Min. | Max. |
| error 5.13 | Temperaturspreizung Kühlregister | K | normalverteilt | $\sim N(6,0; 0,3)$ | 5,4 | 6,7 |
| error 5.19 | Raumlufttemperatursensor (Offset) | °C | normalverteilt | $\sim N(0,00; 1,08)$ | -2,6 | 2,3 |
| error 6.1 | Abluftfeuchtesensor (Offset) | % r.F. | normalverteilt | $\sim N(0,00; 1,701)$ | -3,7 | 4,1 |
| error 8.1 | Anzahl Personen | 1 | normalverteilt | $\sim N(2,0; 0,1)$ | 1,8 | 2,2 |
| error 8.2 | Sonnenschutz | W/m ² | normalverteilt | $\sim N(200,0; 10,0)$ | 176 | 224 |
| error 8.3 | Fensteröffnungszeit | h/d | normalverteilt (begrenzt) | $\sim N(0,00; 0,55)$ | 0 | 1,3 |

Relative Unsicherheits- und Sensitivitätsanalysen: Zusammenstellung Input-Parameter und Wahrscheinlichkeitsverteilungen Parametergruppe B

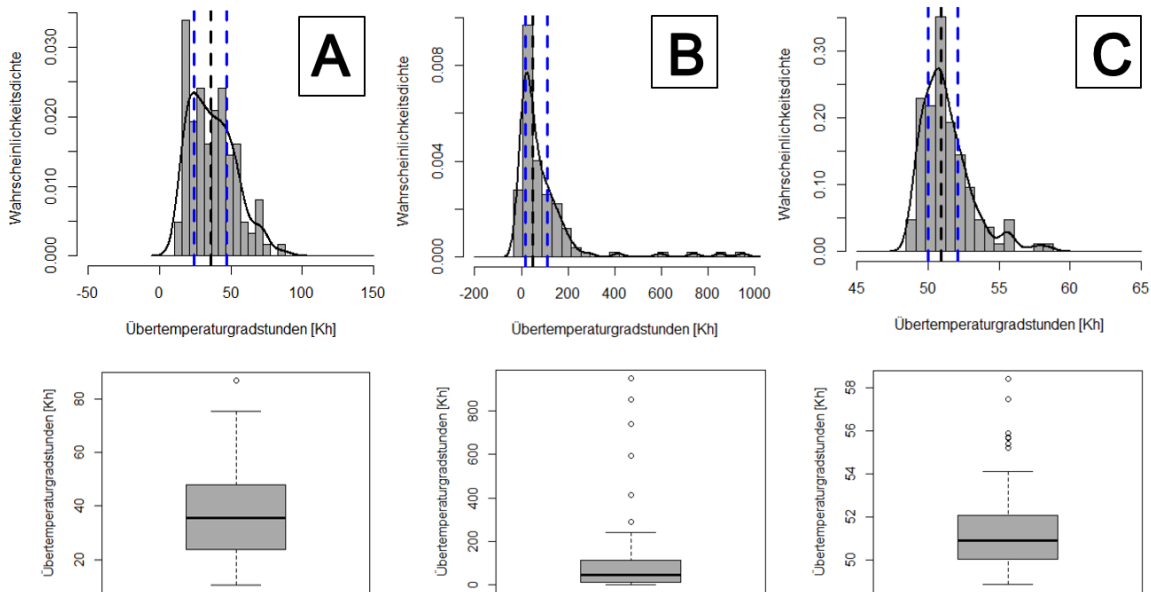
| Input-Parameter | | Wahrscheinlichkeitsverteilung | | | |
|---------------------------------------|----------------------|-------------------------------|-------------------------|------|------|
| Beschreibung | Einheit | Verteilung | Verteilung ($\mu; s$) | Min. | Max. |
| Infiltration (ACH) | 1/h | normalverteilt | $\sim N(0,300; 0,015)$ | 0.26 | 0.34 |
| Fensterflächenanteil | 1 | normalverteilt | $\sim N(0,510; 0,076)$ | 0.35 | 0.69 |
| Ug-Wert (Verglasung) | W/(m ² K) | normalverteilt | $\sim N(1,100; 0,055)$ | 0.97 | 1.23 |
| U-Wert Außenwand | W/(m ² K) | normalverteilt | $\sim N(0,349; 0,005)$ | 0.31 | 0.39 |
| Minimaler Raumlufttemperatur-Sollwert | °C | normalverteilt | $\sim N(21,0; 1,05)$ | 18.5 | 23.5 |
| Maximaler Raumlufttemperatur-Sollwert | °C | normalverteilt | $\sim N(24,0; 1,2)$ | 21.4 | 26.9 |

Relative Unsicherheits- und Sensitivitätsanalysen: Zusammenstellung Input-Parameter und Wahrscheinlichkeitsverteilungen Parametergruppe C

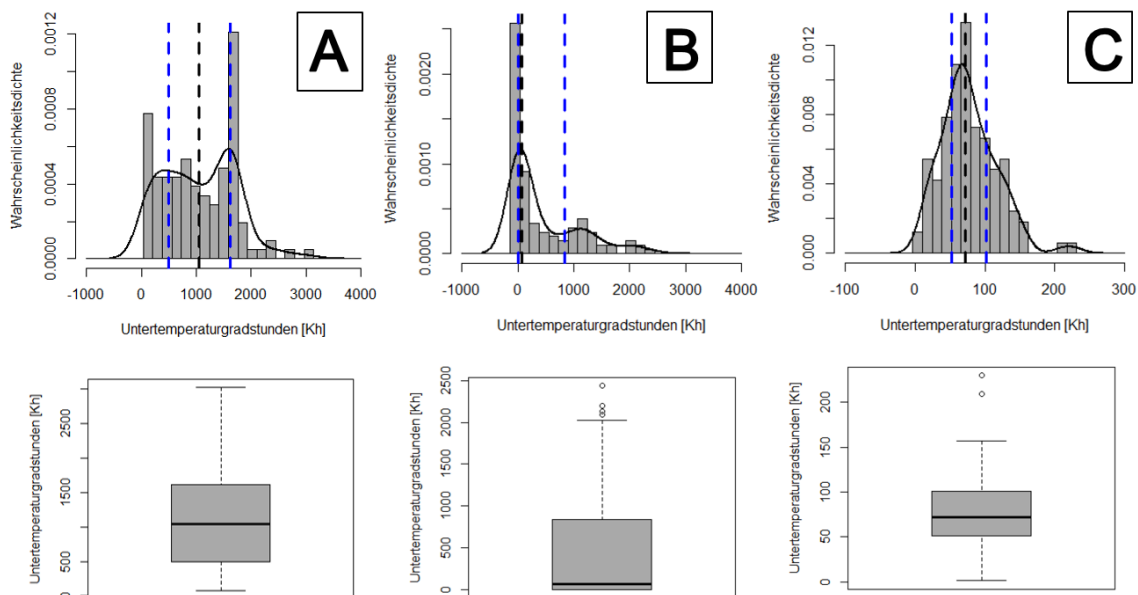
| Input-Parameter | | Wahrscheinlichkeitsverteilung | | | |
|---|----------------------|-------------------------------|-------------------------|------|------|
| Beschreibung | Einheit | Verteilung | Verteilung ($\mu; s$) | Min. | Max. |
| Betriebsbeginn Anlagentechnik | 1/h | normalverteilt | $\sim N(05:00; 0,65)$ | 3.4 | 6.6 |
| Betriebsende Anlagentechnik | 1 | normalverteilt | $\sim N(18:00; 0,65)$ | 16.4 | 19.6 |
| Wirkungsgrad Wärmeerzeuger | W/(m ² K) | normalverteilt (begrenzt) | $\sim N(0,890; 0,045)$ | 0.78 | 0.98 |
| COP Kälteerzeuger | W/(m ² K) | normalverteilt | $\sim N(3,000; 0,15)$ | 2.64 | 3.36 |
| Vorlauftemperatur-Sollwert Heizregister | °C | normalverteilt | $\sim N(70,0; 3,5)$ | 62 | 79 |
| Vorlauftemperatur-Sollwert Kühlregister | °C | normalverteilt | $\sim N(6,0; 0,3)$ | 5.4 | 6.7 |

| Input-Parameter | | Wahrscheinlichkeitsverteilung | | | |
|---------------------------------------|---------|-------------------------------|-------------------------|-------|-------|
| Beschreibung | Einheit | Verteilung | Verteilung ($\mu; s$) | Min. | Max. |
| Temperatur-Sollwert Nachtabsenkung | °C | normalverteilt | $\sim N(17,0; 0,85)$ | 14,95 | 19,05 |

Relative Unsicherheits- und Sensitivitätsanalysen: Histogramme und Boxplots der Parametergruppe A/B/C für Zielgröße Übertemperaturgradstunden



Relative Unsicherheits- und Sensitivitätsanalysen: Histogramme und Boxplots der Parametergruppe A/B/C für Zielgröße Untertemperaturgradstunden



Relative Unsicherheits- und Sensitivitätsanalysen: Rangliste für Parametergruppe B von relativer SA mit Varianz durch Streudiagramme

| Zielgröße | Primärenergiebedarf [kWh/m ² a] | | Übertemperaturgradstunden [Kh/a] | | Untertemperaturgradstunden [Kh/a] | |
|-----------|--|-----------------------|----------------------------------|---------|-----------------------------------|-----------------------|
| | Rang | Input | Varianz | Input | Varianz | Input |
| #1 | max. Sollwert Raumtemperatur | 122,9x10 ⁶ | max. Sollwert Raumtemperatur | 17036,3 | min. Sollwert Raumtemperatur | 406,9x10 ³ |
| #2 | min. Sollwert Raumtemperatur | 75,5x10 ⁶ | U _g -Wert Verglasung | 3504,5 | Fensterflächenanteil | 115,3x10 ³ |
| #3 | Fensterflächenanteil | 38,3x10 ⁶ | Infiltration (ACH) | 2299,7 | max. Sollwert Raumtemperatur | 58,2x10 ³ |

Relative Unsicherheits- und Sensitivitätsanalysen: Rangliste für Parametergruppe B von relativer SA mit SRCC-Regression

| Zielgröße | Primärenergiebedarf [kWh/m ² a] | | Übertemperaturgradstunden [Kh/a] | | Untertemperaturgradstunden [Kh/a] | |
|-----------|--|--------|----------------------------------|--------|-----------------------------------|--------|
| | Rang | Input | SRCC | Input | SRCC | Input |
| #1 | max. Sollwert Raumtemperatur | 0,907 | max. Sollwert Raumtemperatur | 0,999 | min. Sollwert Raumtemperatur | -0,996 |
| #2 | min. Sollwert Raumtemperatur | -0,202 | U _g -Wert Verglasung | 0,038 | Fensterflächenanteil | 0,092 |
| #3 | Fensterflächenanteil | -0,197 | Infiltration (ACH) | -0,030 | max. Sollwert Raumtemperatur | -0,045 |

Relative Unsicherheits- und Sensitivitätsanalysen: Rangliste für Parametergruppe C von relativer SA mit Varianz durch Streudiagramme

| Zielgröße | Primärenergiebedarf [kWh/m ² a] | | Übertemperaturgradstunden [Kh/a] | | Untertemperaturgradstunden [Kh/a] | |
|-----------|--|-----------------------|----------------------------------|-------|-----------------------------------|-------|
| | Rang | Input | Varianz | Input | Varianz | Input |
| #1 | eta Wärmerezeuger | 103,2x10 ⁴ | Betriebsende Anlagentechnik | 2,677 | Betriebsbeginn Anlagentechnik | 769,5 |
| #2 | COP Kältemaschine | 57,8x10 ⁴ | COP Kältemaschine | 0,978 | Temp. Vorlauf Heizregister | 243,5 |
| #3 | Betriebsbeginn Anlagentechnik | 37,3x10 ⁴ | Temp. Vorlauf Kühlregister | 0,728 | Betriebsende Anlagentechnik | 238,2 |

Relative Unsicherheits- und Sensitivitätsanalysen: Rangliste für Parametergruppe C von relativer SA mit SRCC-Regression

| Zielgröße | Primärenergiebedarf [kWh/m ² a] | | Übertemperaturgradstunden [Kh/a] | | Untertemperaturgradstunden [Kh/a] | |
|-----------|--|--------|----------------------------------|-------|-----------------------------------|--------|
| | Rang | Input | SRCC | Input | SRCC | Input |
| #1 | eta Wärmerezeuger | -0,791 | Temp. Vorlauf Kühlregister | 0,506 | Betriebsbeginn Anlagentechnik | 0,652 |
| #2 | Betriebsbeginn Anlagentechnik | -0,457 | Betriebsende Anlagentechnik | 0,327 | Temp. Vorlauf Heizregister | -0,313 |

| Zielgröße | Primärenergiebedarf [kWh/m ² a] | | Übertemperaturgradstunden [Kh/a] | | Untertemperaturgradstunden [Kh/a] | | |
|-----------|--|--------|----------------------------------|-------|-----------------------------------|--------|------|
| | Rang | Input | SRCC | Input | SRCC | Input | SRCC |
| #3 | COP Kältemaschine | -0,154 | Betriebsbeginn Anlagentechnik | 0,068 | Betriebsende Anlagentechnik | -0,224 | |

Inputs regelbasiertes Modell zur Anwendung und Analyse von RLT-Anlagen (Betriebsregeln)

| | |
|---------------------------|--|
| <i>Betrieb der Anlage</i> | |
| Indikatoren | Stellbefehl Abluftventilator Stellbefehl Zuluftventilator Zuluftdruck Abluftdruck Volumenstrom |
| Verknüpfung | Stellbefehl Ventilator > 0 Druck > Grenzwert Volumenstrom > 0 |
| <i>Heizen</i> | |
| Indikatoren | Stellbefehl Heizen Ventil Stellbefehl Pumpe Stellbefehl Vorlauftemperatur Rücklauftemperatur |
| Verknüpfung | Stellbefehl Heizen > 0 Ventil > 0,05 Stellbefehl Pumpe > 0 ΔT Vorlauf- und Rücklauftemperatur > Grenzwert |
| <i>Kühlen</i> | |
| Indikatoren | Stellbefehl Kühler Ventil Stellbefehl Pumpe Stellbefehl Vorlauftemperatur Rücklauftemperatur |
| Verknüpfung | Stellbefehl Kühlen > 0 Ventil > 0,05 Stellbefehl Pumpe > 0 ΔT Vorlauf- und Rücklauftemperatur > Grenzwert |
| <i>Nacherhitzer</i> | |
| Indikatoren | Stellbefehl Nacherhitzer Ventil Stellbefehl Pumpe Stellbefehl |

| | |
|--------------------|--|
| | Vorlauftemperatur Rücklauftemperatur |
| Verknüpfung | Stellbefehl Nacherhitzer > 0 Ventil > 0,05 Stellbefehl Pumpe > 0 ΔT Vorlauf- und Rücklauftemperatur > Grenzwert |
| KVS | |
| Indikatoren | Stellbefehl KVS Ventil Stellbefehl Pumpe Stellbefehl Vorlauftemperatur Rücklauftemperatur |
| Verknüpfung | Stellbefehl KVS > 0 Ventil > 0,05 Stellbefehl Pumpe > 0 ΔT Vorlauf- und Rücklauftemperatur > Grenzwert |

| | |
|--|---|
| <i>r0.1 Sensor (in Anlehnung an (Schein et al., 2006))</i> | |
| Indikator | Mischlufttemperatur fehlerhaft |
| Verknüpfung | Anlage in Betrieb Mischlufttemperatur > Max(Ablufttemperatur, Außenlufttemperatur) Mischlufttemperatur < Min(Ablufttemperatur, Außenlufttemperatur) |
| Mögliche Ursache/n | Sensor falsch kalibriert Sensor defekt |

| | |
|---------------------------|--|
| <i>r1.1.1 Temperatur</i> | |
| Indikator | Sollwert der Raum-, Zuluft- oder Ablufttemperatur wird überschritten (Toleranz 1K) |
| Verknüpfung | Anlage in Betrieb Raumtemperatur > Raumtemperatur Sollwert Zulufttemperatur > Zulufttemperatur Sollwert Ablufttemperatur > Ablufttemperatur Sollwert Zulufttemperatur > Zulufttemperatur Maximum |
| Mögliche Ursache/n | Lufterhitzer/ Wärmerückgewinnung defekt Filter verschmutzt Frequenzumformer/ Ventilator defekt Kälteerzeugung/ -verteilung defekt Interne Lasten geändert |

| | |
|--------------------------------|--|
| | Sonnenschutz nicht aktiv Fenster geöffnet |
| Indikator | Sollwert der Raum-, Zuluft- oder Ablufttemperatur wird unterschritten (Toleranz 1K) |
| Verknüpfung | Anlage in Betrieb Raumtemperatur < Raumtemperatur Sollwert Zulufttemperatur < Zulufttemperatur Sollwert Ablufttemperatur < Ablufttemperatur Sollwert Zulufttemperatur < Zulufttemperatur Minimum |
| Mögliche Ursache/n | Filter defekt Kälteverteilung defekt Nacherhitzer defekt |
| Indikator | Grenzwerte Zulufttemperatur werden nicht eingehalten |
| Verknüpfung | Anlage in Betrieb Zulufttemperatur > Maximale Zulufttemperatur Zulufttemperatur < Minimale Zulufttemperatur |
| Mögliche Ursache/n | Lufterhitzer/ Wärmerückgewinnung defekt Filter defekt Kälteverteilung defekt Nacherhitzer defekt |
| <i>r1.1.2 relative Feuchte</i> | |
| Indikator | Sollwert der Zu- oder Abluftfeuchte wird überschritten (Toleranz 3%) |
| Verknüpfung | Anlage in Betrieb Zuluft relative Feuchte > Zuluft relative Feuchte Sollwert Abluft relative Feuchte > Abluft relative Feuchte Sollwert |
| Mögliche Ursache/n | Kälteerzeugung/ -verteilung defekt Interne Lasten geändert Fenster geöffnet |
| Indikator | Sollwert der Zu- oder Abluftfeuchte wird unterschritten (Toleranz 3%) |
| Verknüpfung | Anlage in Betrieb Zuluft relative Feuchte < Zuluft relative Feuchte Sollwert Abluft relative Feuchte < Abluft relative Feuchte Sollwert |
| Mögliche Ursache/n | Befeuchter defekt Interne Lasten geändert Fenster geöffnet |
| <i>r1.1.3 Druck</i> | |

| | |
|--------------------------------------|---|
| Indikator | Sollwert des Zu- oder Abluftdrucks wird überschritten (Toleranz 15 Pa) |
| Verknüpfung | Anlage in Betrieb Zuluftdruck > Zuluftdruck Sollwert Abluftdruck > Abluftdruck Sollwert |
| Mögliche Ursache/n | Ventilator defekt |
| Indikator | Sollwert des Zu- oder Abluftdrucks wird unterschritten (Toleranz 15 Pa) |
| Verknüpfung | Anlage in Betrieb Zuluftdruck < Zuluftdruck Sollwert Abluftdruck < Abluftdruck Sollwert |
| Mögliche Ursache/n | Filter verschmutzt Ventilator defekt Leckage |
| <i>r1.1.4 CO₂</i> | |
| Indikator | Sollwert der CO₂-Konzentration wird überschritten |
| Verknüpfung | Anlage in Betrieb CO ₂ -Konzentration > CO ₂ -Konzentration Sollwert |
| Mögliche Ursache/n | Erhöhte Nutzerzahl Ventilator defekt Klappe defekt |
| <i>r1.1.5 Mindestaußenluftanteil</i> | |
| Indikator | Mindestaußenluftvolumenstrom wird unterschritten (Toleranz 5%) |
| Verknüpfung | Anlage in Betrieb Außenluftvolumenstrom < Mindestaußenluftvolumenstrom |
| Mögliche Ursache/n | Klemmende Klappe Defekter Ventilator |

| | |
|----------------------------|--|
| <i>r1.2.1 Ventilatoren</i> | |
| Indikator | Zu- und Abluftventilator sind nicht gleichzeitig in Betrieb |
| Verknüpfung | Anlage in Betrieb Betriebszustand Zuluftventilator ≠ Betriebszustand Abluftventilator |
| Mögliche | Regelung falsch |

| | |
|---------------------------------------|--|
| Ursache/n | |
| <i>r1.2.2 Regelventile und Pumpen</i> | |
| Indikator | Regelventil und Pumpe des Heiz-, Kühl- oder Nachheizregisters arbeiten gegengleich |
| Verknüpfung | Anlage in Betrieb Stellbefehl Pumpe > 95%, Stellbefehl Ventil < 5% ODER Stellbefehl Pumpe < 5%, Stellbefehl Ventil > 95% |
| Mögliche Ursache/n | Regelung fehlerhaft Ventilnachstellzeit |
| <i>r1.2.3 Klappen</i> | |
| Indikator | Umluftklappe wird nicht gegengleich zu Außen- und Fortluftklappe angesteuert |
| Verknüpfung | Anlage in Betrieb Summe der Klappenöffnungen Außenluft und Umluft < 95% ODER Summe der Klappenöffnungen Fortluft und Umluft < 95% |
| Mögliche Ursache/n | Regelung fehlerhaft |
| <i>r1.2.4 Ventilator und Klappen</i> | |
| Indikator | Außen- und Fortluftklappe arbeiten gegengleich zum Ventilator |
| Verknüpfung | Betriebszustand Zuluftventilator = 1 und Außenluftklappe = 0 ODER Betriebszustand Zuluftventilator = 0 und Außenluftklappe = 1 |
| Mögliche Ursache/n | Regelung fehlerhaft |
| <i>r1.3.1 Filter</i> | |
| Indikator | Enddruckdifferenz Filter erreicht |
| Verknüpfung | Anlage in Betrieb Differenzdruck Filter > Enddruckdifferenz |
| Mögliche Ursache/n | Filter verschmutzt |
| <i>r1.3.2 Leistung Temperatur</i> | |

| | |
|---------------------------|--|
| Indikator | Leistung der Register reicht nicht aus |
| Verknüpfung | Anlage in Betrieb Zulufttemp. < Zulufttemp. Sollwert, Heizregister Ventil > 95% Zulufttemp. > Zulufttemp. Sollwert, Kühlregister Ventil > 95% Zulufttemp. < Zulufttemp. Sollwert, Nachheizregister Ventil > 95% |
| Mögliche Ursache/n | Regelventil defekt Register verschmutzt Pumpe defekt Kälte-/ Wärmezeugung defekt Veränderte Lasten im Raum |

r1.3.3 Leistung Feuchtigkeit

| | |
|---------------------------|---|
| Indikator | Leistung des Befeuchters/des Kühlers reicht nicht aus |
| Verknüpfung | Anlage in Betrieb Zuluft relative Feuchte < Zuluft relative Feuchte Sollwert, Befeuchter Ventil > 95% Zuluft relative Feuchte > Zuluft relative Feuchte Sollwert, Kühler Ventil > 95% |
| Mögliche Ursache/n | Regelventil defekt Pumpe defekt Wasserversorgung defekt Veränderte Lasten im Raum |

r1.4.1 WRG Vereisung

| | |
|---------------------------|--|
| Indikator | Vereisungsschutz WRG aktiv und Luftstrom passiert die WRG |
| Verknüpfung | Anlage in Betrieb WRG \neq Wärmerohr Außenlufttemperatur < Taupunkt Abluft Bypassklappe < 95% |
| Mögliche Ursache/n | Regelung fehlerhaft |

r1.4.2 Frostschutz

| | |
|---------------------------|--|
| Indikator | Zu- und Abluftventilatoren sind in Betrieb, Außenluftklappe geöffnet oder kein Heizbetrieb, obwohl Frostschutzbetrieb |
| Verknüpfung | Frostschutzbetrieb Zu- und Abluftventilator Betriebszustand > 0 Außenklappe > 5% Heizen = 0 |
| Mögliche Ursache/n | Regelung fehlerhaft |

| | |
|------------------------------------|--|
| <i>r1.4.3 Stillstand</i> | |
| Indikator | Erhitzerrücklauftemperatur unter Grenzwert obwohl Außentemperatur unter 7°C |
| Verknüpfung | Außentemperatur < 7°C Erhitzerrücklauftemperatur < 12°C |
| Mögliche Ursache/n | Regelung fehlerhaft |
| <i>r1.4.4 Pumpenblockierschutz</i> | |
| Indikator | Pumpe wurde seit 1 Tag nicht mehr verwendet |
| Verknüpfung | Zeitschritte seit letztem Betrieb > Grenzwert Zeitschritte |
| Mögliche Ursache/n | Regelung fehlerhaft |

| | |
|---------------------------------------|--|
| <i>r2.1 Zeitabhängiger Betrieb</i> | |
| Indikator | Anlage in Betrieb, obwohl außerhalb der Betriebszeiten |
| Verknüpfung | Betrieb laut Zeitplan ≠ Betrieb der Anlagen |
| Mögliche Ursache/n | Regelung fehlerhaft Manueller Eingriff |
| <i>r2.2 Präsenzabhängiger Betrieb</i> | |
| Indikator | Anlage in Betrieb, obwohl keine Anwesenheit |
| Verknüpfung | Anlage in Betrieb Präsenz = 0 |
| Mögliche Ursache/n | Regelung fehlerhaft Manueller Eingriff |
| <i>r2.3 Nachtkühlbetrieb</i> | |
| Indikator | Voraussetzungen für Nachtkühlbetrieb gegeben, aber Ventilator nicht in Betrieb (Toleranz 1 K) |
| Verknüpfung | Kein Betrieb laut Zeitplan Außenlufttemperatur < Raumlufttemperatur Raumlufttemperatur > Raumlufttemperatur Sollwert |
| Mögliche Ursache/n | Regelung nicht hinterlegt |

| | |
|---|---|
| <i>r2.4 Freie direkte Kühlung</i> | |
| Indikator | Voraussetzung für freie direkte Kühlung gegeben, aber Außenluftanteil ist nicht 100% oder WRG läuft |
| Verknüpfung | Betrieb der Anlage Kühlen aktiv Außenlufttemperatur < Zulufttemperatur Sollwert Außenlufttemperatur < Ablufttemperatur WRG läuft ODER Außenluftanteil \neq 100% |
| Mögliche Ursache/n | Regelung nicht hinterlegt |
| <i>r2.5 Betriebswechsel (in Anlehnung an (Schein et al., 2006))</i> | |
| Indikator | Zu häufige Betriebswechsel |
| Verknüpfung | Betrieb der Anlage Anzahl Betriebswechsel pro Stunde > 7 |
| Mögliche Ursache/n | Keine Hysterese |
| <i>r2.6 Gleichzeitig Heizen und Kühlen (in Anlehnung an (Deuter, 2018))</i> | |
| Indikator | Ausgangszustand „(Befeuchten und) Heizen“ und Kühler ist in Betrieb |
| Verknüpfung | Betrieb der Anlage Außenlufttemperatur < Zulufttemperatur Sollwert Außenluftfeuchte \leq Zuluftfeuchte Sollwert Betrieb des Kühlers |
| Mögliche Ursache/n | Regelung fehlerhaft |
| Indikator | Ausgangszustand „Entfeuchten (und Heizen)“ und Vorerhitzer oder WRG ist in Betrieb |
| Verknüpfung | Betrieb der Anlage Außenlufttemperatur \leq Zulufttemperatur Sollwert Außenluftfeuchte > Zuluftfeuchte Sollwert Betrieb des Vorerhitzers Betrieb der WRG |
| Mögliche Ursache/n | Regelung fehlerhaft |
| Indikator | Ausgangszustand „Entfeuchten und Kühlen“ und Vorerhitzer ist in Betrieb |
| Verknüpfung | Betrieb der Anlage Außenlufttemperatur > Zulufttemperatur Sollwert |

| | |
|---------------------------|---|
| | Außenluftfeuchte > Zuluftfeuchte Sollwert Betrieb des Vorerhitzers |
| Mögliche Ursache/n | Regelung fehlerhaft |
| Indikator | Ausgangszustand „nur Kühlen“ und Vorerhitzer oder Nacherhitzer ist in Betrieb |
| Verknüpfung | Betrieb der Anlage Außenlufttemperatur > Zulufttemperatur Sollwert Außenluftfeuchte = Zuluftfeuchte Sollwert Betrieb des Vorerhitzers Betrieb des Nacherhitzers |
| Mögliche Ursache/n | Regelung fehlerhaft |
| Indikator | Ausgangszustand „Befeuchten und Kühlen“ |
| Verknüpfung | Betrieb der Anlage Außenlufttemperatur > Zulufttemperatur Sollwert Außenluftfeuchte < Zuluftfeuchte Sollwert Je nach Feuchteregelung Betrieb des Vorerhitzers, Nacherhitzers, Kühlers oder der WRG |
| Mögliche Ursache/n | Regelung fehlerhaft |
| Indikator | Ausgangszustand „nur Befeuchten“ und Kühler ist in Betrieb |
| Verknüpfung | Betrieb der Anlage Außenlufttemperatur = Zulufttemperatur Sollwert Außenluftfeuchte < Zuluftfeuchte Sollwert Betrieb des Kühlers |
| Mögliche Ursache/n | Regelung fehlerhaft |

Betriebsfehler "Gleichzeitig Heizen und Kühlen" in Abhängigkeit der Außenluftzustände

| | Vorerhitzer | WRG | Kühlregister | Befeuchter | Nacherhitzer |
|---------------------------------|--------------------|------------|---------------------|-------------------|---------------------|
| 1 Befeuchten und Heizen | | | x | | |
| 2 Nur Heizen | | | x | | |
| 3 Entfeuchten und Heizen | x | x | | | |
| 4 Nur Entfeuchten | x | x | | | |

| | | | | | |
|---|---|---|---|--|---|
| 5 Entfeuchten und Kühlen | x | | | | |
| 6 Nur Kühlen | x | | | | x |
| 7 Befeuchten und Kühlen | | | | | |
| Enthalpie, $T_{FK,AUL} > T_{FK,ZUL}$ | x | | | | x |
| Enthalpie, $T_{FK,AUL} < T_{FK,ZUL}$ | | x | x | | |
| Taupunkt, $T_{FK,AUL} > T_{FK,TP(ZUL)}$ | x | | | | |
| Taupunkt, $T_{FK,AUL} < T_{FK,TP(ZUL)}$ | | | x | | |
| Isotherm | x | | | | x |
| 8 Nur Befeuchten | | | x | | |

| | |
|---|--|
| <i>r3.1 Behaglichkeitsfeld</i> | |
| Indikator | Raumluftzustand liegt außerhalb des Behaglichkeitsfeldes |
| Verknüpfung | Betrieb der Anlage Raumtemperatur ODER relative Feuchte \notin Behaglichkeitsfeld |
| Mögliche Ursache/n | Sollwerte falsch eingestellt Lufterhitzer/ Wärmerückgewinnung defekt Filter verschmutzt Frequenzumformer/ Ventilator defekt Kälteerzeugung/ -verteilung defekt Befeuchter defekt Interne Lasten geändert Sonnenschutz nicht aktiv Fenster geöffnet |
| <i>r3.2 Raumlufttemperatur unabhängig von Außentemperatur</i> | |
| Indikator | Raum-oder Ablufttemperatur wird nicht nach der Außentemperatur geführt |
| Verknüpfung | Betrieb der Anlage Raumtemperatur \notin gleitender Sollwert Ablufttemperatur \notin gleitender Sollwert |
| Mögliche Ursache/n | Sollwerte falsch eingestellt |
| <i>r3.3 CO₂-Konzentration</i> | |

| | |
|------------------------------|---|
| Indikator | CO₂-Konzentration übersteigt Grenzwert aus ASR |
| Verknüpfung | Betrieb der Anlage CO ₂ -Konzentration > 1000 ppm |
| Mögliche Ursache/n | Außenluftanteil zu gering Klappe klemmt Ventilator defekt Erhöhte Nutzerzahl |
| <i>r3.4 Zegerscheinungen</i> | |
| Indikator | Temperaturdifferenz zwischen Zuluft und Raumluf zu hoch (alternativ: Abluft) |
| Verknüpfung | Betrieb der Anlage ΔT Zuluft- und Raumluf > 4 K |
| Mögliche Ursache/n | Sollwert falsch eingestellt Luftmenge zu gering Komponenten defekt |