FORSCHUNGSINITIATIVE Zukunft BAU

F 3160

T. Schmid, C. Hepf, T. Wagner
S. Meile, I. Bratoev, G. Schubert

Dezentrale MSR

Konzeptentwicklung zur dezentralen Mess-, Steuer- und Regelungstechnik in Gebäuden im Kontext des Internet of Things

Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung
im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung

Fraunhofer IRB Verlag

F 3160

Bei dieser Veröffentlichung handelt es sich um die Kopie des Abschlussberichtes einer vom Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR) im Rahmen der Forschungsinitiative »Zukunft Bau« geförderten Forschungsarbeit. Die in dieser Forschungsarbeit enthaltenen Darstellungen und Empfehlungen geben die fachlichen Auffassungen der Verfasser wieder. Diese werden hier unverändert wiedergegeben, sie geben nicht unbedingt die Meinung des Zuwendungsgebers oder des Herausgebers wieder.

Dieser Forschungsbericht wurde mit modernsten Hochleistungskopierern auf Einzelanfrage hergestellt.

Die Originalmanuskripte wurden reprotechnisch, jedoch nicht inhaltlich überarbeitet. Die Druckqualität hängt von der reprotechnischen Eignung des Originalmanuskriptes ab, das uns vom Autor bzw. von der Forschungsstelle zur Verfügung gestellt wurde.

© by Fraunhofer IRB Verlag

2019

ISBN 978-3-7388-0382-2

Vervielfältigung, auch auszugsweise,
nur mit ausdrücklicher Zustimmung des Verlages.

Fraunhofer IRB Verlag
Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau

Postfach 80 04 69
70504 Stuttgart

Nobelstraße 12
70569 Stuttgart

Telefon 07 11 9 70 - 25 00
Telefax 07 11 9 70 - 25 08

E-Mail irb@irb.fraunhofer.de

www.baufachinformation.de

www.irb.fraunhofer.de/bauforschung

Dezentrale MSR

Konzeptentwicklung zur dezentralen
Mess-, Steuer- und Regelungstechnik in Gebäuden
im Kontext des Internet of Things

T. Schmid | C. Hepf | T. Wagner | S. Meile | I. Bratoev | G. Schubert

Endbericht

München, Februar 2019

Dezentrale MSR

Konzeptentwicklung zur dezentralen
Mess-, Steuer- und Regelungstechnik in Gebäuden
im Kontext des Internet of Things

T. Schmid | C. Hepf | T. Wagner | S. Meile | I. Bratoev | G. Schubert

Dezentrale MSR

Konzeptentwicklung zur dezentralen
Mess-, Steuer- und Regelungstechnik in Gebäuden
im Kontext des Internet of Things

Endbericht

Der Bericht umfasst 104 Seiten Text.

Projektlaufzeit:

Oktober 2017 – Dezember 2018

Impressum:

Technische Universität München
Fakultät für Architektur
Arcisstr. 21
80333 München

Lehrstuhl für Gebäudetechnologie und klimagerechtes Bauen
Prof. Dipl.-Ing. Thomas Auer
Dipl.-Wirt.-Ing. Thomas Schmid, M.Sc.
Christian Hepf, M.Sc.
Dipl.-Ing. Tobias Wagner
Samuel Meile, B.Sc.

Lehrstuhl für Architekturinformatik
Prof. Dr.-Ing. Frank Petzold
Ivan Bratoev, M.Sc.
Dr.-Ing. Gerhard Schubert

München, Februar 2019

Das Forschungsvorhaben wurde unterstützt von:
Robert Bosch GmbH

Der Forschungsbericht wurde mit Mitteln der Forschungsinitiative Zukunft Bau
des Bundesinstitutes für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) gefördert.
(Aktenzeichen: SWD-10.08.18.7-17.54)
Die Verantwortung für den Inhalt des Berichtes liegt beim Autor.

Dezentrale MSR

Konzeptentwicklung zur dezentralen Mess-, Steuer- und Regelungstechnik in Gebäuden im Kontext des Internet of Things

Kurzzusammenfassung

Die Mess-, Steuer- und Regelungstechnik (MSR) in Gebäuden funktioniert bisher zentral auf Basis von übergeordneten Parametern (Top-Down-Regelung) und ist insgesamt oft unbefriedigend hinsichtlich Funktionalität und Interaktion mit dem Nutzer. Wie bzw. inwieweit eine dezentrale Regelung technisch realisierbar ist und welches Verbesserungspotenzial diese mit sich bringen kann, ist ein zentraler Punkt innerhalb des Forschungsprojektes. Um das Potenzial einer dezentralen Regelung durch Verknüpfung einzelner MSR-Sensoren und -Aktoren von TGA, Fassade, Sonnenschutz u.a. hinreichend abzuschätzen, wurden dementsprechende Simulationsmodelle aufgebaut und anhand verschiedener Simulationsvarianten untersucht. Das Ergebnis der Simulationen zeigt hinsichtlich der Möglichkeiten der dezentralen Steuerung dabei ein erhebliches Potenzial. Neben den raumklimatischen Zusammenhängen steht der Entwurf einer entsprechend dezentralen Eingriffsmöglichkeit durch den Nutzer im weiteren Fokus der Entwicklung. Ziel ist es, ein mögliches Konzept für eine solche Bottom-Up-Regelung zu entwickeln, die einen spezifischeren und effizienteren Gebäudebetrieb prinzipiell ermöglicht sowie zugleich die Nutzerzufriedenheit zu verbessern vermag. Zu diesem Zweck wird eine prototypische Smartphone-Applikation entwickelt, welche eine direkte Vernetzung des Nutzers mit den zu regelnden Einheiten in ausreichendem Maße zulässt.

Das Forschungsprojekt umfasst folgende Arbeitspakete:

- Identifikation der dezentral zu regelnden Komponenten
- Funktionale Beschreibung der Verknüpfung der Komponenten
- Entwurf eines Konzeptes für den Ansatz einer dezentralen Regelung
- Prototypische Entwicklung eines dezentralen Regelungskonzeptes (Applikation)
- Simulationsbasierte Potenzialanalyse und Vergleich mit Top-Down-Regelung
- Dokumentation der Ergebnisse

Schlagworte: MSR, Nutzereingriff, Applikation, Potenzial, Bottom-Up, Simulation

Decentralized MCT

Design of a decentralized measurement and control technology concept for building services in the context of the Internet of Things

Abstract

The measurement and control technology in buildings usually works centrally based on superordinate parameters (Top-down-management) and is mostly unsatisfactory for the user in terms of functionality and interaction. Important points within the research project are how and to what extent such decentralized management is technically feasible and what potential for improvement is possible. In order to adequately estimate the potential of decentralized control by linking individual sensors and actuators of building services, façade, sunblind etc., corresponding simulation models are set up and examined with different simulation variants. The result of the simulations shows a considerable potential with regard to the possibilities of decentralized control. In addition to the climatic contexts, the design of a correspondingly decentralized intervention option by the user is another focus of the research project. The aim is to develop a possible concept for such a bottom-up control strategy, which in theory enables a more specific and efficient building operation. At the same time, user satisfaction should be improved. For this purpose, a prototypical smartphone application is developed, which allows a direct connection of the user and the controlled units of the building technology.

The research project comprises the following work packages:

- Identification of the decentralized controlled components
- Functional description of the connection of the components
- Draft of a possible concept for decentralized control
- Prototypical development of a decentralized intervention concept (application)
- Simulation-based potential analysis and comparison with Top-down-management
- Documentation of the results

Keywords: MCT, User intervention, Application, Potential, Bottom-up, Simulation

Inhaltsverzeichnis

1. EINLEITUNG 1

1.1 ZIEL DES FORSCHUNGSVORHABENS 2

1.2 FORSCHUNGSANSATZ 3

2. METHODIK 4

2.1 SCHWERPUNKTE 4

2.2 KOMPONENTEN 5

2.3 ARBEITSPAKETE 6

3. KONZEPT 7

3.1 ÜBERBLICK 7

3.2 KOMMUNIKATIONSPRINZIP 8

3.3 APPLIKATIONSKONZEPT 11

4. IMPLEMENTIERUNG 17

4.1 HARDWARETECHNISCHE ANFORDERUNG 17

4.2 NUTZERLOKALISIERUNG 18

4.2.1 W-LAN 18

4.2.2 GPS Tracking 19

4.2.3 Bluetooth 19

4.2.4 Manuelle Eingabe 20

4.3 KOMMUNIKATION 20

4.3.1 Multipeer Connectivity Interface 21

4.3.2 Core Bluetooth Central und Peripheral Interface 22

4.4 BACKEND SERVER 24

4.5 AUFBAU DER APPLIKATION 25

4.5.1 Climate Value Model 25

4.5.2 ViewControllers 26

4.5.3 External Communication 29

5. SIMULATION 31

5.1 STRUKTURELLER AUFBAU DER THERMISCHEN GEBÄUDESIMULATION 31

5.1.1 Demonstratorraum (Simulationsbereich) 32

5.1.2 Gebäudetechnik 35

5.1.3 Auswertung 38

5.2 SIMULATIONSVARIANTEN 41

5.2.1 Basisvariante: Zentral geregelte Top-Down-Gebäudesimulation 46

5.2.2 Einzelmaßnahmen zur Energieeinsparung 53

5.2.3 Variante 1: Dezentral gesteuert mit zentralem Kern 56

5.2.4 Variante 2: Dezentral ausschließlich vom Nutzer gesteuert 60

5.3 VERGLEICH UND INTERPRETATION DER VARIANTENERGEBNISSE 63

5.4 EINFLUSS DER KLIMAVERÄNDERUNG 67

6. ZUSAMMENFASSUNG 71

6.1 INTERPRETATION DER ERBGEBNISSE UND EMPFEHLUNGEN 71

6.2 FAZIT UND GRENZEN DES PROJEKTES 74

6.3 AUSBLICK 76

7. ABKÜRZUNGEN 83

8. ABBILDUNGS- UND TABELLENVERZEICHNIS 84

9. LITERATURVERZEICHNIS 90

10. ANHANG 93

1. Einleitung

Ein zentrales Element vieler Gebäude hinsichtlich Nutzerkomfort und Energieeffizienz ist die Mess-, Steuerungs- und Regelungstechnik (MSR). Im Zuge des aktuellen Trends der Smart-Home Bewegung im Gebäudesektor wird eine energieeffiziente Reglung der Gebäude und Anlagentechnik zunehmend auf Raumebene individuell durchgeführt. Die Hypothese dieses Forschungsvorhabens ist, dieses Energieeinsparungspotenzial durch eine dezentrale Regelung mittels direkter, d.h. dezentraler Vernetzung der gebäudetechnischen Komponenten unter Einbindung des Nutzers erschließen zu können. Durch die Tatsache, dass die Regelung der zentralen MSR meist auf Basis von übergeordneten Parametern und oft sogar nutzerunspezifisch erfolgt, ist diese konventionelle, auf überwiegend starren Regeln ("if ... then") basierte Regelung erfahrungsgemäß oft kompliziert, unflexibel und nicht in der Lage, die möglichen Energieeinsparpotenziale auszuschöpfen.

Eine große Herausforderung besteht darin, durch dem Stand der Technik entsprechenden Gebäudeautomation einen energie- und kosteneffizienten Betrieb von Gebäuden mit gleichzeitiger Gewährleistung eines hohen Nutzerkomforts zu generieren. Diese Problematik wird durch die wachsende Komplexität der zu regelnden Systeme in Gebäuden zusätzlich verschärft. Kern des Projektes stellt die Entwicklung von Strategien für eine dezentrale Regelung gebäudetechnischer Komponenten auf Basis des Internet of Things (IoT) dar.

1.1 Ziel des Forschungsvorhabens

Die Mess-, Steuer- und Regelungstechnik (MSR) in Gebäuden funktioniert bisher in den meisten Fällen zentral, d.h. auf Basis von übergeordneten Parametern (Top-Down-Regelung) und ist insgesamt hinsichtlich Funktionalität und Interaktion mit dem Nutzer häufig unbefriedigend. Die Prinzipien, wie auch das Konzept des Internet of Things (IoT), bilden ein Potenzial für eine dezentrale Regelung durch die dynamische Verknüpfung der einzelnen MSR-Sensoren und -Aktoren in der technischen Gebäudeausrüstung (TGA), Fassade, Sonnenschutz etc. und dem Nutzer über eine direkte Vernetzung (z.B. Internet). So entsteht ein Bottom-Up-Ansatz, der eine spezifischere und effizientere Gebäuderegelung ermöglicht. Dieses Forschungsprojekt versucht zu zeigen, dass einerseits ein erhöhter Nutzerkomfort und andererseits ein reduziert Energieverbrauch durch eine dezentrale Steuerung zu erreichen ist.

Das Ziel des Forschungsprojektes besteht darin, auf konzeptioneller Ebene zu untersuchen, wie und inwieweit eine solche dezentrale Regelung technisch realisierbar ist und welches Verbesserungspotenzial sie mit sich bringen kann. Ist es möglich, durch solch einen Ansatz auf zentrale logische Einheiten vollständig zu verzichten und wie werden dann zentrale Versorgungseinrichtungen angesteuert und geregelt? Der Fokus liegt hierbei neben der Untersuchung der raumklimatischen Zusammenhänge zudem in der Entwicklung einer prototypischen Applikation zur Steuerung relevanter klimatischer Aspekte.

Die Konzeptionierung einer dezentralen MSR sowie diese mit einer Top-Down-Regelung auf Nutzbarkeit (Nutzerkomfort) und Effizienz (Energieeinsparung) zunächst mittels eines simulationsbasierten Ansatzes zu vergleichen und anschließend die Applikation in einem Musterraum (Bürogebäude) zu integrieren sind zentrale Herausforderungen des Forschungsprojektes. Darüber hinaus liegt neben den rein klimatischen Aspekten auf Seiten der Nutzbarkeit ein weiterer Schwerpunkt in einer vom Nutzer ausgehenden, „human-centered“ Form der Bedienbarkeit und Steuerung (Nutzer-Interface). Entsprechende Ansätze müssen hierbei unter Betrachtung der raumklimatischen Fragestellungen konzipiert und implementiert werden.

1.2 Forschungsansatz

Das Forschungsvorhaben bildet einen innovativen Ansatz von der Top-Down- hin zur Bottom-Up-Betrachtung der Gebäuderegelung. Durch die Vernetzung von lokalen Informationen aus Messsensoren und Aktoren mittels dezentral basierten Eingriffen und die Einbindung verschiedener Nutzer kann die Regelung dynamisch und lokal zoniert reagieren. Damit sind eine substanzielle Verbesserung der Nutzerzufriedenheit und eine Reduktion des verbundenen Energieverbrauchs zu erwarten.

Die Ergebnisse aus dem Forschungsvorhaben sollen zeigen, inwieweit bzw. unter welchen Voraussetzungen eine dezentrale, IoT-basierte MSR-Technik funktionieren kann, welche Herausforderungen damit verbunden sind, welche Fortschritte hinsichtlich Nutzerkomfort und welche Energieeinsparung erreicht werden können. Daraus soll grundsätzlich eine dezentrale Anwendung hinsichtlich der MSR-Technik abgeleitet werden können.

2. Methodik

Um das konzeptionelle Prinzip einer dezentralen Bottom-Up-Regelung evaluieren und mit einer dezentralen Top-Down Steuerung vergleichen zu können werden im Rahmen dieses Projektes unterschiedliche Ansätze gewählt. Zur Abschätzung des Potenzials einer dezentralen Steuerung wird eine dynamische Gebäudesimulation mit unterschiedlichen Regelungsstrategien aufgesetzt. Der Zugriff auf die jeweiligen Komponenten erfolgt über eine zu entwickelnde auf iOS-basierte Applikation, um auf theoretischer Ebene eine dezentrale Steuerung zu erzeugen. Abschließend sollen die Überlegungen in der Praxis getestet werden und die Applikation in einem realen Testraum zum Einsatz kommen.

2.1 Schwerpunkte

Der Forschungsansatz gliedert sich in folgende drei Bearbeitungsphasen:

- Konzeptentwicklung
- Implementierung (Umsetzung der Konzeptentwicklung in eine Applikation)
- Simulation

Die Konzeptphase beinhaltet die Definition der einzubeziehenden Umgebungsparameter (Temperatur, Luftgeschwindigkeit, Beleuchtungsstärke etc.), Komponenten (TGA-Anlagen etc.) sowie Nutzer-bezogene Parameter und deren Interaktion. Dies findet auf lokaler Ebene statt, d.h. dezentral zoniert (z.B. Gruppenarbeitsplatz-spezifisch), im Gegenteil zur konventionellen MSR-Technik. Die daraus zu entwickelnde Methodik soll theoretisch und empirisch erarbeitet werden.

Um die Praktikabilität zu erproben wird für einen Demonstratorraum die Methodik umgesetzt und getestet. Hierbei werden die Prinzipien der dezentralen Regelung anhand einer Smartphone-Applikation für den Nutzer anwendbar. Durch die Nutzung der App durch jeden einzelnen Mitarbeiter kann eine dezentrale Steuerung implementiert und analysiert werden.

Anschließend wird das erarbeitete Konzept dynamisch simuliert und mit einer konventionellen Top-Down Regelung verglichen, um die Auswirkungen auf Komfort und Energieeffizienz zu ermitteln. Mittels unterschiedlicher Szenarien (Nutzungsszenarien als auch konventionelle Regelungsszenarien) wird die Robustheit hinsichtlich Aufenthaltsqualität und Energieeffizienz zwischen dezentralen und zentralen Ansätzen verglichen.

2.2 Komponenten

Folgende zu regelnde Komponenten sind innerhalb des Forschungsprojektes zu definieren:

- Auswahl Datenlogger
- Definition der logischen Einheit (Smartphone?)
- Definition und Erarbeitung eines Mensch-Maschine-Interfaces
- Entwicklung und Implementierung einer Regelungsstrategie (Regelungsalgorithmus)
- Zonendefinition im Demonstratorraum (Testraum)
- Dynamische Simulation mit TRNSYS (Simulationsvarianten)

2.3 Arbeitspakete

Es bestehen folgende Arbeitspakete innerhalb des Forschungsprojekts:

- AP1: Identifikation der dezentral zu regelnden Komponenten
- AP2: Funktionale Beschreibung der Verknüpfung der Komponenten
- AP3: Entwurf eines Konzeptes für den Ansatz einer dezentralen Regelung (Regelungsstrategie)
- AP4: Implementierung der dezentralen Regelung in eine zu entwickelnde prototypische Smartphone-Applikation
- AP5: Simulationsbasierte Potenzialanalyse und Vergleich mit Top-Down-Regelung

3. Konzept

Das grundsätzliche Prinzip, eine dezentrale Steuerung der Gebäudetechnik in einen Raum zu integrieren macht sich die Tatsache zu Nutze, dass heutzutage nahezu jeder Nutzer über ein Smartphone verfügt. Durch eine individuell zu bedienende Applikation wird es dem Anwender ermöglicht, variable Faktoren im Raum zu steuern und an seine individuellen Behaglichkeitsanforderungen anzupassen. Da sich die Einflussnahme der dezentralen Einheiten in Zonen aufteilt, wird hierbei ein besonderes Augenmerk auf die Interaktion zwischen mehreren Nutzern in einem Raum gelegt.

3.1 Überblick

Im Verlauf dieses Projekts ist es für den Nutzer grundsätzlich möglich, durch die Bedienung seines Smartphones in seiner Aufenthaltszone den Sonnenschutz, die künstliche Beleuchtung im Raum, die Radiatoren und die Lüftungsanlage zu steuern und somit an seine persönlichen Komfortwünsche anzupassen. Zudem soll die Applikation dem Nutzer Feedback über den aktuellen Zustand im Raum geben und den Nutzer über die Steuerung der einzelnen Komponenten informieren. Das Smartphone stellt demnach metaphorisch den Vermittler zwischen dem Nutzer und der Gebäudetechnik dar. Dies führt weiter dazu, dass die App dem Nutzer Informationen über ein Fehlverhalten oder einen nicht realisierbaren Zustand bereitstellen soll. So kann die Applikation beispielsweiße darüber informieren, dass der Sonnenschutz in einer bestimmten Situation nicht aktiviert werden kann, da die Windgeschwindigkeit zu hoch ist. Diese Rückmeldung soll beim Nutzer durch mehr Verständnis für die Steuerung der Gebäudetechnik zu einer höheren Akzeptanz im Umgang mit der Gebäudetechnik führen.

3.2 Kommunikationsprinzip

Im Bereich des IoT gibt es prinzipiell mehrere Möglichkeiten, wie bzw. mit welchem Kommunikationsprotokoll der Datenaustausch zwischen den einzelnen Gerätschaften umgesetzt werden kann.

Die wichtigsten Kommunikationsprotokolle in diesem Bereich sind:

- Hypertext Transfer Protocol (HTTP)
- CoAP (Constrained Application Protocol)
- XMPP (Extensible Messaging and Presence Protocol)
- MQTT (Message Queue Telemetry Transport)

Je nach Vorhaben und hardwaretechnischen Gegebenheiten muss abgewogen werden, welches Kommunikationsprotokoll am sinnvollsten erscheint. Die wichtigsten Vor- und Nachteile der einzelnen Kommunikationsprotokolle sind in Tabelle 3.1, S. 9 zusammengefasst. Die Kommunikation der Applikation zum größten Teil über MQTT zu implementieren, basiert auf folgenden Vorteilen.

MQTT ist äußerst effizient und kommuniziert ergebnisorientiert, d.h. das dienstanfordernde Gerät (Client) muss nicht kontinuierlich Anfragen an einen Server stellen. Dieses Kommunikationssystem wird vor allem auch im Bereich des „*Internet of Things*“ verwendet, da es wenig CPU-Leistung der Geräte beansprucht und somit effizient eine große Anzahl an Sensoren in diesem Bereich ausgelesen werden können [1].

Tabelle 3.1 Vor- und Nachteile verschiedener Kommunikationsprotokolle im Bereich des IoT (nach [2])

Kommunikations-protokoll	Vorteile	Nachteile
HTTP	Bibliotheken für fast alle Programmiersprachen vorhanden Einfach zu erlernen	Viel Protokolloverhead Keine Server-Push-Kommunikation nativ möglich Keine Möglichkeit, 1/N-Kommunikation abzubilden
CoAP	Sehr effizient Leichter Umstieg von HTTP auf CoAP möglich	Herausforderungen bei der Network Address Translation (NAT) durch UDP Wenig Client- und Server-Implementierungen im Vergleich zu den anderen Protokollen
XMPP	Clients sind in vielen Programmiersprachen verfügbar Sehr viele Features, viele davon sind für Instant Messenger-Anwendungsfälle optimiert	Hoher Protokolloverhead durch XMPP Hohe Fragmentierung bei den Server- und Client-Features
MQTT	Extrem effizient Minimaler Protokolloverhead Hochskalierbar bis zu mehreren hunderttausenden Clients pro Server Viele Protokollfeatures die speziell für IoT-Anwendungsfälle entwickelt wurden Für ressourcenbeschränke Geräte geeignet Clientimplementierungen sind für alle gängigen Programmiersprachen verfügbar	Reine Request/Response-Architekturen sind mit MQTT nur mit zusätzlichem Aufwand umsetzbar

Generell interagiert der Nutzer mit Hilfe eines Smartphones, welches via W-LAN mit einer Datenbank verbunden ist, in die jene vom Nutzer gewünschten Einstellungen abgelegt werden. Über weitere Schnittstellen ist diese mit der Gebäudetechnik verbunden, die schließlich die gewünschten Steuerbefehle vollzieht und die jeweiligen dezentralen Komponenten ansteuert. Die Kommunikation zwischen den Devices und der Datenbank erfolgt dabei über einen sogenannten „Broker“. Mithilfe des MQTT-Protokolls (Message Queue Telemetry Transport) werden Daten und Befehle zwischen den unterschiedlichen Gräten ausgetauscht. Beispielsweise sendet ein Nutzer mithilfe eines Smart-Device, welches über W-LAN mit dem Intranet verbunden ist, ein Kontrollsignal. Dieses wiederum wird via eines Mosquito-MQTT-Brokers an die Datenbank weitergeleitet.

Weiterhin werden Informationen über die aktuelle Situation im Raum (z.B. aktuelle IST-Temperatur) an das Smartphone des Nutzers zurück übertragen. Das Konzept der Kommunikation ist in der nachfolgenden Abbildung 3.1 dargestellt.

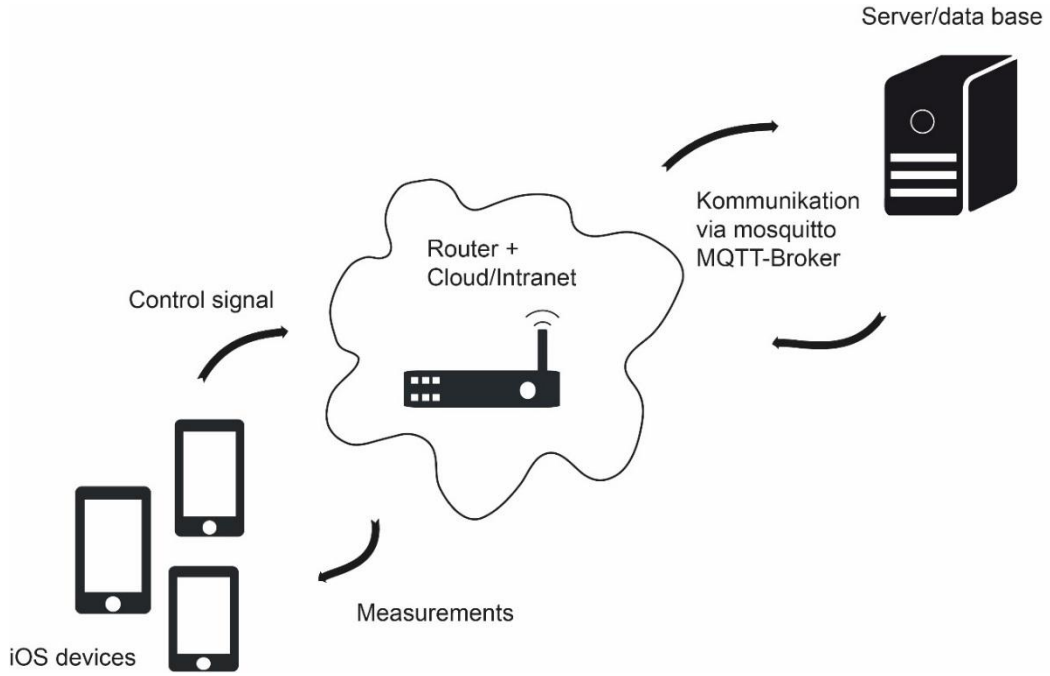


Abbildung 3.1 Konzept der Kommunikation zwischen Smartphones/Nutzer und Server/Datenbank

3.3 Applikationskonzept

Grundsätzlich wird der Zugriff auf die Steuerung der dezentralen Gebäudetechnik über eine Applikation geregelt. Das allgemeine Funktionsschema der Applikation ist in Abbildung 3.5, S. 16 dargestellt.

Authentifizierung

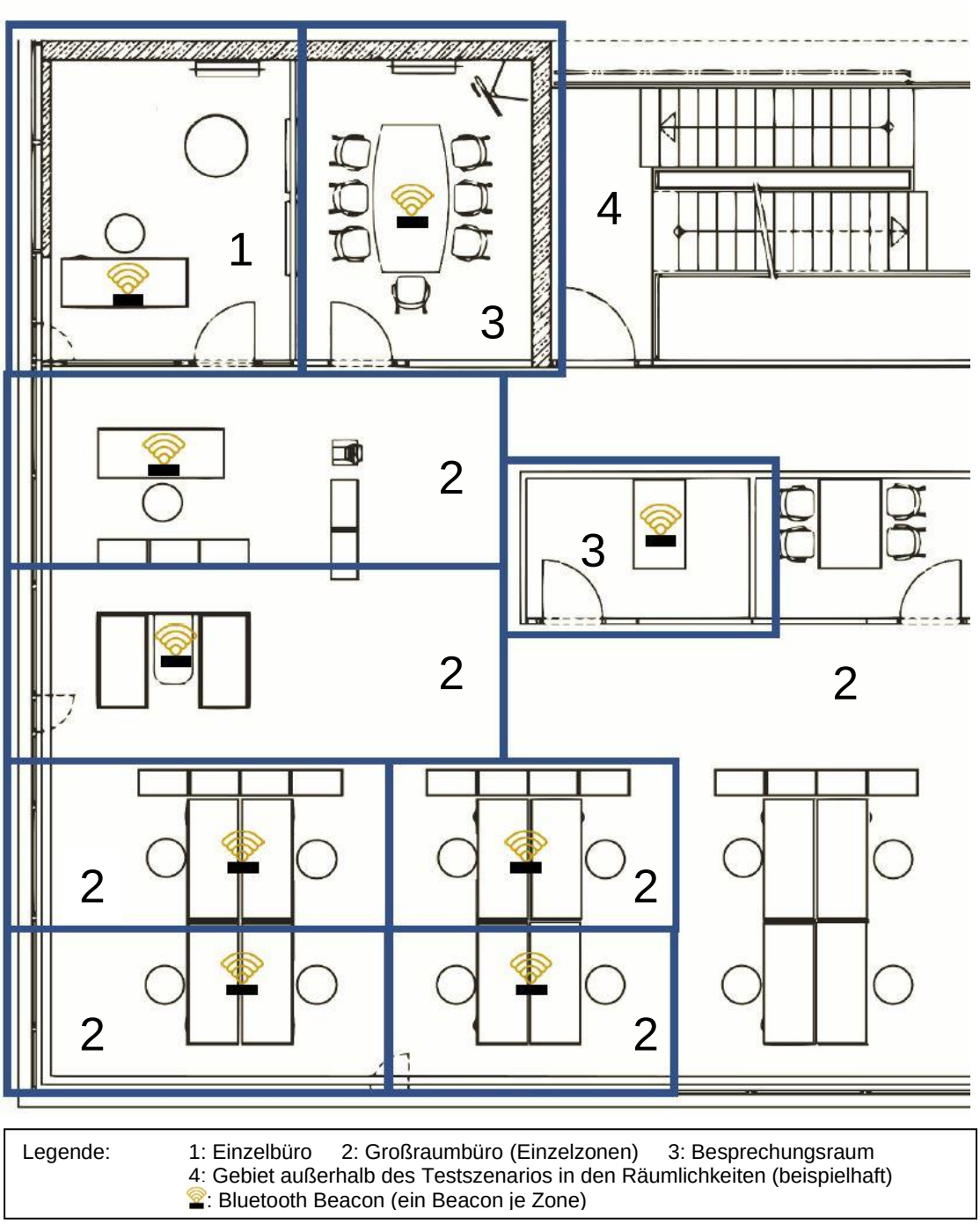
Nach dem Eintreffen eines Nutzers im Gebäude überprüft die Applikation zuerst, ob dieser bzw. dessen Smartphone mit dem Netzwerk (W-LAN) verbunden ist, dieser sich in das Intranet eingeloggt hat und ob bereits ein Nutzerprofil vorhanden ist. Ist dies nicht der Fall wird dem Nutzer angeboten ein Profil zu erstellen und sich zu registrieren, da sonst keine individuelle Steuerung der Gebäudetechnik möglich ist.

Lokalisierung (Zonenzuordnung)

Nach Einwahl in das Netzwerk und erfolgtem Einloggen in die Applikation wird ein automatischer Standortabgleich des Smartphones innerhalb der Räumlichkeiten durchgeführt. Je nach Detailgrad der (nachgerüsteten) dezentralen Steuerelemente (z.B. Luftauslässe, u.a.) können die Räumlichkeiten in unterschiedliche Zonen eingeteilt werden.

Um innerhalb geschlossener Räume einzelne Zonen definieren zu können und diese auch digital zugänglich zu machen, werden je Zone sogenannte Funkbaken auf Basis des Bluetooth-Standards (engl. Bluetooth Beacons) eingebracht [3] (Abbildung 3.3, S. 13). Dieser Industriestandard erlaubt es per Funktechnik über kurze Distanz eine Datenübertragung zwischen einzelnen Geräten aufzubauen [4]. Konkret bedeutet dies, innerhalb jeder Zone wird an einem ortsfesten Referenzpunkt ein entsprechender Beacon angebracht und in das System integriert. Durch die Vernetzung mehrerer Referenzpunkte ist es möglich anhand des Laterationsverfahrens den Standort eines bewegten Objektes (hier: Smartphone) zu lokalisieren und eine automatische Innenraumverortung umzusetzen [5], [6].

Abbildung 3.2 zeigt beispielhaft die Einteilung der zugewiesenen Einzelzonen in den Testräumlichkeiten.



Legende: 1: Einzelbüro 2: Großraumbüro (Einzelzonen) 3: Besprechungsraum
4: Gebiet außerhalb des Testszenarios in den Räumlichkeiten (beispielhaft)
: Bluetooth Beacon (ein Beacon je Zone)

Abbildung 3.2 Unterteilung der Räumlichkeiten in Einzelzonen (schematische Darstellung) hinsichtlich dezentraler Einflussmöglichkeiten innerhalb des Demonstratorraumes (Bildausschnitt aus Anhang A, Abbildung A.1, S. 93)

Abbildung 3.3 Beispiel eines Bluetooth Beacons (nach [7]), links: Umhüllung, rechts: Innenleben

Betriebsmodus

Der nächste Schritt umfasst die Zuweisung des Betriebsmodus. Hierbei ist prinzipiell zwischen zwei unterschiedlichen Szenarien zu differenzieren (Abbildung 3.4, S. 15):

- **Single-Modus (Szenario 1)**: Befindet sich der Nutzer in einem Raum in der er sich alleine aufhält, wird der „Single-Modus“ zugewiesen (persönliche Präferenzwerte bzw. Einstellungen werden geladen).

- **Multi-Modus (Szenario 2):** Befindet sich in einem Raum des Nutzers zusätzlich eine andere Person oder kommt neu hinzu, wird der „Multi-Modus“ zugewiesen (persönliche Präferenzen wandeln sich zu entsprechend gewichteten Kompromisswerten je nach Aufenthaltszone des jeweiligen Nutzers).

Grad der Einflussnahme

Entsprechend der zwei Szenarien stehen dem Nutzer unterschiedliche Möglichkeiten für die Steuerung der Gebäudetechnik zur Verfügung. Befindet sich der Nutzer im „Single-Modus“, kann er alleine über die Steuerung der Gebäudetechnik verfügen und die Bedingungen an seine individuell persönlichen Behaglichkeitsanforderungen anpassen. Wird der Raum (Zone) vom Nutzer verlassen, schaltet das System auf einen vordefinierten Grundzustand (Defaultwerte).

Im „Multi-Modus“ ist es für den einzelnen Nutzer nicht mehr gänzlich möglich seine individuellen Einstellungen alleine festzulegen. Das bedeutet die Applikation übernimmt von jedem Nutzer innerhalb einer gemeinsamen Räumlichkeit (Zone) die individuellen Einstellungen und ermittelt einen gewichteten Kompromisswert je Aufenthaltszone, welcher an die Gebäudetechnik weitergegeben wird. Möchte beispielsweise ein Nutzer eine Änderung vornehmen, werden die anderen Nutzer darüber in Kenntnis gesetzt und die Einstellungen automatisch vom Algorithmus angepasst. Kommen ein oder mehrere neue Nutzer in demselben Raum (Zone) hinzu und möchten ihre jeweiligen Wünsche in der entstandenen Gruppe einbringen, ermittelt die Applikation einen entsprechend neuen Mittelwert je Aufenthaltszone und übermittelt diesen wiederum weiter an das System. Beim Verlassen des Raumes (Zone) durch einzelne Nutzer läuft diese Vorgehensweise dementsprechend in umgekehrter Reihenfolge ab. Nach der Abmeldung des vorletzten Nutzers fällt der Betriebsmodus zurück auf den „Single-Modus“ und der verbliebene Nutzer erlangt wieder volle Kontrolle über die entsprechende Zone. Verlässt auch dieser den entsprechenden Raum (Zone) schaltet das System auf einen vordefinierten Grundzustand (Defaultwerte). Prinzipiell unterliegt die Anzahl der Nutzer keiner Limitation.

Abbildung 3.4 stellt beispielhaft die unterschiedlichen Betriebsmodi innerhalb der zugewiesenen Einzelzonen in den Testräumlichkeiten dar.

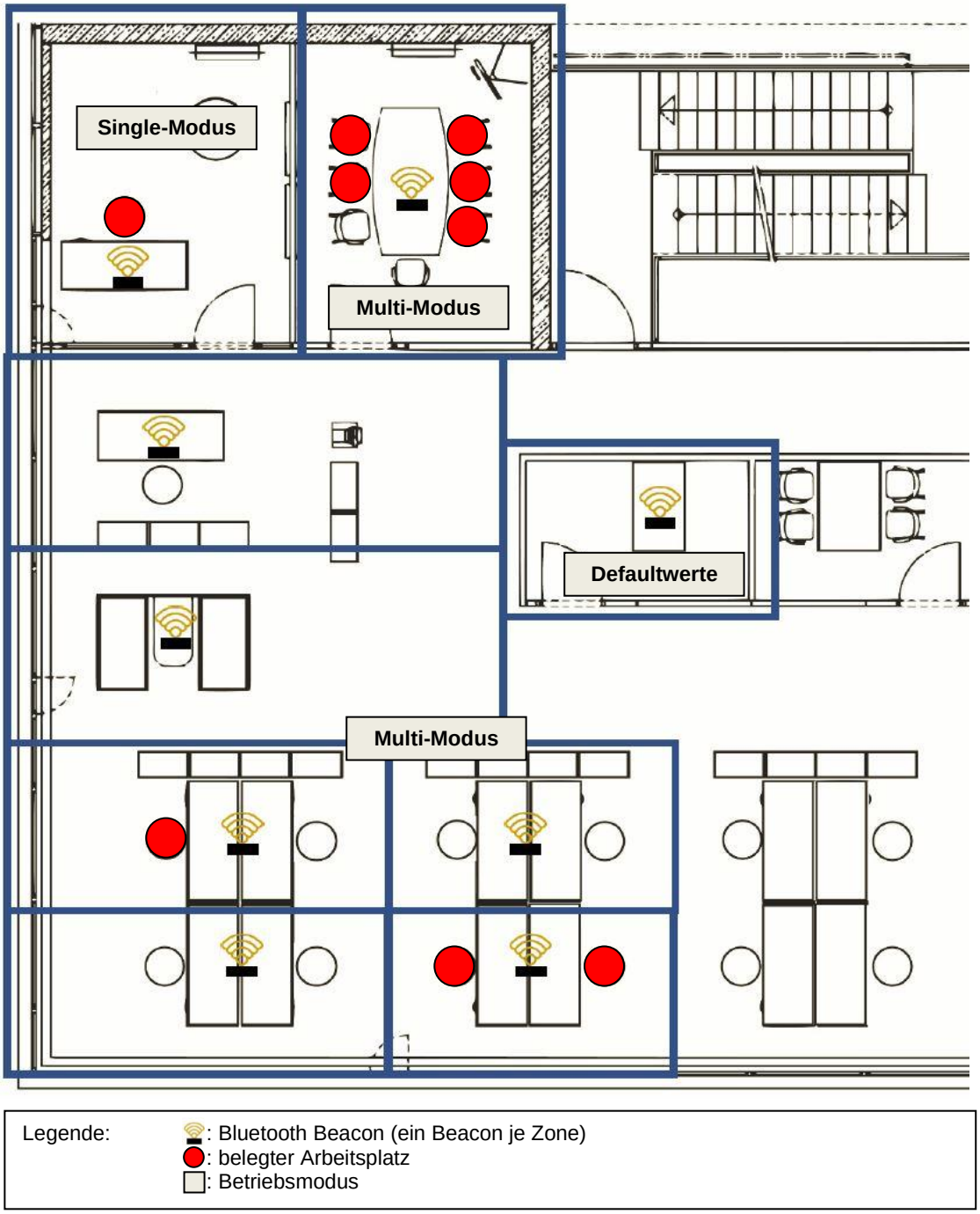


Abbildung 3.4 Beispielhafte, aufgrund des Belegungsplanes, durch die Applikation zugewiesene Betriebsmodi (schematische Darstellung) innerhalb des Demonstratorraumes (Bildausschnitt aus Anhang A, Abbildung A.1, S. 93)

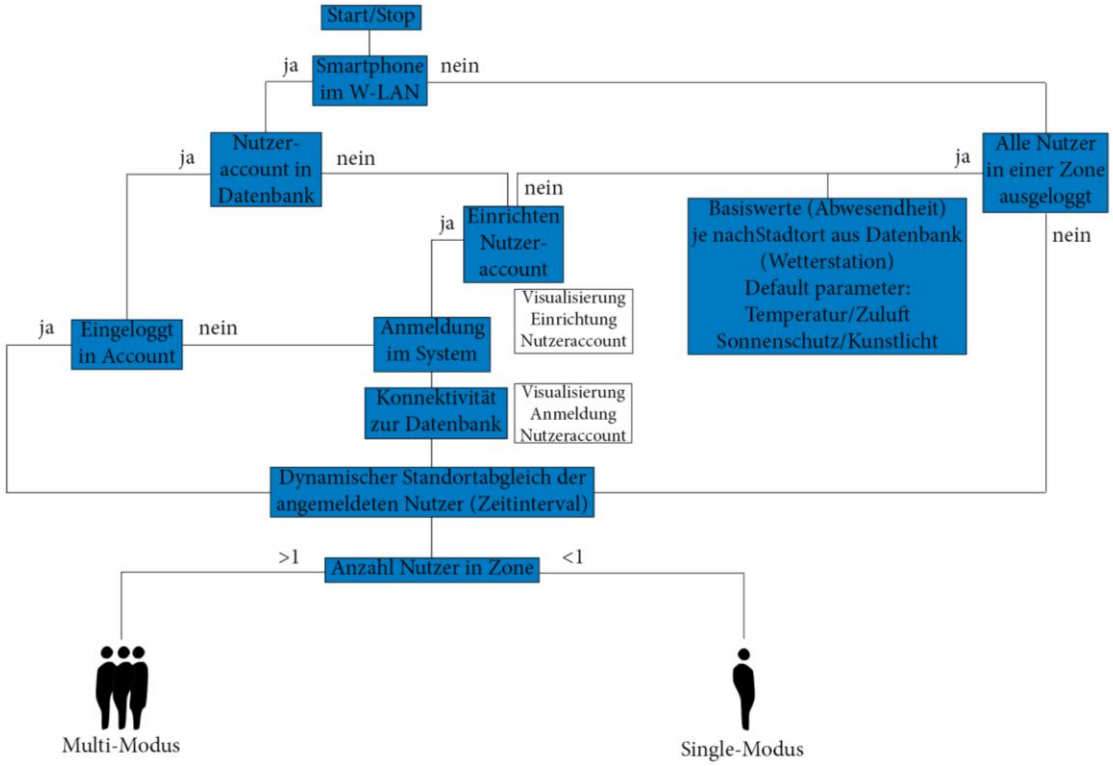


Abbildung 3.5 Allgemeines Ablaufschema (Funktionsschema) der Entscheidungsprozesse der Applikation (Flow-Chart)

Ausblick (Updates)

In zukünftigen Schritten ist zu eruieren, welche Struktur zur Definition der Erläuterung der geteilten Nutzerprofile zu Grunde liegt. Hierbei sollte unter anderem der Fokus darauf liegen, welche Nutzer inwieweit Entscheidungsrechte haben und wovon das gemeinsame Nutzerprofil abhängt. Weiterhin soll erarbeitet werden, welcher vergangene Zeitraum maßgebend für ein gemeinsames Profil ist und somit für die gemeinsame Nutzung des Raums entscheidend ist. Hierbei stellt sich die Frage, in welchem zeitlichen Intervall sich die Nutzerprofile aktualisieren. In einem weiteren Schritt soll zudem herausgearbeitet werden, in welchem Maße der Nutzer Einflussmöglichkeiten auf die Steuerung der einzelnen Kategorien der Gebäudetechnik hat und in welcher Form der Nutzer Feedback von der Datenbank erhält, um eine höhere Nutzerzufriedenheit zu generieren.

4. Implementierung

Ausgehend von dem aufgezeigten Konzeptansatz erfolgt im Rahmen des Projekts eine prototypische Implementierung im Sinne des „Proof of Concept“. Der Fokus liegt hierbei auf der Integration der dezentralen Interaktion zwischen den Nutzern und den implementierten Gebäudetechnikkomponenten. Zur Umsetzung des Prototyps wurden aufgrund der Vielzahl an verfügbaren Geräten für die Kommunikation, Lokalisierung und Datenspeicherung, eine Reihe von Einschränkungen vorgenommen. Die beiden Schwerpunkte der Implementierung liegen auf der Lokalisierung des Nutzers im Gebäude und wie dieser seine persönlichen Behaglichkeitsanforderungen kommuniziert, um einen möglichst maximalen Kompromiss mit anderen Nutzern in derselben Zone zu erreichen.

4.1 Hardwaretechnische Anforderung

Als Basis der Implementierung wurde das Betriebssystem iOS [8] mit zugehörigen Apple-Smartphones gewählt. Grundlage für die prototypische Softwarelösung bildet die Programmiersprache Swift [9], die im Rahmen des Betriebssystems iOS verwendet wird. Sie bietet eine stabile und einfache Lösung, um die verschiedenen Tracking- und Kommunikationsansätze zu untersuchen. Damit die Software in der Praxis genutzt und sie in einer Vielzahl von unterschiedlichen Gebäudetypen angewendet werden kann, wird ein externer Server benötigt. Zur Minimierung der Abhängigkeit wird der Server nur als Datenbank verwendet. Somit werden die unterschiedlichen Nachführ- und Klimageräte den individuellen Zonen im Gebäude zugewiesen und die jeweiligen Ausgangswerte gespeichert. Eine weitere Funktion des Servers ist die Weiterleitung der Kontrollbefehle der Nutzer an die betroffenen Übergabesysteme.

4.2 Nutzerlokalisierung

Für die Lokalisierung des Nutzers im Raum bestehen folgende Möglichkeiten:

- W-LAN Signal
- GPS-Tracking
- Bluetooth-Signal
- Manuelle Eingabe

Die Optionen besitzen unterschiedliche Vor- und Nachteile und werden im Folgenden näher erläutert.

4.2.1 W-LAN

Eine W-LAN-Lösung verwendet das Netzwerk mehr Im Sinne eines „Access Points“ (Zugangspunkt). Durch das Senden eines individuellen Signals ist eine Approximation der Position möglich. Diese Art der Lokalisierung macht sich die Information zunutze, dass ein Smartphone eines Anwenders immer mit einem individuellen Router verbunden ist. (Tabelle 4.1)

Tabelle 4.1 Vor- und Nachteile der Lokalisierung mit W-LAN

Vorteile	Nachteile
Anwender nutzen bereits das implementierte Netzwerk	Zugriff auf Access Point-Informationen kann strikt geregelt sein Ein Access Point kann für mehrere Räume zuständig sein

4.2.2 GPS Tracking

Nahezu jedes aktuelle Smartphone verfügt über eine GPS-Tracking-Funktion, die es ermöglicht, genaue Informationen über den Breiten- und Längengrad der Position des Smartphones zu erhalten. Diese Funktion dient der Lokalisation des Anwenders. (Tabelle 4.2)

Tabelle 4.2 Vor- und Nachteile der Lokalisierung mit GPS

Vorteile	Nachteile
Vorhanden in modernen Smartphones	Genauigkeit abhängig von der Umgebung (Außenraum vs. Untergeschoss)
Umsetzung erfolgt durch iOS integrierte Funktion	Koordinaten der Räume und Klimageräte notwendig
	Information über die absolute Höhe notwendig (für Gebäude mit mehreren Stockwerken)

4.2.3 Bluetooth

Die Lokalisierung mittels Bluetooth-Signal kann durch den Einsatz von sogenannten "Bluetooth Beacons" realisiert werden. Diese Geräte senden konstant ein energiesparendes Bluetooth-Signal aus. Eine Position kann entweder durch Trilateration, (Smartphone empfängt mindestens drei Bluetooth-Signale) oder auf Basis der Signalstärke der verschiedenen „Beacons“ ermittelt werden. Bei der Trilateration handelt es sich um ein Messverfahren zur Positionsbestimmung eines Punktes. Während die Triangulation auf der Vermessung dreier Winkel basiert, beruht die Trilateration auf dem Prinzip der Entfernungsmessung zu drei Festpunkten (Tabelle 4.3).

Tabelle 4.3 Vor- und Nachteile der Lokalisierung mit Bluetooth

Vorteile	Nachteile
Kostengünstige und kompakte Geräte	Lokalisierung stark abhängig von Position der „Beacons“ (Verdeckung, jede Zone ein Gerät, usw.)
iBeacon Standard von Apple [10]	Nutzerbewegung

4.2.4 Manuelle Eingabe

Der Benutzer kann über ein Menü auswählen, in welchem Raum er sich aktuell befindet. Dies kann die Software bei der Lokalisierung des Nutzers unterstützen. (Tabelle 4.4)

Tabelle 4.4 Vor- und Nachteile der Lokalisierung mit Bluetooth

Vorteile	Nachteile
Einfach umsetzbar durch GUI	Fehlverhalten Nutzer Aufwendig für Nutzer Bei mehreren Gebäuden Möglichkeit von mehreren gleichen Räumen

Anhand dieser Untersuchungen wird für die Entwicklung der Anwendung (Applikation) der Bluetooth-Lokalisierungsansatz gewählt. Da das „iOS-Framework“ ohnehin die Lokalisierung mittels Bluetooth enthält, wird der "Nearest Neighbour"-Ansatz verwendet, um den Benutzer einer Zone (hier: ein Beacon entspricht einer Zone) zuzuordnen.

4.3 Kommunikation

Das verwendete Kommunikationsschema basiert auf einer hybriden, dezentralen Peer-to-Peer-Verbindung (P2P). Das Hauptziel dabei ist es, die Abhängigkeit von externen Servern zu reduzieren. Die Applikation auf dem Kommunikationsgerät eines Benutzers ist in der Lage, unterschiedliche Präferenzen anderen Benutzern im selben Raum (Zone) zu senden und eine optimale Lösung für die Gebäudetechnikkomponente im Raum (Zone) zu berechnen. Die Rolle des Servers im geplanten System besteht darin, Operationen sowie das Datenmanagement durchzuführen, da dies für ein mobiles Gerät zu aufwendig wäre (Speicherung der Zugehörigkeit der Übergabesysteme zu einer Zone, spezifische Kommunikationsschemata für die verschiedenen Klimageräte usw.) (Abbildung 4.1, S. 21).

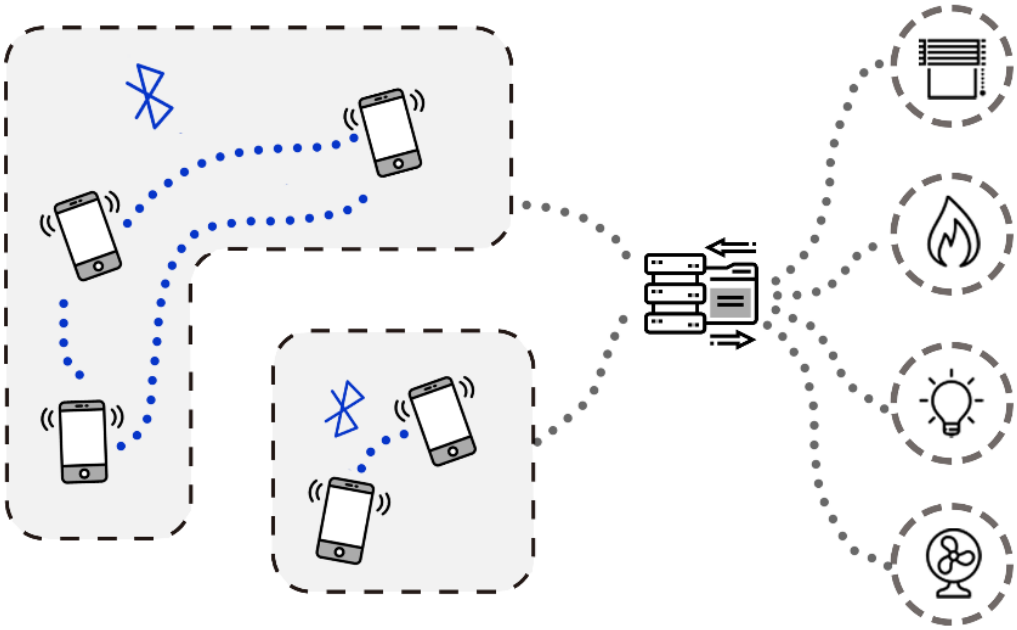


Abbildung 4.1 Schema des Kommunikationsablaufs

Im Rahmen des Forschungsprojektes wurden zwei Lösungsansätze untersucht:

- Multipeer Connectivity Interface
- Core Bluetooth Central and Peripheral Interface

4.3.1 Multipeer Connectivity Interface

Die technische Umsetzung des P2P-Programmierungsteils des Kommunikationsschemas erfolgt über ein "Multipeer Connectivity Interface". Dieses kann einen sog. "Service" erzeugen, welcher auf einem Netzwerk läuft, mit dem die Geräte verbunden sind. Andere Applikationen, die an dasselbe Netzwerk angeschlossen sind, können sich mit diesem „Service“ verbinden und Informationen austauschen. Der Datenaustausch ist dabei eventbasiert und wird durch das Senden von kurzen Nachrichten zwischen den Benutzern realisiert.

Diese Nachrichten bestehen aus drei Komponenten:

- **Funktionsnamen**: Beschreibt wie der Rest der Nachricht zu interpretieren ist, z.B. "Temperature" kommuniziert, dass der Benutzer, der die Nachricht sendet, seine Präferenz für die Raumtemperatur geändert hat
- **Wert:** Eine Fließkommazahl, eine Ganzzahl oder ein boolescher Wert
- **Zeitstempel:** Zeitpunkt der Erzeugung der Nachricht

Ändert ein Benutzer seine persönliche Präferenz für einen eingestellten Wert, kommuniziert das Gerät die Änderung direkt an alle anderen Geräte in derselben Zone. Gleichzeitig berechnet die Applikation den neuen, optimalen Kompromisswert für diese getätigte Einstellung für alle betroffenen Teilnehmer in der Zone und sendet ihn an den Server, wo er an die entsprechenden Übergabesysteme weitergeleitet wird. Um diesen Prozess zu vereinfachen wurde eine verallgemeinerte Schnittstelle für die verschiedenen Kategorien implementiert. Diese Schnittstelle ermöglicht ein einfaches Hinzufügen unterschiedlicher Gerätetypen, welche über verschiedene Arten von steuerbaren Werten verfügen können (Dezimalwerte für Temperatur, Binärwerte für Licht usw.).

Bereits in der ersten Testphase wurde eine Problematik in Bezug auf das „Multipeer Connectivity Interface“ eruiert. Aufgrund von Einschränkungen des Betriebssystems von Apple-Geräten werden einige Services abgebrochen, wenn die Anwendung, die sie verwendet, in den Hintergrund tritt [11]. Der „Bonjour Service“ allerdings, auf welchem das „Multipeer Connectivity Interface“ aufbaut, ist einer der wenigen Services, die im Hintergrundmodus unterstützt werden [12]. Alle potenziellen weiteren Lösungen, die diese Schnittstelle nutzen, müssten diese Einschränkung umgehen. Dies würde die Batterie des Gerätes stark belasten oder andere Anwendungen daran hindern, zu funktionieren. Aufgrund dieser Einschränkung wurde diese Funktion nicht berücksichtigt.

4.3.2 Core Bluetooth Central und Peripheral Interface

Eine Alternative bieten “Core Bluetooth Central” und “Core Bluetooth Peripheral” Interfaces. Da die Applikation Bluetooth für die Lokalisierung verwendet, musste der Benut-

zer die Bluetooth-Komponente seines Endgerätes bereits aktivieren. Die beiden unterstützten Hintergrund-Services dafür sind das "Uses Bluetooth LE accessories" und das "Acts as a Bluetooth LE accessory". Der Kommunikationsprozess bleibt gleich, wird aber wie folgt auf die beiden Schnittstellen aufgeteilt:

Core Bluetooth Peripheral Interface

Das Interface ermöglicht Services auf der Bluetooth-Komponente zu veröffentlichen und verwendet den Hintergrund-Service "Acts as a Bluetooth LE accessory". Wenn ein anderes Gerät die von der Anwendung angebotenen Dienste ortet, kann es diese abonnieren. Diese Schnittstelle wird verwendet, um Updates zu versenden, wenn der Benutzer Änderungen an seinen persönlichen Präferenzen vornimmt oder sich sein Standort ändert.

Core Bluetooth Central Interface

Die Schnittstelle ermöglicht es nach Geräten zu suchen und sie zu orten, die Services über Bluetooth verwenden. Dabei wird der Hintergrund-Service "Uses Bluetooth LE accessories" benutzt. Wenn die georteten Services für die Anwendung von Relevanz sind, kann das „Core Bluetooth Central Interface“ sie abonnieren und Updates von ihnen erhalten.

4.4 Backend Server

Die Rolle des Backend Servers besteht darin, alle von der Anwendung für ihre Lokalisierungs- und Kommunikationskomponenten benötigten Overhead-Informationen zu speichern und den aktuellen Wert aller verfügbaren Sensoren zu ermitteln. Basierend auf diesen Anforderungen kann der Backend Server in zwei Arten von Komponenten, einer dynamischen und einer statischen Komponente, unterteilt werden.

Die dynamische Komponente speichert dabei den aktuellen Wert jedes verfügbaren Sensors. Der statische Teil hingegen enthält die Zuordnung zwischen jedem Sensor für jede Zone und die Gewichtung, die der Sensor für die spezifische Zone besitzt.

Die folgende Tabelle 4.5 zeigt die vorgeschlagene Struktur für die statische Datenbanktabelle:

Tabelle 4.5 Struktur der statischen Datenbanktabelle

rowName	rowType	Kommentar
sensorId	String	Namen von den Sensoren wie im dynamischen Teil der InfluxDB
weight	Float [0,1]	Gewichtung der Sensoren für die Beacons/Zonen
regionId	String	Beacon/Zonen GUID
roomId	String	Id vom Raum, wird im Hintergrund von der App verwendet
regionName	String	Display Name der Zone, Frontend von der App
roomName	String	Display Name vom Raum, Frontend von der App
regionDimension	String	Json String, welcher die Dimensionen der Zonebeschreibt –Zone wird im Overview dynamisch abgebildet

4.5 Aufbau der Applikation

Die Anwendung basiert auf der traditionellen „Modell-View-Controller Pattern“-Version von Apple für iOS. Dementsprechend wird die Implementierung in drei Hauptkomponenten aufgeteilt:

- **Climate Value Model**: Enthält die Modelle, die Werte und Informationen wie persönliche oder „Peer-Präferenzen“ (i.S.v. Mitbenutzer-Präferenzen) und Lokalisierungsdaten.
- **ViewControllers:** Führen die „Views“ und „Controller“ zusammen, sodass sie sowohl die Benutzeroberfläche einrichten als auch die Interaktionen der Nutzer verwalten.
- **External Communication**: Regelt die Kommunikation zwischen dem Nutzer und seinen „Peers“ (Mitbenutzern) und den Informationsaustausch mit dem Backend Server.

4.5.1 Climate Value Model

Das Climate Value Model besteht aus drei Komponenten, die aufeinander aufbauen:

- **ClimateValue:** Beinhaltet den Kern, der eine allgemeine Darstellung eines Integer/Double/Boolean Wertes ist.
- **ClimateControllValue:** Verwendet den „ClimateValue“, um die Präferenzen des Benutzers und der „Peers“ (Mitbenutzer) für einen bestimmten Sensortyp (Luftstrom, Jalousien, Heizung, Licht usw.) zu speichern. Zusätzlich enthält er die aktuellen Gewichtungen für jeden verfügbaren Sensor für jede Zone im aktuellen Raum den der Benutzer gerade betritt. Diese Klasse berechnet den Kompromisswert für den jeweiligen Sensortyp und berechnet die genauen Werte, auf welche die Sensoren eingestellt werden sollen, basierend auf den angegebenen Gewichtungen.

– **OverviewModel:** Dient als zentraler Schnittstellenpunkt, mit dem die „ViewControllers“ und die „External Communication“ Komponenten kommunizieren. Die Gruppierung jeder „ClimateControllValue“ Instanz für die verschiedenen Sensortypen erfolgt schließlich durch diese Klasse.

4.5.2 ViewControllers

Die „ViewControllers“ sind für das Layout der Benutzeroberfläche und die Verarbeitung der Benutzerinteraktionen verantwortlich. Sie können in zwei Grundtypen unterteilt werden: „Hauptübersicht-ViewController“ und „Sensor-ViewController“ (Abbildung 4.2).

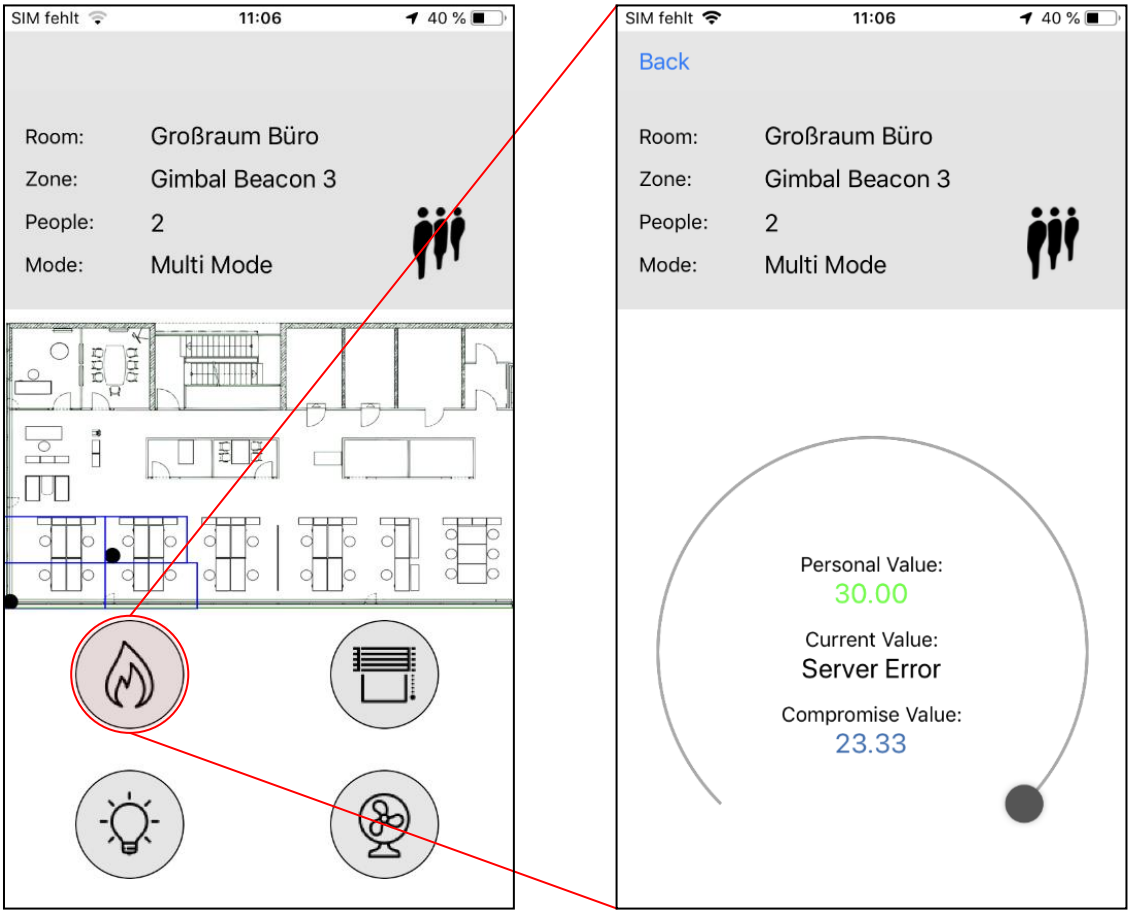


Abbildung 4.2 Prototypisches User Interface der Applikation mit Hauptseite und beispielhafter Detailansicht (links: Hauptübersicht-ViewController [Quelle Original-Karte: Robert Bosch GmbH]; rechts: Sensor-ViewController)

– **Hauptübersicht-ViewController:** Besteht aus einer Karte des aktuellen Benutzerstandortes, unterteilt in die vorgegebenen Zonen (Abbildung 4.3). Wenn ein Benutzer oder Peer (Mitbenutzer) eine der Zonen betritt, wird dieser durch einen Punkt gekennzeichnet. Auf diese Weise hat der Nutzer einen Überblick über alle potenziellen Peers, die die jeweiligen Komfortwerte beeinflussen könnten. Unterhalb der Kartendarstellung befindet der Auswahlbereich zu den unterschiedlichen Kategorien. Dieser stellt sich als ein erweiterbares Menüfeld mit „Buttons“ dar, welche zur jeweiligen Detailansicht (z.B. Einstellungen zu Heizung, Jalousien, Licht, Lüftung) weiterleiten (Abbildung 4.4).

Abbildung 4.3 Kartenübersicht zur Visualisierung der Lokalisation des Nutzers und der Peers (Ausschnitt Hauptübersicht-ViewController) [Quelle Original-Karte: Robert Bosch GmbH]

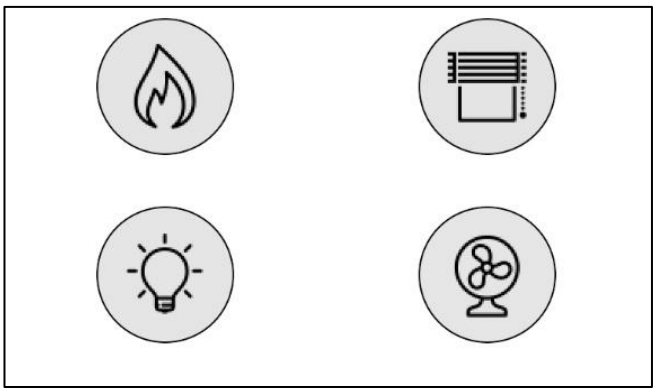


Abbildung 4.4 Menüfeld mit Buttons zur Auswahl und zum Laden der jeweiligen Detailansichten (Ausschnitt Hauptübersicht-ViewController)

- **Sensor-ViewController:** Stellt eine Übersicht über einen oder mehrere Sensortypen dar. Dieser „ViewController“ bietet dem Benutzer verschiedene Oberflächenelemente an, um seine bevorzugten Werte festzulegen. Basierend auf den drei Arten von Werten in der „ClimateValue“ Klasse, verwendet der Prototyp „Sliders“ für Double-Werte, „Steppers“ für Integers und „Switches“ für Boolean. Um dem Benutzer Informationen über seine aktuelle Präferenz, den erzielten Kompromisswert zwischen den Peers und ihm sowie den IST-Wert, auf den die Sensoren aktuell eingestellt sind, zur Verfügung zu stellen, wird zur Darstellung dieser Daten jedes der oben genannten Oberflächenelemente erweitert (Abbildung 4.5). Ändert ein Benutzer seine Präferenz, werden drei „Events“ (Ereignisse) ausgelöst:
    - Berechnen eines neuen Kompromisswertes für diesen Sensortyp
    - Anzeigen des neuen Kompromisswertes beim Benutzer
    - Senden der korrekten Sensorwerte an die „External Communication“ Komponente, zusammen mit der neuen Einstellung des Benutzers.

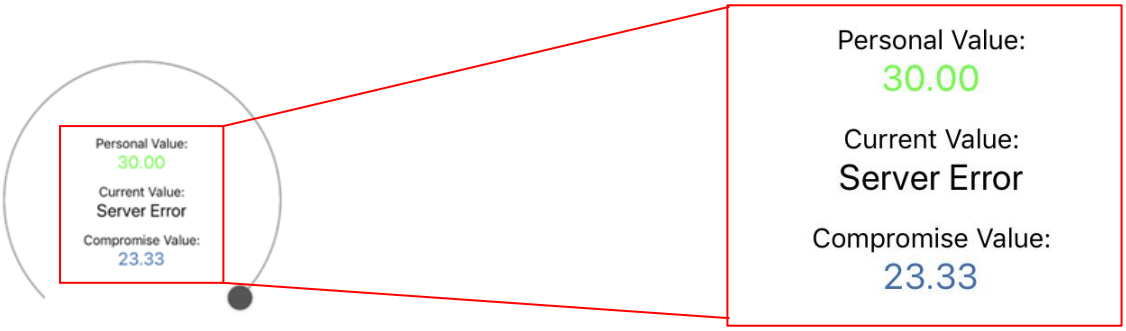


Abbildung 4.5 Slider inkl. Übersichtfeld zur Darstellung der persönlichen Präferenz, des aktuellen IST-Wertes sowie des Kompromisswertes (Sensor-ViewController)

Ein wichtiges User-Interface-Element (UI-Element) ist die „Compact Overview“ Komponente (Abbildung 4.6). Diese wurde innerhalb der Applikation oberhalb der interaktiven Karte positioniert. Es handelt sich hierbei um eine kleine UI-View. Sie liefert Übersichtsinformationen zum aktuellen Raum und der Aufenthaltszone in der sich der Benutzer befindet sowie mit wie vielen Peers er sich den jeweiligen Raum teilt. Visualisiert wird ebenfalls der Betriebsmodus, welcher Auskunft über die Gewichtung bzw. den Einfluss der eigenen Präferenzen gibt. Dieses Oberflächenelement ist in jedem „ViewController“ vorhanden, um dem Nutzer jederzeit zu ermöglichen, sich über aktuelle Gegebenheiten in seinem Umfeld zu informieren.

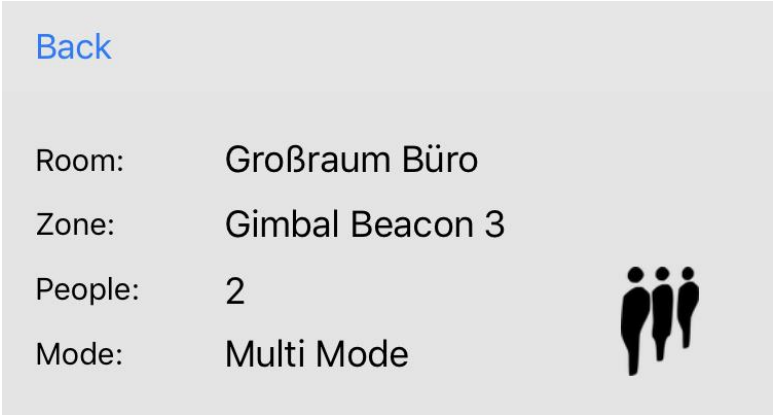


Abbildung 4.6 Übersichtsfeld zur Visualisierung aller relevanten Informationen (Compact Overview Komponente)

4.5.3 External Communication

Die „External Communication“ Komponente besteht aus drei separaten Klassen, die jeweils eine von drei zentralen Kommunikationsaufgaben erfüllt: Der „Bluetooth Peer-Manager“, der „Result-ServerManager“ und der „Control-ServerManager“.

- **Bluetooth Peer-Manager:** Führt die Kommunikation zwischen Peers durch. Wie in Unterkapitel 4.3.2, S. 22 beschrieben, sind die „Core Bluetooth Peripheral“ und die „Core Bluetooth Central“ Interfaces in diesem Manager implementiert, um die Kommunikation zwischen den Peers zu regeln. Da die Gefahr besteht, dass Nachrichten über Bluetooth verlorengehen könnten, wurde ein sog. „Response Tracker“ implementiert. Dieser Tracker verfolgt jede Anfra-

ge, die der Benutzer an seine Peers sendet und verschickt die Anfrage regelmäßig erneut, sollte die Anzahl der Antworten von der der Peers abweichen.

- **Result-ServerManager:** Führt die Abfrage nach Informationen vom Backend-Server aus. In der prototypischen Implementierung verwendet das Backend die „InfluxDB“ als Datenbank. Die Anforderung von Informationen vom Server erfolgt über eine reine „HTTP-GET-Anfrage“. Obwohl die überwiegende Anzahl dieser Anfragen asynchron erfolgen kann, werden einige Informationen (z.B. Beacon IDs) von Anfang an benötigt. Diese werden bereits beim Start der Applikation als „synchrone Requests“ abgefragt.

- **Control-ServerManager:** Verarbeitet die ausgehenden Änderungsanforderungen für die verschiedenen Sensoren, die durch neue Kompromisswerte berechnet werden. Bei der prototypischen Implementierung der Applikation erfolgt dies mit dem Einsatz eines „MQTT-Brokers“. Jeder Sensor ist einem Topic zugeordnet, welcher seine eigene ID besitzt. Die Nachricht, die dann vom Benutzer publiziert wird, enthält nur den neuen, bevorzugten Wert für diesen Sensor.

5. Simulation

Durch eine dynamische Simulation mit der Software TRNSYS 18 sollen die Potenziale einer dezentralen Steuerung im Vergleich zu einer zentralen Steuerung der Gebäudetechnik aufgezeigt werden. Ziel hierbei ist es zu zeigen, dass durch eine dezentrale Bottom-Up-Steuerung im Vergleich zu einer zentralen Top-Down Steuerung Primärenergie eingespart werden kann und gleichzeitig der thermische Komfort in einem Bürogebäude gesteigert wird.

In den nachfolgenden Unterkapiteln wird zunächst der grundsätzliche Aufbau der TRNSYS-Simulation erläutert. Anschließend wird auf die Simulationsvarianten detailliert eingegangen. Die Simulationsergebnisse werden dargestellt, bezüglich des thermischen Komforts und des Energieverbrauchs miteinander verglichen und die Ergebnisse diskutiert. Potenziale und Risiken zukünftiger Wetterveränderungen werden analysiert und abschließend werden in einem Fazit die Erkenntnisse zusammengefasst und Empfehlungen formuliert.

5.1 Struktureller Aufbau der thermischen Gebäudesimulation

Auf dem Forschungscampus der Robert Bosch GmbH in Renningen befinden sich die für das Forschungsprojekt ausgewählten Räumlichkeiten, innerhalb derer auch die Applikation prototypisch getestet werden soll. Weiter beziehen sich alle nachfolgenden Simulationsmodelle auf den sog. Demonstratorraum (Simulationsbereich). Das heißt, betrachtet wird der südwestliche Bereich des Bürogebäudes 111, welcher die geometrische Grundlage für die thermische Gebäudesimulation formt (Abbildung 5.1, S. 32). Nach einer genaueren Beschreibung der Raumparameter wird auf Gebäudetechnik und deren Umsetzung in der Simulation eingegangen. Desweiteren werden in diesem Kapitel die Auswertungsgrundlagen beschrieben.

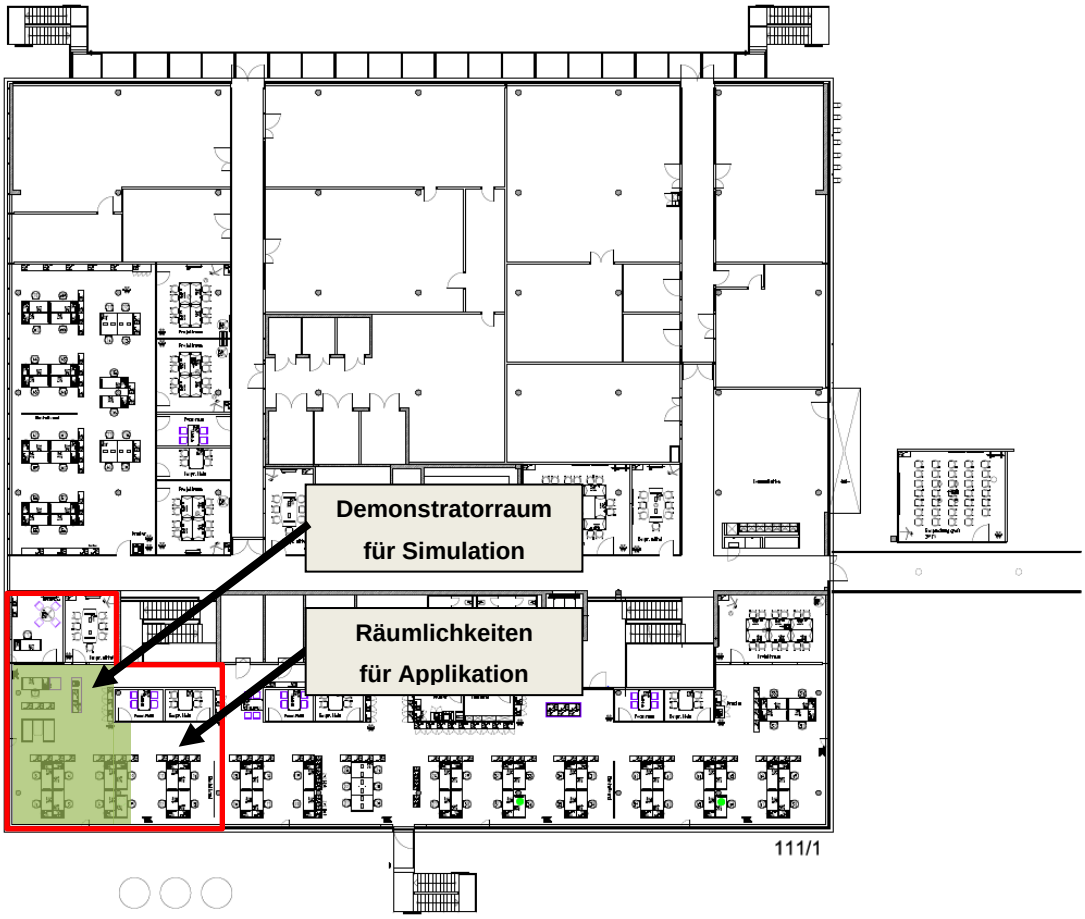


Abbildung 5.1 Räumlichkeiten und Demonstratorraum (Bild aus Anhang A, Abbildung A.1, S. 93)

5.1.1 Demonstratorraum (Simulationsbereich)

Der genannte Demonstratorraum liegt im 1. Obergeschoss des Büro- und Forschungsgebäudes. Der Raum hat eine Grundfläche von 99 m² und ein Raumvolumen von 305 m³. Nach Süden und Westen bildet die Fassade des Gebäudes die Raumgrenze. Im Norden schließen ein Einzelbüro und ein Besprechungsraum an, nach Osten ein weiterer Besprechungsraum sowie die offene Bürolandschaft (Abbildung 5.1).

Alle internen Wände wurden in der Simulation vereinfacht als adiabat angesetzt. Weder in angrenzenden Räumen noch in das darunterliegende Erdgeschoss sowie in das darüber liegende Regelgeschoss fließen dadurch Energieströme. Die Materialität aller Bauteile wurde projektspezifisch in Anlehnung an Anhang C, Tabelle A.1, S. 95 in der

Simulation abgebildet, um Speichervorgänge sowie die Energieströme über die Außenhülle zu berücksichtigen. Die internen Speicherkapazitäten wurden mit 1390 kJ/K angesetzt, wobei 348 kJ/K die Speicherkapazität der Luft und 1042 kJ/K die Speicherkapazität der Einbauten wiederspiegelt.

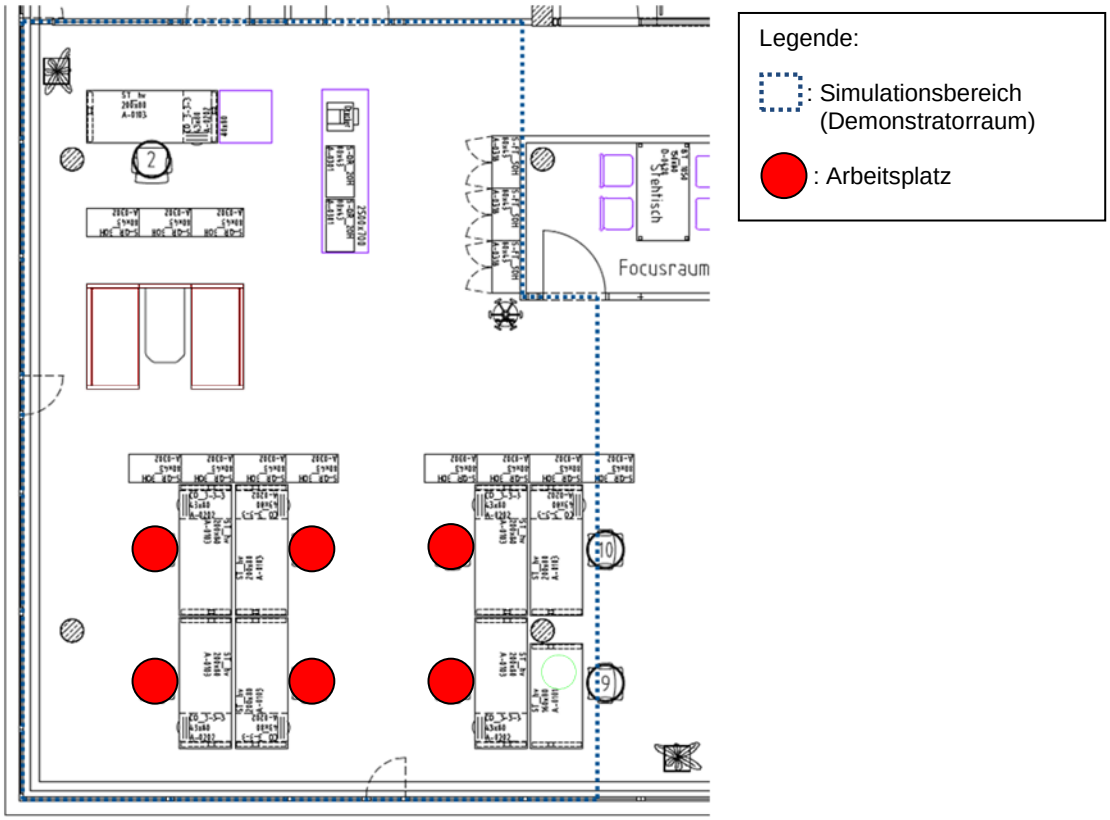


Abbildung 5.2 Simulationsbereich (Demonstratorraum) mit interner Möblierung (Bildausschnitt aus Anhang A, Abbildung A.1, S. 93)

Innerhalb des für die Simulation ausgewählten Bereiches (Demonstratorraum) befinden sich sechs Arbeitsplätze ( ) (Abbildung 5.2). Nach DIN EN 13779 Anhang A.17.2 [13] wird jeder Person mit einer „sitzenden Tätigkeit (Büro)“ ein Aktivitätsgrad von 1,2 met zugeordnet und somit einer sensiblen Wärmeabgabe von 75 W/Person. Als interne Lasten wurde jeder anwesenden Person ein Laptop mit 70 W zugewiesen und eine Grundlast von 2 W/m² angesetzt (Drucker, Router, etc.). Als künstliche Beleuchtung wurden die in den Räumlichkeiten verwendeten Leuchtstoffröhren LT49 W T5 / 840 der Firma NARVA von je 49 W Nennleistung [14] angesetzt und mit 7 W/m² in

die Simulation implementiert. Näherungsweise wurden die Leuchten mit 70 % radiativer und 30 % konvektiver Wärmeabgabe abgebildet. Die Anwesenheit der Personen differiert je nach Simulationsvariante, lehnt sich aber grundsätzlich an das Nutzerprofil der DIN EN 15232-1:2017 Anhang C [15] für ein Bürogebäude an.

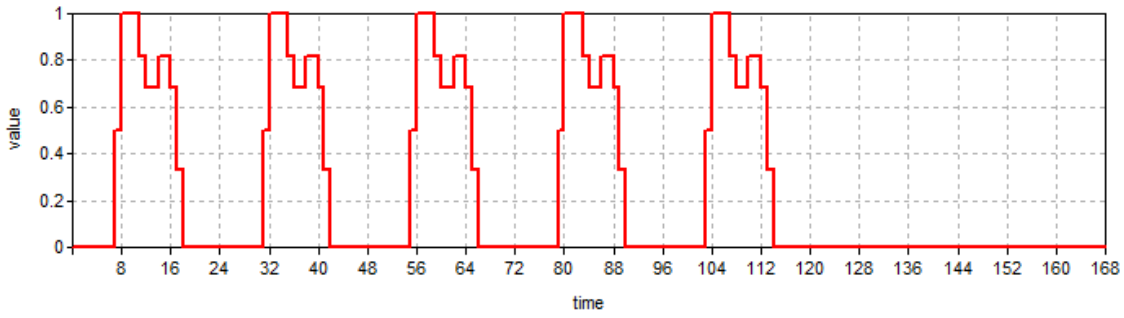


Abbildung 5.3 Nutzerprofil Büro nach DIN 15232-1:2017 Bild C.5 (Grafik nachgezeichnet nach [15, S. 70])

Nach DIN EN 12831:2003 [16] wurde die Infiltration wie folgt berechnet:

$$Vinf,i = 2 \times Vi \times n50 \times ei \times \varepsilon i$$
$$= 2 \text{ x } 304\text{m}^3 \text{ x } 2{,}5\ 1/\text{h x } 0{,}03 \text{ x } 1{,}0 = 45{,}6\text{m}^3/\text{h}$$

mit: Vi Raumvolumen des beheizten Raumes (i) in [m^3]

$n50$ Luftwechselrate je Stunde bei 50Pa Druckdifferenz [1/h]; Großraumbüro $n50$=2,5 1/h

ei Höhenkorrekturfaktor [-]; beheizter Raum mit nicht mehr als einer Öffnung nach außen ei =0,03

εi Koeffizient für Abschirmung [-]; für Gebäude bis 10m εi=1.0

Die Werte entstammen hierbei der DIN EN 12831 Bbl 1:2008-07 Tabelle 10 und 11 [17] sowie dem Bericht von CR/AEB3 der Robert Bosch GmbH von Farid Ahmadipour Davani vom 25.11.2016 [18].

Es ergibt sich hieraus ein Luftwechsel aufgrund von Infiltration von 0,15 1/h.

Die Außenfassade weist einen außenliegenden Sonnenschutz auf, welcher mir einem Verschattungsfaktor von 0,7 in TRNBuild angesetzt wurde (Abminderungsfaktor der

Sonnenschutzvorrichtung Fc=0,3). Nach Rücksprache mit der Robert Bosch GmbH ist dieser standardmäßig zwischen 22:30 – 2:30 Uhr geschlossen.

5.1.2 Gebäudetechnik

Grundsätzlich kann die Gebäudetechnik durch die Heiz-, Kühl- und Lüftungskomponenten sowie anhand der Regelung der künstlichen und natürlichen Belichtung geregelt werden. Im Demonstratorraum sind Buderus Heizkörper verbaut. In der TRNSYS-Simulation werden diese mittels einer ideellen Heizung abgebildet. Die Heizleistung wurde daher auf 17,22 kW beschränkt. Die Winterperiode definiert sich durch den Zustand, wenn die Außentemperatur 15 °C unterschreitet und zugleich die durchschnittliche Außentemperatur der letzten 24 Stunden unter 11 °C liegt. In der Heizperiode wird der Raum auf ein ideales Temperaturniveau von 22 °C Lufttemperatur beheizt. Die Kühlenergie wird im Demonstratorraum über eine Lüftungsanlage gesteuert, die einen Leistungsbereich der Austrittstemperatur von 17 bis 25 °C besitzt und durch den Volumenstrom reguliert werden kann. Neben einer Heiz- und Kühleinheit besitzt die Lüftungsanlage auch einen Rotationswärmetauscher zur Wärmerückgewinnung vom Modell Rotortronic VVX. Liegt die Ablufttemperatur um mehr als 2 K über der Außentemperatur wird eine Wärmerückgewinnung mit einer Effizienz von 71,1 % in die Simulation integriert während die Heizung und auch Kühlung der Zuluft über die ideelle Heizung sowie über eine ideelle Kühlung abgebildet ist. Die Kühlung ist dabei auf 1,09 kW beschränkt (max. delta T bei maximalem Volumenstrom der Lüftung) und der Zuluftvolumenstrom wird der erforderlichen Kühlleistung angepasst. Die Kühlperiode definiert sich über die aktuelle Außentemperatur größer als 25 °C und eine gleichzeitigen Überschreitung von 14 °C der durchschnittlichen Außentemperatur der letzten 24 Stunden. Die erforderliche Hilfsenergie der Lüftungsanlage wurde als lineare Teilfunktion aus drei Betriebspunkten der Ventilatoren ermittelt und in die Simulation implementiert.

Die Tageslichtzufuhr wird über den außenliegenden Sonnenschutzes gesteuert, während das künstliche Licht durch die Aktivierung der innenliegenden Deckenlampen geregelt ist. Dabei wird mit Schwellenwerten zur Aktivierung sowie Deaktivierung der künstlichen Beleuchtung gearbeitet. Diese unterscheiden sich je nach Simulationsvari-

ante, beziehen sich dabei aber immer auf einen konstanten Tageslichtquotienten von 2 %.

In der nachfolgenden Abbildung 5.4 ist der grundsätzliche Aufbau der TRNSYS-Simulation dargestellt und in einzelne Untergruppen aufgeteilt.

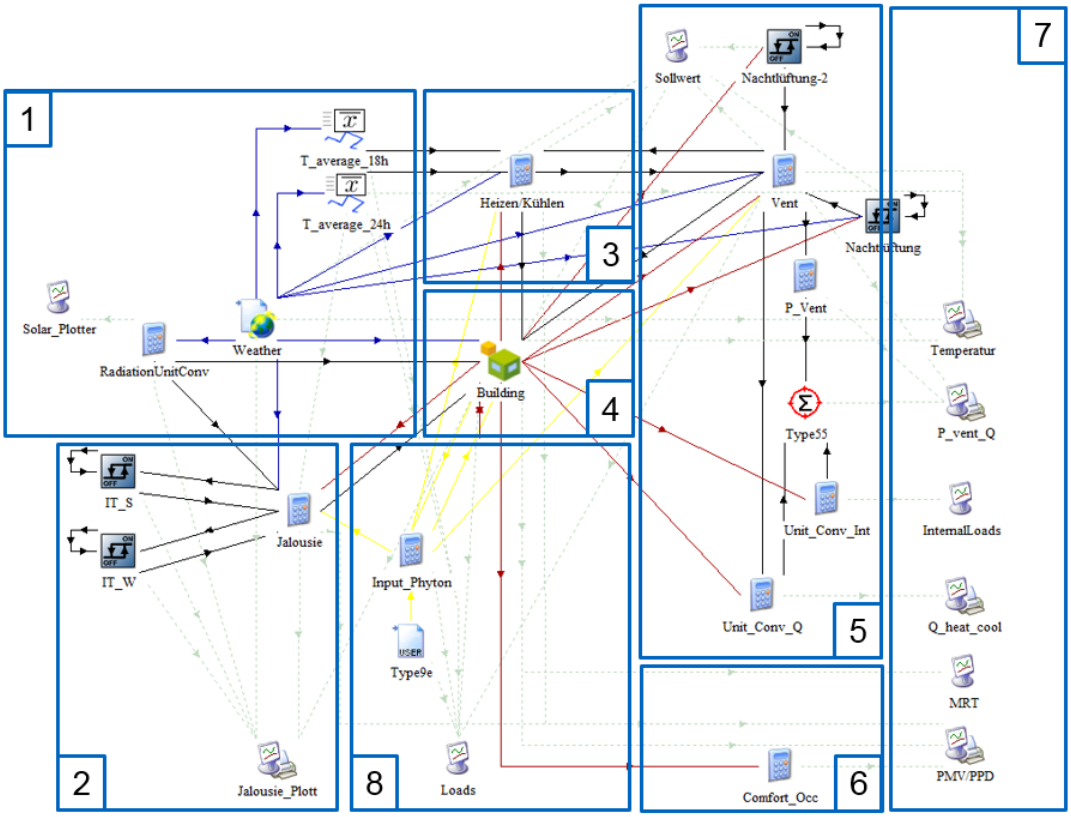


Abbildung 5.4 Übersicht Simulationszonen TRNSYS

Hinweis zu Abbildung 5.4:
Während rote Linien in der dynamischen Simulation Datenflüsse in Bezug auf das Gebäude repräsentieren, beziehen sich blaue Linien auf die Wetterdaten. Hellgrau gestrichelte Linien bilden Datenflüsse zu den Online-Plottern ab. In Gelb ist der Einfluss der Zeitpläne abgebildet und in schwarz alle übrigen Datenströme. Die einzelnen Simulationszonen sowie ihre Funktionen sind in der nachfolgenden Tabelle 5.1 dargestellt.

Tabelle 5.1 Darstellung der Simulationszonen und ihre Funktionen

Nr. Zone	Funktion
1	Wetterdaten
2	Steuerung Sonnenschutz
3	Steuerung Heizen & Kühlen
4	Gebäude
5	Berechnung Heiz-,Kühl-, & Hilfsenergie
6	Komfort Analyse
7	Auswertung- Plotter
8	Zufallsprofil (für Variante 2)

Der modellierte Demonstratorraum wurde mit der Software SketchUp generiert und über den Building Type 56 in die Simulation integriert. Die Wetterdaten repräsentieren das Wetter für den Standort Stuttgart (DE-Stuttgart-107370.tm2). In *Kapitel 5.4 Einfluss der Klimaveränderung, S. 67* wird der Wetterdatensatz durch Zukunftsszenarien ersetzt und die Auswirkungen beschrieben.

Abbildung 5.5 zeigt das für die Simulation aufgebaute 3D-Sketchup-Modell des Testraumes. Die „Ecke“ im Nordosten des Testraumes wurde aus Simulationsgründen abgeschrägt und so der Raum in einen konvexen Körper transferiert.

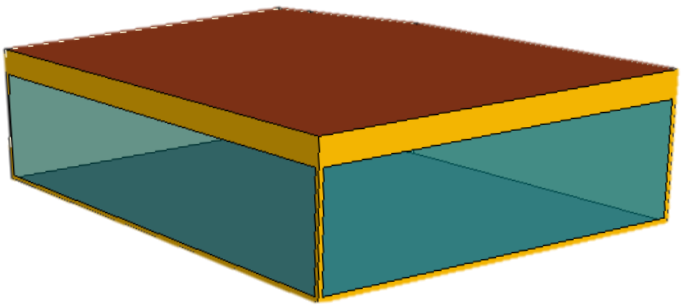


Abbildung 5.5 3D-Sketchup-Modell des Demonstratorraumes

5.1.3 Auswertung

Die Auswertung der Simulationen konzentriert sich auf die Betrachtung der erforderlichen Primärenergie sowie des thermischen Innenraumkomforts. Dabei wird der Energieaufwand in Heiz- und Kühlenergie, Hilfsenergie der Lüftung sowie Energie für die künstliche Beleuchtung aufgegliedert. Der Energieaufwand der Computer und der Grundlast ändert sich in keiner der Simulationsvarianten und spielt daher bei der Auswertung keine Rolle. Aus der simulierten Nutzenergie wird mittels Primärenergiefaktor der Primärenergiebedarf ermittelt. Hierbei wird ein Primärenergiefaktor für die Heizwärme für einen klassischen Energieträger von 1,1 nach DIN V 4701-10:2003 Tabelle C.4-1 [19] angesetzt. Für die Kühlenergie, Hilfsenergie der Lüftung und Energiebedarf der künstlichen Beleuchtung wird der Primärenergiefaktor für Strom nach EnEV Anlage 1 Abschnitt 2.1.1 [20] mit 1,8 verwendet (Abbildung 5.6).

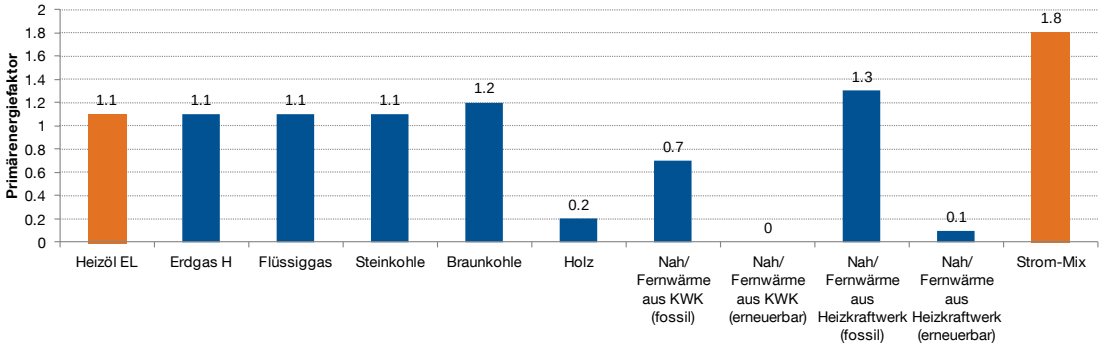


Abbildung 5.6 Primärenergiefaktoren nach DIN V 4701-10 und EnEV

Angelehnt an die Position der Luftauslässe der Lüftungsanlagen werden sechs Sensorpunkte für die Analyse des PPD (Predicted Percentage of Dissatisfied) und PMV (Predicted Mean Vote) implementiert (Abbildung 5.7, S. 39), um eine Aussage über die thermische Behaglichkeit nach DIN EN ISO 7730 [21] im simulierten Raum zu generieren (Abbildung 5.8, S. 40).

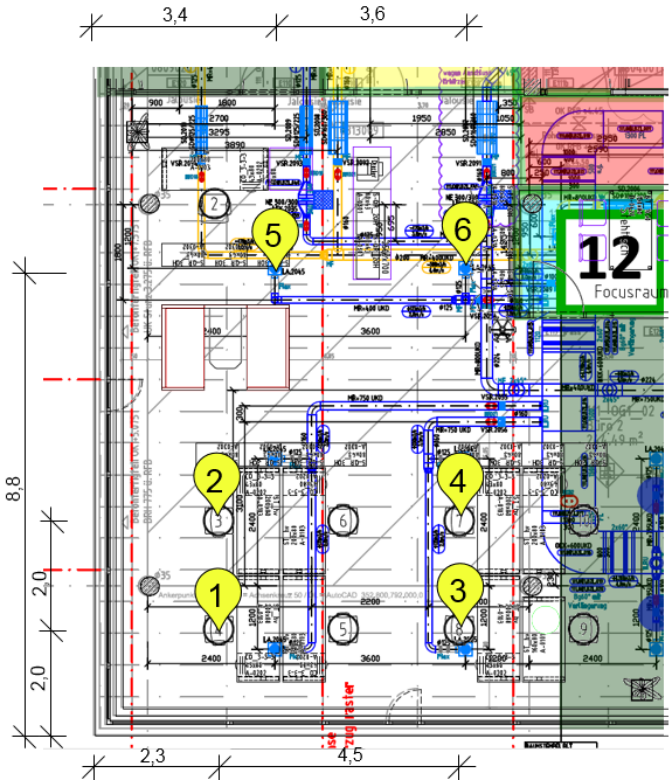
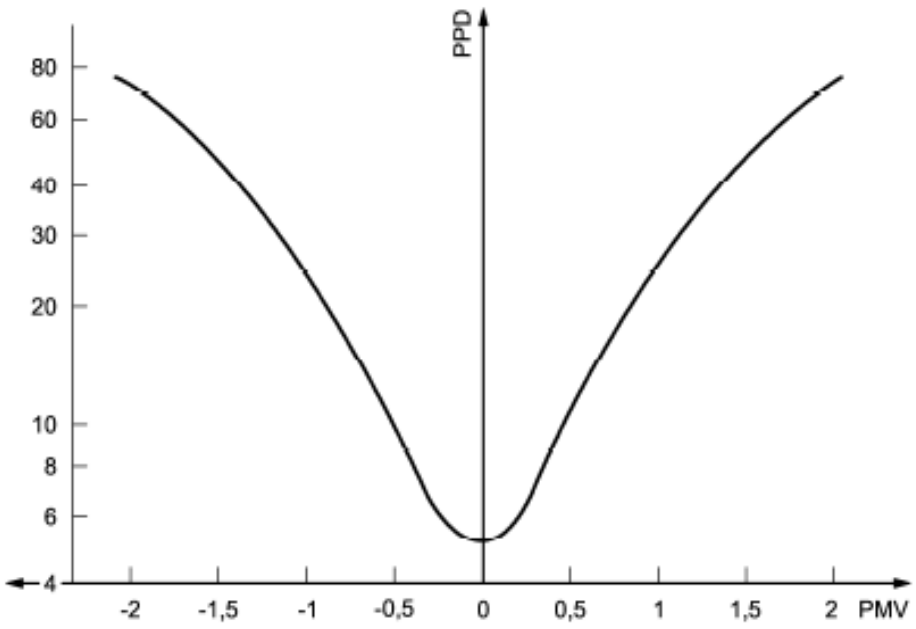


Abbildung 5.7 Position der Komfortauswertungspunkte im Kontext der Lüftungsauslässe (Bildausschnitt aus Anhang B, Abbildung A.2, S. 94)

Die Klimabeurteilung eines Raumes hängt vom thermischen Gleichgewicht eines jeden Menschen ab. Steht die im Körper erzeugte Wärme im Gleichgewicht mit der an die Umgebung abgegebene Wärme ist das thermische Gleichgewicht erreicht. Anhand einer 7-stufigen Klimabeurteilungsskale, von -3 kalt bis +3 heiß, wird der Index PMV bestimmt (Abbildung 5.8, S. 40). Die Berechnungsgrundlage ist in EN ISO 7730 genau erklärt und in der Simulationssoftware TRNSYS 18 bereits integriert. Der PPD kann dann aus dem PMV berechnet werden. „Der PPD ist ein Index, der eine quantitative Voraussage des Prozentsatzes der mit einem bestimmten Umgebungsklima unzufriedenen Personen darstellt, die es als zu kalt oder zu warm empfinden“ [21, S. 13]. Nach EN ISO 7730 Anhang A wird die Behaglichkeit in Räumen in drei Komfortkategorien bewertet. Neben lokaler Unbehaglichkeit muss auch der thermische Zustand des Körpers insgesamt gewisse Kriterien erfüllen. Für die beste Kategorie A muss demnach der PPD unter 6 % liegen, für Kategorie B unter 10% und für Kategorie C unter 15 % [21, S. 22].



Legende

PMV Vorausgesagtes mittleres Votum
PPD Vorausgesagter Prozentsatz an Unzufriedenen, %

Bild 1 — PPD als Funktion des PMV

Abbildung 5.8 PPD als Funktion des PMV - Bild 1 der EN ISO 7730:2005 [21, S. 14]

Nach DIN EN 15251:2012 [22] werden zudem die Unter- und Übertemperaturgradstunden [Kh] sowie Unter- und Übertemperaturstunden [h] ausgewertet und in den Gesamtabweichungsgradstunden [Kh] zusammengefasst. Keine Abweichungen zum Temperaturband der Norm (Abbildung 5.9, S. 41) von +/- 2 K gilt als Grundsatzregel. Außerdem sind im Jahresverlauf maximal 57 Kh/a an Gesamtabweichungsgradstunden für den Demonstratorraum erlaubt. Nach dem vereinfachten Verfahren der DIN 4108-2 Tabelle 9 [23] dürfen maximal 500 Kh/a Übertemperaturgradstunden im Jahresverlauf auftreten, wobei die zugrundeliegende zulässige Innenraumtemperatur von der Sommerklimaregion abhängt. Nach „Bild 1 – Sommerklimaregionen“ der Norm [23, S. 21] liegt der Standort Renningen in der Region A, wodurch nach Tabelle 9 der Norm [23, S. 28] eine Innenraumtemperatur von konstant 25 °C als Grundlage der Übertemperaturgradstunden dient.

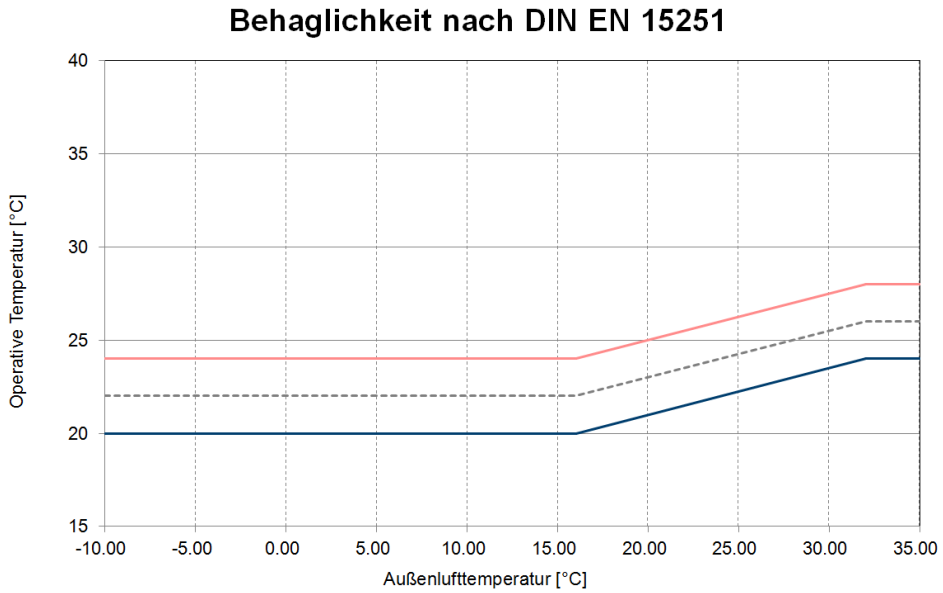


Abbildung 5.9 Komfortraumtemperatur (gestrichelte Linie) mit dem zugelassenen Toleranzbereich für die operative Raumtemperatur (durchgezogene Linien) in Abhängigkeit der Außenlufttemperatur (Grafik nachgezeichnet nach [22, S. 5]).

5.2 Simulationsvarianten

Um die Potenziale einer dezentralen Regelung in Bezug auf Energieeffizienz und Komfortsteigerung herauszuarbeiten, werden mittels thermischer Simulation drei Varianten verglichen. Hierbei wird kategorisch zwischen einem zentral geregelten, Top-Down Fall (Basis), einem dezentralen Fall mit einem zentralen Steuerungselement für Grundeinstellungen (Variante 1) und einem ganzheitlich dezentralen Fall (Variante 2) unterschieden. Der zentral gesteuerte Fall erlaubt dem Nutzer keine Möglichkeit, Einfluss auf die Steuerung des Sonnenschutzes, der Heiz- und Kühlregelung sowie der Beleuchtung im Großraumbüro zu nehmen. Die Regelung der Komponenten wird in diesem Fall automatisch durch ein zentrales Steuerungselement vollzogen. Der Basisfall bildet so die aktuelle Situation im Demonstratorraum ab. Die ganzheitlich dezentrale Variante (Variante 2) stellt ein Szenario einer komplett nutzergesteuerten Regelung dar. In diesem Fall liegt der Fokus auf einer individuellen Implementierung des Nutzerverhaltens für die Simulation. Dem Nutzer steht die Regelung der einzelnen Kompo-

nenten komplett frei, was weiterhin dazu führt, dass auch ein Fehlverhalten des Nutzers abgebildet werden muss. Die dezentrale Variante mit dem zentralen Steuerungselement (Variante 1) stellt eine Kombination aus beiden Prinzipien dar. Der Nutzer kann die einzelnen Komponenten individuell steuern, dennoch sind gewisse Grundeinstellungen in der Regelung implementiert. Die Prinzipien der drei unterschiedlichen Varianten sind in der nachfolgenden Abbildung 5.10 metaphorisch dargestellt.

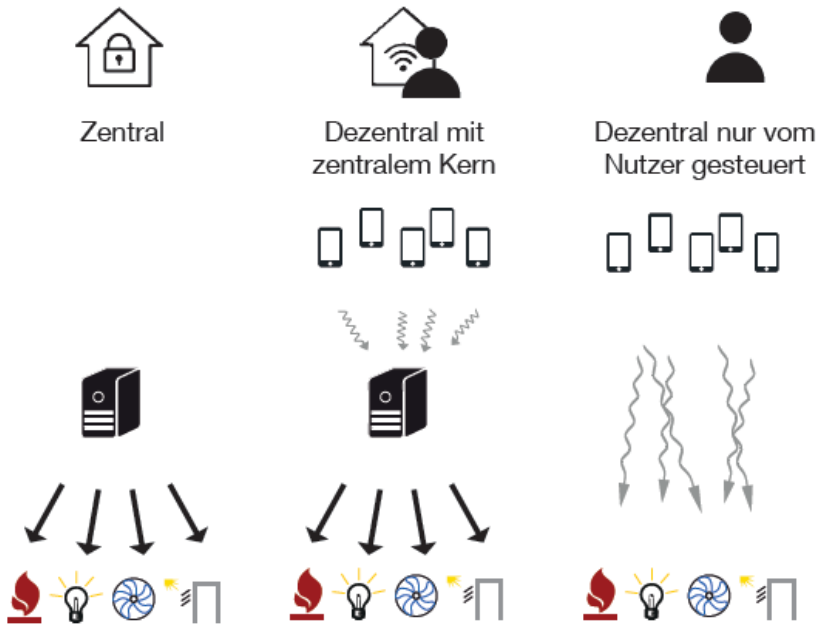


Abbildung 5.10 Übersicht Simulationsvarianten TRNSYS

Zunächst wird nun die Basisvariante mit ihren Regelungsstrategien genauer beschrieben. Anschließend werden die Einzelmaßnahmen einer Optimierung gesondert betrachtet. Hierbei werden die Regelung der Lüftungsmenge, der künstlichen Beleuchtung, der Heizung, des Sonnenschutzes und der Nachtlüftung individuell variiert, um deren Auswirkung interpretieren zu können. Nachfolgend werden die Simulationsvarianten 1 & 2 detailliert analysiert. Abbildung 5.11, S. 43 gibt einen Überblick der unterschiedlichen Eingangsparameter.

	Basisvariante: Zentral	Variante 1: Dezentral mit zentralem Kern	Variante 2: Dezentral nur vom Nutzer gesteuert
	Anwesendheitsgesteuert + Helligkeitsgesteuert 600/500lux	Anwesendheitsgesteuert + Nutzerprofilgesteuert + Helligkeitsgesteuert 300/200lux	Nutzerprofilgesteuert + Helligkeitsgesteuert 600/200lux
	Nachts geschlossen (22:30-2:30 Uhr) Interne Steuerung (180-200W)	Nachts geschlossen interner Steuerung (Winter: 300/280 W/m²; Sommer: 110/130 W/m²)	Steuerung NUR wenn jemand anwesend (Winter: 300/280 W/m²; Sommer: 110/130 W/m²)
	3-facher Luftwechsel (24/7) total 870m³/h	Mindestluftwechsel von 40m³/Pers. + Nutzerprofilgesteuert + nach Temp. geregelt	Nutzerprofilgesteuert + nach Temp. geregelt max. 870 m³/h
	Ideelle Heizung Winter 4-20 Uhr: 22 °C Nachtabsenkung 17°C	Ideelle Heizung Winter 6-18 Uhr: 22 °C Nachtabsenkung 17°C	Ideelle Heizung keine Nachtabsenkung WE-Absenkung 17°C
	-	Wenn Top-Tamb>6K und Top>25°C dann 1 1/h Luftwechsel	-

Montag	voller Arbeitstag	Montag	DIN EN 15232	Montag	Mehr Arbeiten
Dienstag	voller Arbeitstag	Dienstag	DIN EN 15232	Dienstag	Termine
Mittwoch	voller Arbeitstag	Mittwoch	DIN EN 15232	Mittwoch	Meeting im Büro
Donnerstag	voller Arbeitstag	Donnerstag	DIN EN 15232	Donnerstag	Nachts Grundlast
Freitag	voller Arbeitstag	Freitag	DIN EN 15232	Freitag	Früher Schluss
Samsatg	Kein Arbeitstag	Samsatg	Kein Arbeitstag	Samsatg	Kein Arbeitstag
Sonntag	Kein Arbeitstag	Sonntag	Kein Arbeitstag	Sonntag	Kein Arbeitstag

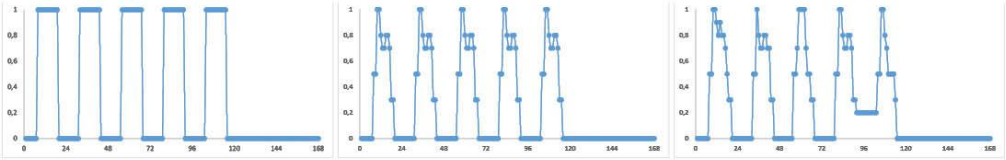


Abbildung 5.11 Eingangsparameter der Simulationsvarianten

Künstliches Licht

In der Basissimulation mit einem zentralen Kern wird das Licht bei einer Unterschreitung von 500 lux im gesamten Raum angeschaltet, soweit mindestens eine Person anwesend ist, und sobald der Grenzwert von 600 lux überschritten wird, wieder ausgeschalten. Erhält der Nutzer nun die Möglichkeit über eine Applikation von seinem Arbeitsplatz aus die Beleuchtung zu regeln, können die Grenzwerte auf 400/200 lux reduziert werden. Außerdem muss nun nicht konstant der gesamte Raum beleuchtet werden, sondern eine arbeitsplatzbezogene Beleuchtung ist ausreichend, was durch eine Verknüpfung der Beleuchtungsleistung mit dem Anwesenheitsprofil abgebildet wird. Existiert in Variante 2 allerdings kein zentrales Steuerelement, bleibt das Licht solange an, bis es vom Nutzer wieder selbständig ausgeschalten wird. Um die Trägheit der Nutzer mit abzubilden, werden die Grenzwerte auf 1000/200 lux angepasst.

Sonnenschutz

Während in der Basissimulation die Jalousien ganzjährig bei Einstrahlungswerten je Fassade von 200 W/m² geschlossen und ab 180 W/m² geöffnet werden (in Anlehnung an die aktuelle Steuerung im Demonstratorraum), wird in Variante 1 zwischen Sommer und Winter unterschieden. Im Winter wird erst ab 300 W/m² geschlossen, im Sommer hingegen schon bei 130 W/m². Diese „strengere“ Steuerung kann ohne Komforteinbußen deshalb umgesetzt werden, da der Nutzer einfach eingreifen kann, sollte es doch unkomfortabel für ihn sein. In Variante 2 wird diese Steuerung übernommen, allerdings nur bei Anwesenheit mindestens einer Person aktiviert. Ist die Jalousie, z.B. beim Verlassen der letzten Person geschlossen, bleibt diese in diesem Zustand bis wieder mindestens eine Person anwesend ist. Eine Ausnahme bildet hier nur der Windalarm, der bei allen Varianten ab 12 m/s Windgeschwindigkeit greift.

Lüftung

Da die Lüftung aktuell 24 h/7 d mit 3-fachem Luftwechsel betrieben wird, liegt hier ein hohes Einsparungspotenzial. Der hierbei entstehende Volumenstrom von 870 m^3/h wird in Variante 1 und 2 auf eine Frischluftzufuhr von 40 m^3/Person reduziert. So kann Energie gespart und trotzdem der hygienische Luftwechsel eingehalten werden. Dies wird über die Anwesenheitskontrolle bzw. den Nutzereingriff ermöglicht. Zusätzlich wird die Luftmenge in Variante 1 und 2 bei weiterem Kühlbedarf erhöht, da die Kühlleistung im Testraum nur über die Lüftung in den Raum eingebracht werden kann.

Heizung Nachtabsenkung

Aktuell findet keine Nachtabsenkung im Demonstratorraum statt. Eine Nachtabsenkung auf 17 °C bietet unabhängig der hierarchischen Steuerung ein Einsparpotenzial, weshalb schon in der Basisvariante eine Nachtabsenkung zwischen 20-4 Uhr implementiert ist. In Variante 1 wird diese Nachtabsenkung auf 18-6 Uhr erweitert. Dies kann wiederum durch die Anwesenheit der Nutzer (Applikation), sowie deren Eingreifmöglichkeit erreicht werden. In Variante 2 findet unter der Woche keine Nachtabsenkung statt, da davon ausgegangen wird, dass ohne zentralen Kern kein Nutzer über Nacht die Heizgrenztemperatur verändert. Am Wochenende hingegen wird auch in Variante 2 auf 17 °C abgesenkt.

Lüftung Nachtabsenkung

Nur in Variante 1 wird eine Nachtlüftung implementiert, um so das Potenzial der natürlichen Auskühlung der Räume zu ermöglichen. In Variante 2 ist dies nicht mehr möglich, da kein Steuerelement diese Nachtlüftung regeln könnte.

Anwesenheit der Nutzer

Die Anwesenheit der Nutzer ist der DIN EN 15232-1:2017 Anhang C für ein Bürogebäude entnommen. In Variante 2 wird dieses Profil durch ein Zufallsprofil ersetzt, welches das Fehlverhalten der dezentralen Nutzersteuerung mit abbildet. Das Zufallsnutzerprofil weicht in Jahressumme lediglich um 2 % der Anwesenheitsstunden vom Standardprofil ab.

Die Ergebnisse der drei Hauptsimulationen (Basis, Variante 1, Variante 2), sowie der Einfluss der einzelnen Maßnahmen werden in den folgenden Kapiteln zusammengefasst.

5.2.1 Basisvariante: Zentral geregelte Top-Down-Gebäudesimulation

Die zentral geregelte Gebäudesteuerung gibt dem Nutzer keine Möglichkeit auf die Steuerung der Heizung, der Kühlung, der Lüftung, des Sonnenschutzes und des Kunstlichts im Gebäude einzugreifen. Dies spiegelt die aktuelle Situation im Demonstratorraum wieder.

In Abbildung 5.12 wird die Regelungsstrategie, die in *Kapitel 5.2 Simulationsvarianten, S. 41* bereits näher beschrieben wurden, zusammengefasst.

Abbildung 5.12 Übersicht Simulationsparameter Basisvariante

In der Basisvariante wurde der Demonstratorraum möglichst nahe an der aktuellen Steuer- und Regelungsstrategie angelehnt und ausgelegt. Dadurch ergibt sich ein gesamter Primärenergiebedarf von 140 kWh/(m²a), bestehend aus Heiz- und Kühlenergie, Hilfsenergie der Lüftung sowie Energiebedarf für die künstliche Beleuchtung. Um möglichst nur die durch eine dezentrale Steuerung zu erzielende Einsparungen aufzuzeigen, wurde die Basisvariante, abweichend zur aktuellen Situation, mit einer Nachtabsenkung der Heizung von 20 – 4 Uhr auf 17 °C simuliert. Allein hierdurch wird der Primärenergiebedarf um 15,8 kWh/(m²a) reduziert. Die Basisvariante weist hiermit einen **Primärenergiebedarf von 124,5 kWh/(m²a)** auf, welcher im weiteren Bericht als Vergleichswert dient. Dabei fallen mit 64,6 kWh/(m²a) etwa die Hälfte der aufgewendeten Energie auf die Heizung. Mit 28 % (35,5 kWh/(m²a)) nimmt die Hilfsenergie der Lüftungsanlage den zweitgrößten Anteil am Energiebedarf ein, gefolgt von 21,0 kWh/(m²a) (16 %) die für die Beleuchtung erforderlich sind. Die Kühlung hat mit lediglich 3,4 kWh/(m²a) (3 %) kaum Einfluss. Dies wird in Abbildung 5.13 veranschaulicht.

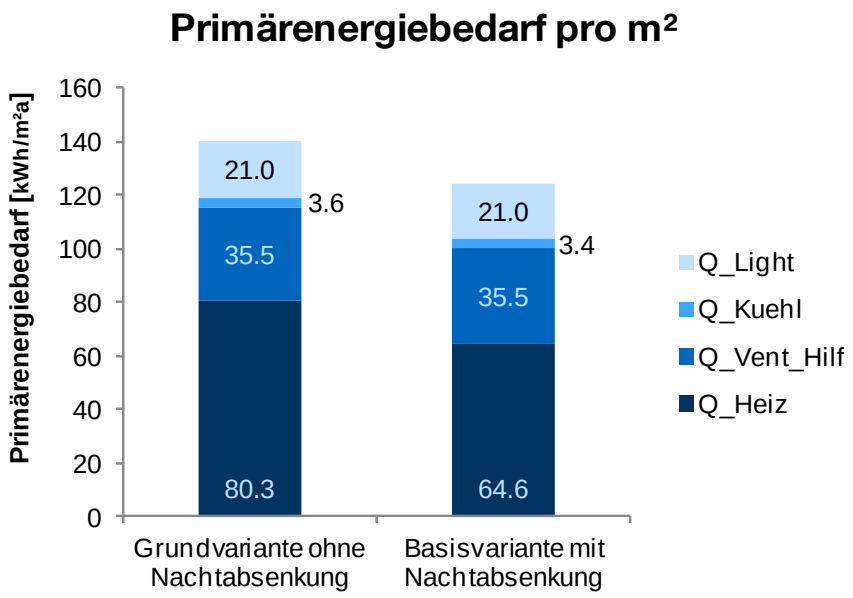


Abbildung 5.13 Primärenergiebedarf pro m² der Basisvariante ohne und mit Nachtabsenkung

Abbildung 5.14 zeigt den Primärenergiebedarf der Basisvariante aufgeteilt nach Einsatzgebiet über ein Jahr. In der Heizperiode Januar bis April, sowie September bis Dezember sieht man die deutliche Dominanz des Heizenergiebedarfs (rote Linie). Auch die Nachtabsenkung ist hier deutlich zu erkennen, da nachts und an den Wochenenden wesentlich geringere Ausschläge zu erkennen sind. Die Hilfsenergie (blaue Linie) liegt konstant bei 0,22 kW, da die Lüftungsanlage 24 h/7 d mit 3-fachem Luftwechsel betrieben wird. Der Energiebedarf für die künstliche Beleuchtung (gelbe Linie) tritt nur tagsüber an den Werktagen auf. Über die Sommermonate ist der Energiebedarf für die Beleuchtung reduziert. Allerdings kommt es hier zu einem Kühlenergiebedarf, welcher in hellblau zu erkennen ist.

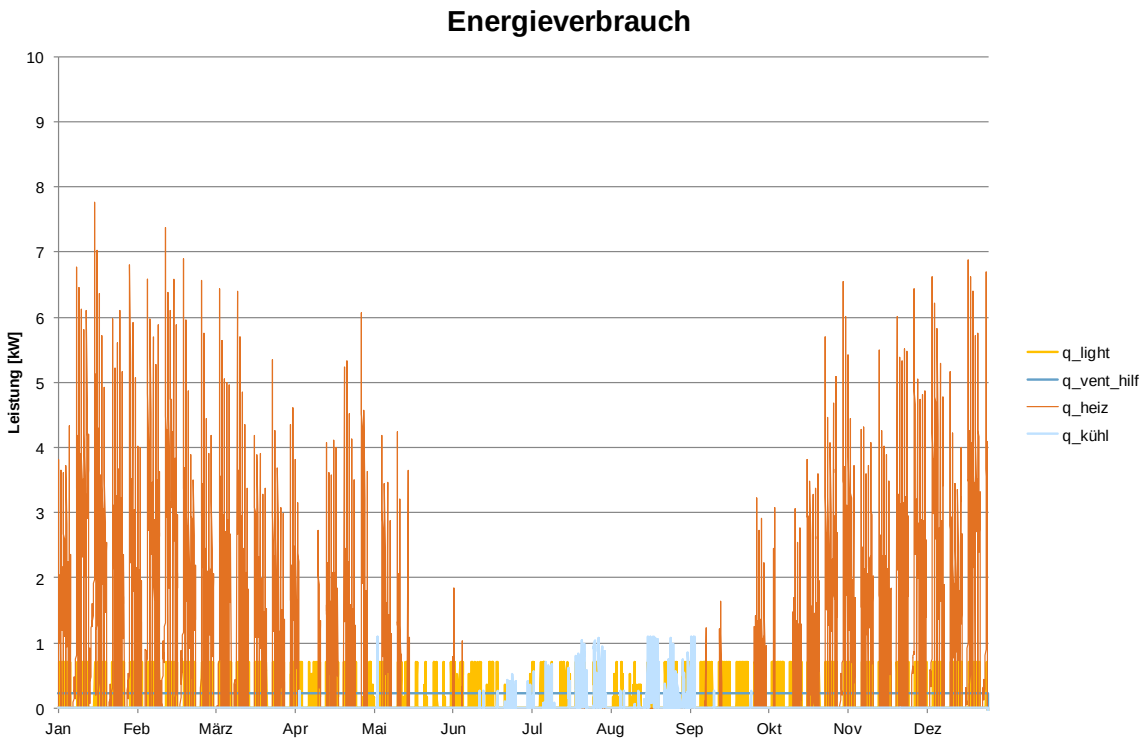


Abbildung 5.14 Primärenergiebedarf pro m² der Basisvariante nach Einsatzgebiet

Durch den hohen Energieaufwand kann auch ein hoher Komfort erreicht werden. Der vorausgesagte Prozentsatz an Unzufriedenen (PPD) aller sechs Komfortauswertungspunkte liegt im Mittel bei 6,8 % und verpasst so nur ganz knapp die höchste Komfortkategorie (<6 % nach EN ISO 7730). Dabei gibt es durchaus erkennbare Unterschiede der einzelnen Sensorpunkte.

In Abbildung 5.15 ist die Spannweite des PMV der sechs Komfortauswertungspunkte erkennbar. Der raummittig gelegene Sensorpunkt 6 ist gegenüber den fassadennahen Sensorpunkten 1 und 2 vergleichsweise wärmer (vgl. Abbildung 5.7, S. 39). Auf individuelle Komfortbedürfnisse der Nutzer kann so durch die Platzwahl eingegangen werden. Vor allem bei kühlen Außentemperaturen unterscheiden sich die Sensorpunkte 1 und 6 deutlich (Abbildung 5.16, S. 50). Wohingegen bei hohen Außentemperaturen alle Komfortpunkte als zu warm gewertet werden müssen.

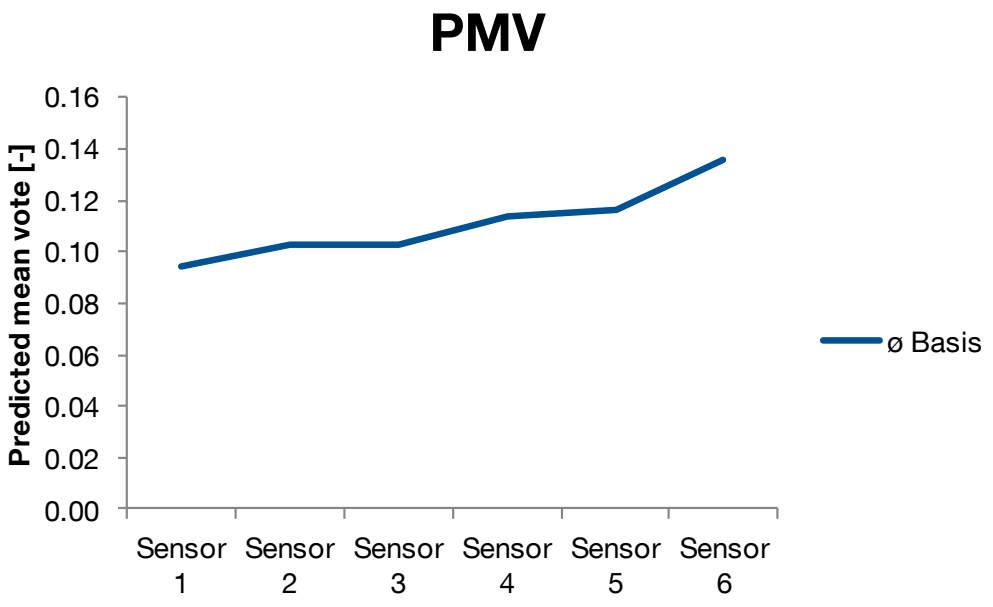


Abbildung 5.15 PMV Auswertung der sechs Komfortauswertungspunkte der Basisvariante

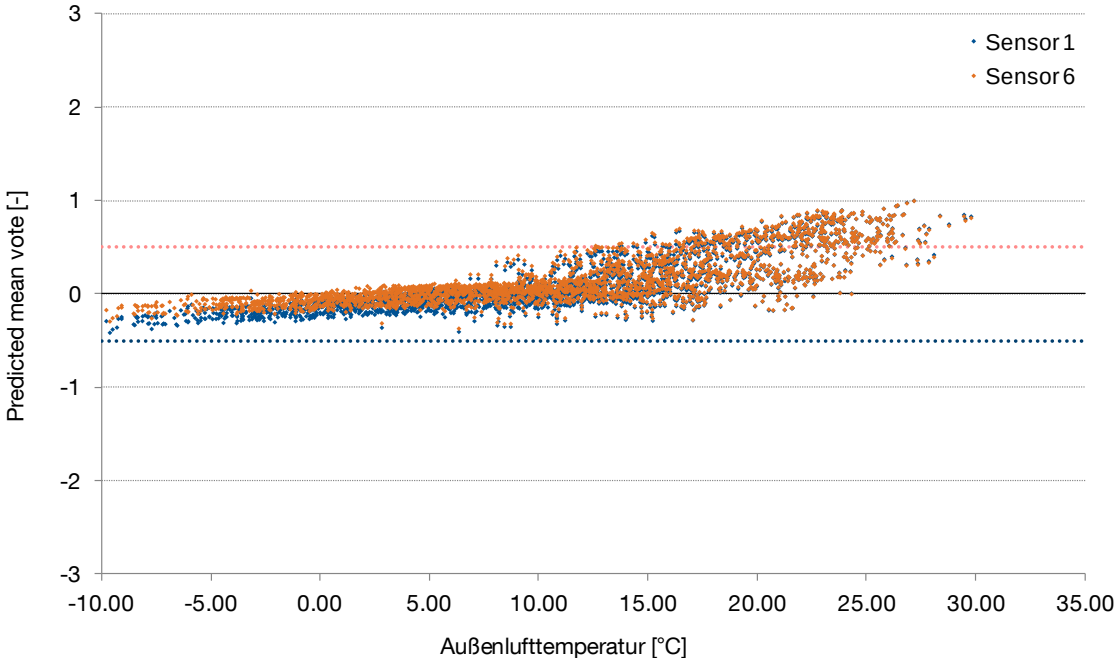


Abbildung 5.16 PMV nach EN ISO 7730 über der Außentemperatur der Sensorpunkte 1 & 6

Nach dem vereinfachten Verfahren nach DIN 4108-2 liegen nur 109 Kh an Übertemperaturgradstunden vor, bei erlaubten 500 Kh (Abbildung 5.17, S. 51). Auch nach DIN EN 15251 werden beide Kriterien erfüllt. Keine Stunde während der Anwesenheit eines Nutzers im Raum weicht um +/-2 K vom Komfortband ab und die Gesamtabweichungsgradstunden liegen mit 38 Kh unter den zulässigen 57 Kh (Abbildung 5.18, S. 51).

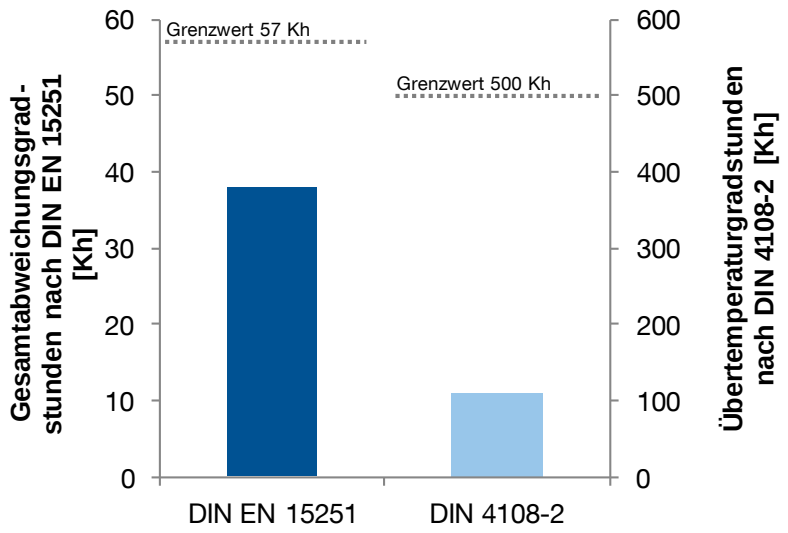


Abbildung 5.17 Gesamtabweichungsgradstunden nach DIN EN 15251 und Übertemperaturgrad-stunden nach DIN 4108-2 der Basisvariante

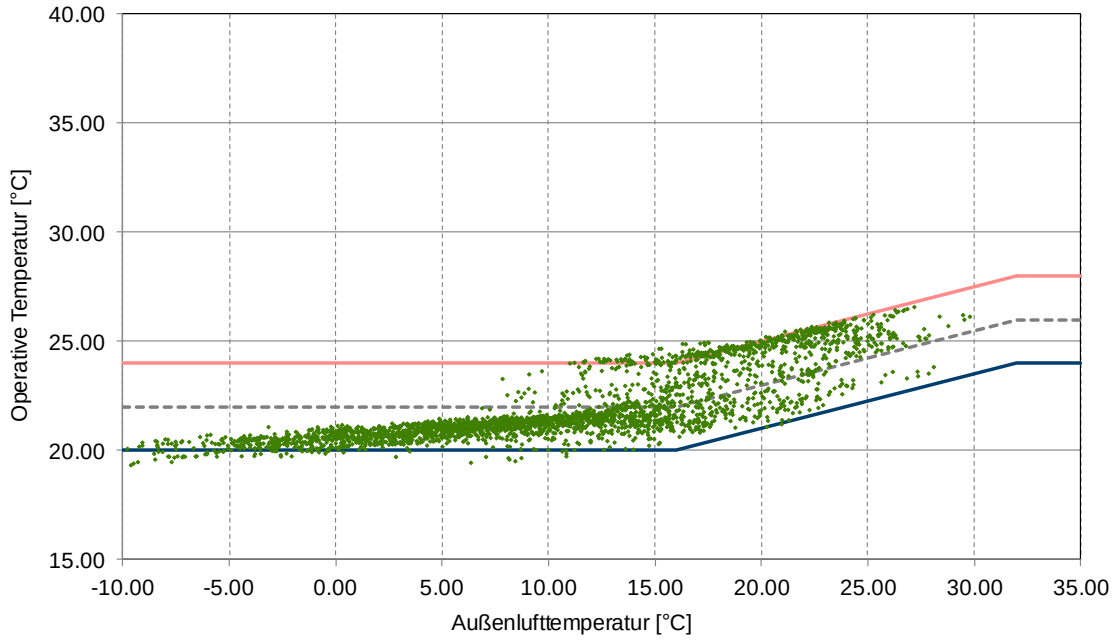


Abbildung 5.18 Behaglichkeit nach DIN EN 15251 der Basisvariante

Wird die Lüftungsanlage anstatt 24 h/7 d nur tagsüber während der Anwesenheit der Nutzer von 7 – 18 Uhr mit 3-fachem Luftwechsel betrieben, kann 28,5 % an Primärenergie eingespart werden. Allein an Heizenergie kann 15,6 kWh/(m²a) eingespart werden. Weiter reduziert sich die Hilfsenergieleistung von 35,5 kWh/(m²a) auf nunmehr 11,6 kWh/(m²a). Durch diese Maßnahme steigt allerdings die benötigte Kühlleistung auf 7,4 kWh/(m²a). Die Energie für die künstliche Beleuchtung bleibt mit 21,0 kWh/(m²a) gleich.

Der Gesamtprimärenergiebedarf beläuft sich somit auf 89,0 kWh/(m²a) (Abbildung 5.19). Die Gesamtabweichungsgradstunden nach DIN EN 15251 erhöhen sich leicht auf 49 Kh, bleiben weiterhin aber unter den zulässigen 57 Kh. Die Übertemperaturgradstunden nach DIN 4108-2 erhöhen sich auf insgesamt 182 Kh (zulässig 500 Kh). Diese Maßnahme ist auch ohne eine dezentrale Steuerung einfach umzusetzen und daher grundsätzlich zu empfehlen.

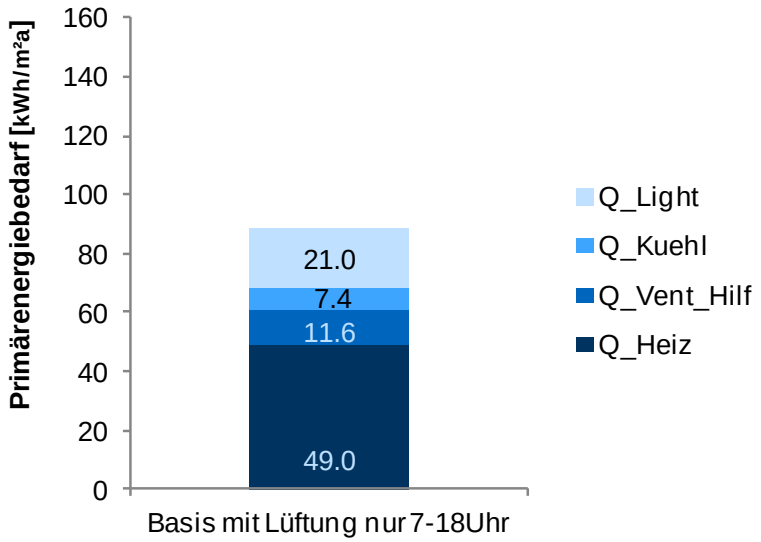


Abbildung 5.19 Primärenergiebedarf pro m² der Basisvariante mit Lüftung nur 7 – 18Uhr

5.2.2 Einzelmaßnahmen zur Energieeinsparung

Bevor in *Kapitel 5.2.3 Variante 1: Dezentral gesteuert mit zentralem Kern, S. 56* das Einsparungspotenzial der Maßnahmen gesammelt aufgezeigt wird, werden nun die Maßnahmen einzeln betrachtet, um deren Einzelpotenziale aufzuzeigen. Tabelle 5.2 zeigt eine Übersicht der einzelnen Maßnahmen auf.

Tabelle 5.2 Ergebnisse der Einzelmaßnahmen

Nur Einzelmaßnahme											
Maßnahme:	Basisvariante	Lüftungsmenge		Licht		Heizung		Jalusie		Nachtlüftung	
		Lüftungsmenge reduziert auf 40 m³/Pers anstatt durchgängig 3 1/h Luftwechsel		Licht nach Nutzerprofil und Helligkeit gesteuert, vorher nur Anwesenheitsgesteuert, & 400/200 lux		Heizung auf 6-18 Uhr begrenzt (vorher 4-20Uhr)		Steuerung angepasst (Winter 300/280, Sommer 130/110, vorher ganzjährig 200/180)		ab Top>25°C; ab 6K Differenz Top-Tamb, => 1 1/h Luftwechsel	
Primärenergiebedarf:											
Heizung	64.6 kWh/m²a	45.5 kWh/m²a	-30%	68.9 kWh/m²a	+7%	58.9 kWh/m²a	-9%	63.6 kWh/m²a	-2%	64.6 kWh/m²a	%
Kühlung	3.4 kWh/m²a	5.8 kWh/m²a	+73%	2.3 kWh/m²a	-32%	3.4 kWh/m²a	%	1.9 kWh/m²a	-44%	3.4 kWh/m²a	%
Hilfsenergie Lüftung	35.5 kWh/m²a	9.9 kWh/m²a	-72%	35.5 kWh/m²a	%	35.5 kWh/m²a	%	35.5 kWh/m²a	%	35.5 kWh/m²a	%
Licht	21. kWh/m²a	21. kWh/m²a	%	10. kWh/m²a	-52%	21. kWh/m²a	%	21. kWh/m²a	%	21. kWh/m²a	%
Gesamt	**124.5 kWh/m²a**	**82.2 kWh/m²a**	-34%	**116.7 kWh/m²a**	-6%	**118.8 kWh/m²a**	-5%	**122. kWh/m²a**	-2%	**124.5 kWh/m²a**	%
Gesamtabweichungsgradstunden:											
DIN EN 15251	38 Kh	44 Kh		35 Kh		64 Kh		22 Kh		38 Kh	
DIN 4108-2: Klimaregion A	109 Kh	188 Kh		83 Kh		108 Kh		64 Kh		109 Kh	

Lüftungsmenge

Eine Reduzierung der Frischluft auf 40 m³/Person anstatt einem durchgängigen 3-fachen Luftwechsel zeigt dabei das größte Einzeleinsparpotenzial. Hierdurch können 34 % des Primärenergiebedarfes eingespart werden. Dabei nimmt zwar der Kühlenergiebedarf leicht zu (auf 5,8 kWh/(m²a)), allerdings können im Heizenergiebedarf 19,1 kWh/(m²a) und im Hilfsenergiebedarf der Lüftung sogar 25,6 kWh/(m²a) eingespart werden. Übertemperaturgradstunden und Gesamtabweichungsgradstunden nehmen dabei ebenfalls leicht zu.

Licht

Wird das Licht nicht immer sofort im ganzen Büro, sondern nur nutzerabhängig angeschaltet und werden die Schwellenwerte auf 400/200 lux gesenkt, ergibt sich daraus eine Energieeinsparung von 6 %. Maßgeblich verringert sich der Primärenergiebedarf der künstlichen Beleuchtung von 21,0 kWh/(m²a) auf 10,0 kWh/(m²a). Dennoch steigt

somit der Heizenergiebedarf leicht, während zugleich der Kühlenergiebedarf leicht sinkt. Der Komfort verbessert sich durch diese Maßnahme.

Heizung

Eine Abfrage der Nutzeranwesenheit mittels einer dezentralen Steuerung führt zu einer möglichen Verlängerung der Nachtabsenkung um 4 h. Von 18 Uhr bis morgens um 6 Uhr wird daher die Innenraumtemperatur auf 17 °C abgesenkt. Durch diese Maßnahme kann 5 % des Primärenergiebedarfes relativ zur Basisvariante eingespart werden. Die Einsparung beläuft sich dabei ausschließlich auf den Heizenergiebedarf. Die Gesamtabweichungsgradstunden verschlechtern sich dadurch auf 64 Kh/a und liegen so minimal über der zulässigen Grenze von 57 Kh/a. Als Einzelmaßnahme müssten somit weitere Anpassungen vorgenommen werden.

Sonnenschutz

Die Anpassung der Jalousien auf unterschiedliche Regelung im Sommer wie im Winter führt zu einer Energieeinsparung von 2 %. Die erforderliche Kühlenergie kann dadurch nahezu halbiert werden (-44 %) und auch der Heizbedarf sink leicht.

Nachtlüftung

Die Nachtlüftung als Einzelmaßnahme bringt in der Basisvariante keine Einsparungen. Auch verändert sie als Teilmaßnahme in Variante 1 des Gesamtprimärenergiebedarfes nichts. Die Einzelenergiebedarfe verändern sich dabei allerdings leicht. Während Kühlenergiebedarf eingespart wird, steigt hierfür der Aufwand für die Lüftungsanlage, was sich indes ausgleicht. Könnte die Nachtlüftung allerdings über Fensteröffnungen umgesetzt werden, könnte eine Nachtlüftung durchaus Einsparpotenzial entfalten, dennoch fehlen hier im Demonstratorraum elektrisch gesteuerte Fenstermotoren.

In Abbildung 5.20 ist eine Übersicht über die Einsparpotenziale der Einzelmaßnahmen zu sehen. Aktiviert man nun anschließend alle Einzelmaßnahmen, erhält man die Steuer-und Regelungsstrategie von Variante 1. Es ist zu erkennen, dass sich die Einzelmaßnahmen gegenseitig ergänzen und so das hohe Gesamteinsparpotenzial von Variante 1 zustande kommt.

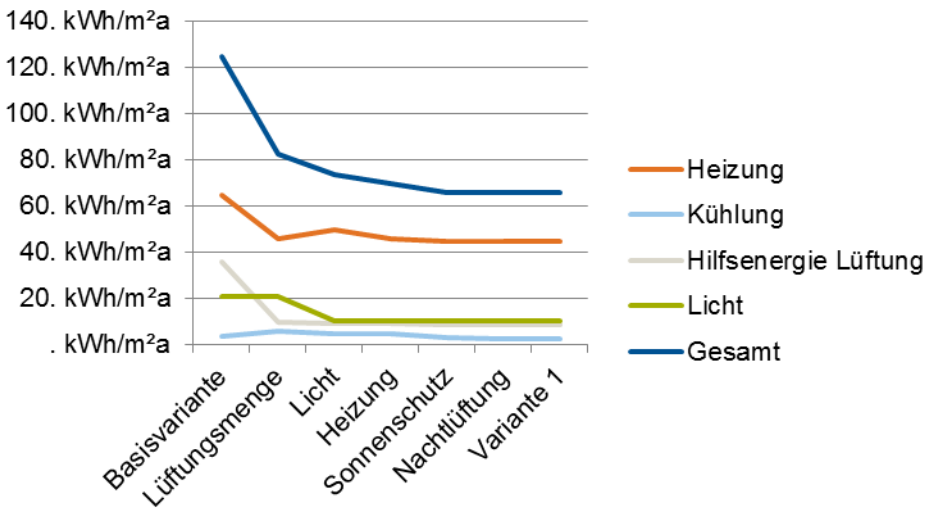


Abbildung 5.20 Primärenergieverbrauch der Maßnahmen pro m²

5.2.3 Variante 1: Dezentral gesteuert mit zentralem Kern

In der dezentralen Variante mit dem zentralen Steuerungselement kann der Nutzer die einzelnen Komponenten individuell steuern, dennoch sind gewisse Grundeinstellungen in die Regelung implementiert. In der TRNSYS-Simulation wird dies wie folgt abgebildet.

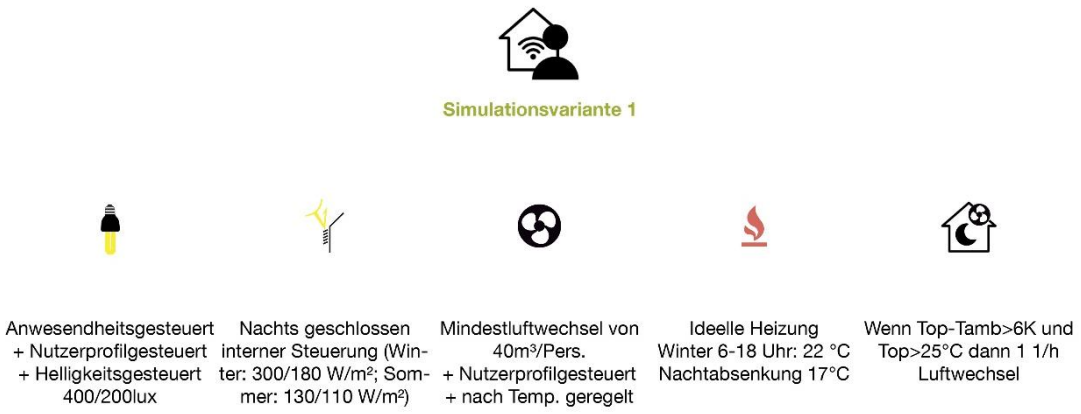


Abbildung 5.21 Übersicht Simulationsparameter Variante 1

Durch die verschiedenen Maßnahmen an Lüftung, Heizung, Sonnenschutz und künstlicher Beleuchtung kann der **Primärenergiebedarf um 47 % auf 65,8 kWh/(m²a)** gesenkt werden (Abbildung 5.22; S. 57). Die größte Energieeinsparung von 20,2 kWh/(m²a) kann in der Kategorie Heizen erzielt werden. Durch einen deutlich geringeren Luftwechsel nimmt außerdem auch die Hilfsenergie der Lüftungsanlage um 75 % auf nun mehr 12,9 kWh/(m²a) ab. Vor allem durch die angepasste Steuerung des Sonnenschutzes kann der Kühlbedarf um 24 % auf 2,6 kWh/(m²a) reduziert werden. Auch im Verbrauch der künstlichen Beleuchtung können Einsparungen größer 50 % erzielt werden und so der Energiebedarf der Beleuchtung auf 10,0 kWh/(m²a) gesenkt werden.

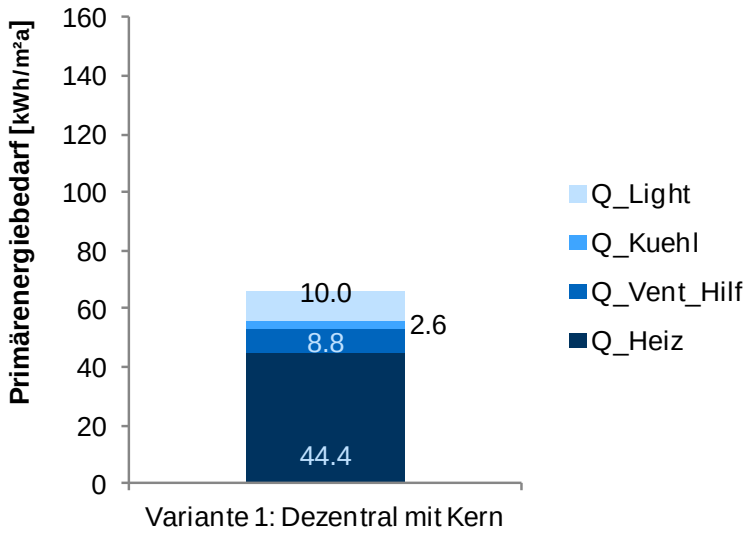


Abbildung 5.22 Primärenergiebedarf pro m² von Variante 1

Der in Abbildung 5.23, S. 58 dargestellte Energiebedarf im Jahresverlauf der einzelnen Bereiche zeigt deutlich den niedrigeren Heizbedarf (rote Linie), den nun nicht mehr linearen, sondern pulsierenden Hilfsenergiebedarf der Lüftung (blaue Linie), den reduzierten Bedarf an künstlicher Beleuchtung, vor allem in den Sommermonaten (gelbe Linie) und den geringen sommerlichen Kühlbedarf (hellblaue Linie) (vgl. Abbildung 5.14, S. 48).

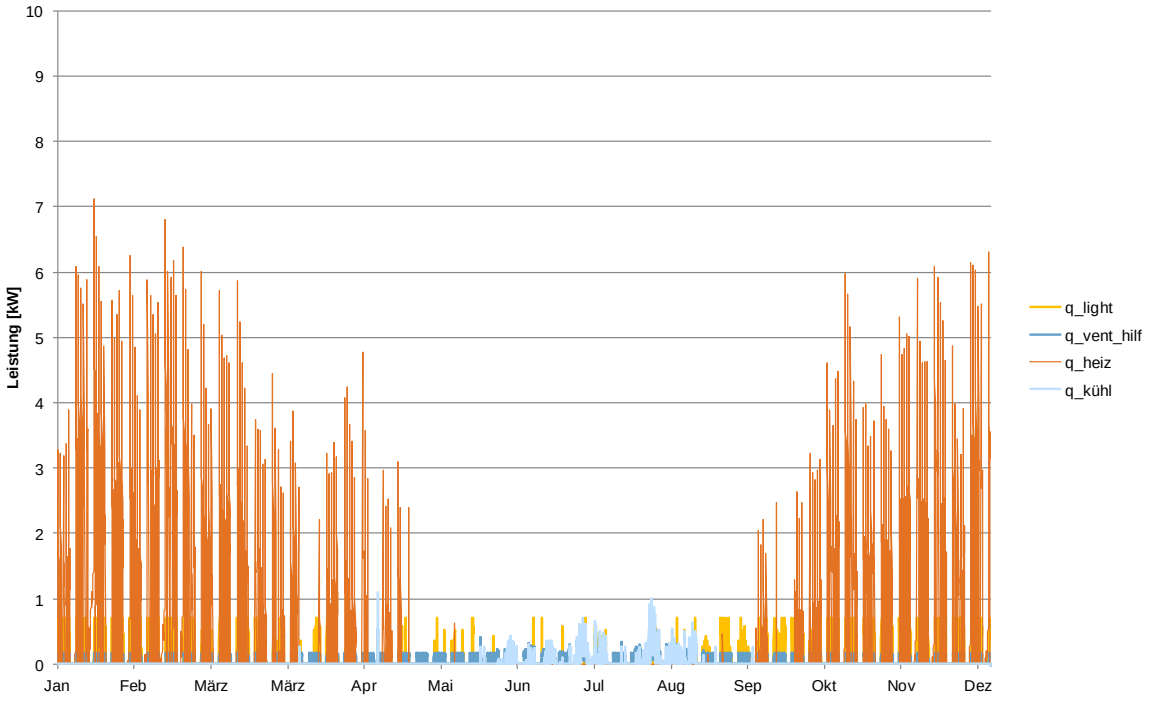


Abbildung 5.23 Primärenergiebedarf pro m² der Variante 1

Der Komfort leidet dabei keinesfalls unter den Energieeinsparmaßnahmen. Vielmehr reduzieren sich die Übertemperaturgradstunden nach DIN 4108-2 sogar auf 105 Kh/a und die Gesamtabweichungsgradstunden nach DIN EN 15251 von 38 Kh/a in der Basisvariante auf nun 31 Kh/a im Jahresverlauf der Variante 1. Abbildung 5.24, S. 59 zeigt für jede einzelne Anwesenheitsstunde die operative Raumtemperatur (grüne Punkte) angetragen über den Verlauf der Außentemperatur. Nahezu alle Stunden liegen innerhalb des von der DIN EN 15251 geforderten Komfortbandes. Die maximale Abweichung beträgt dabei -0,85 K, wobei 99 h im Jahr minimal über dem Komfortband und 98 h minimal darunter liegen.

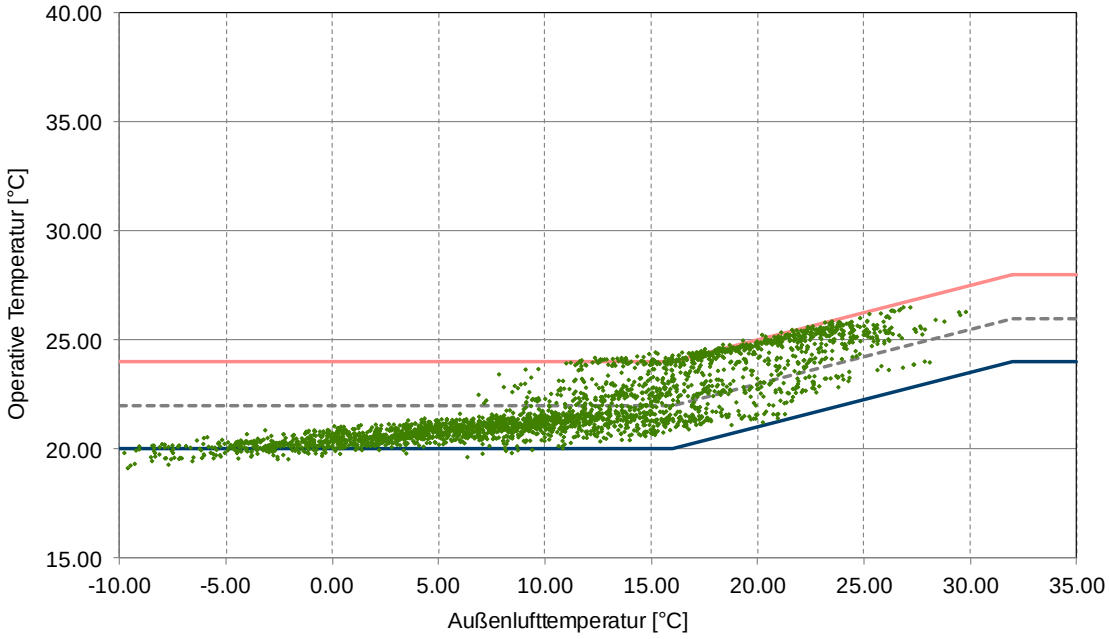


Abbildung 5.24 Behaglichkeit nach DIN EN 15251 der Variante 1

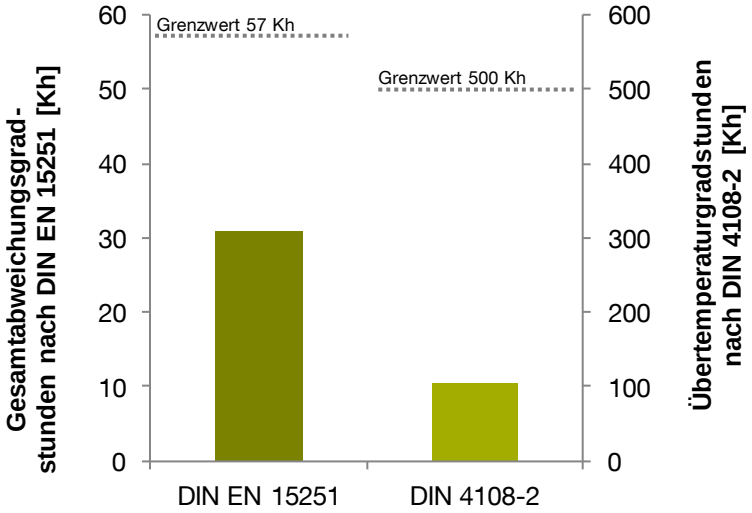


Abbildung 5.25 Gesamtabweichungsgradstunden nach DIN EN 15251 und Übertemperaturgrad-stunden nach DIN 4108-2 der Variante 1

5.2.4 Variante 2: Dezentral ausschließlich vom Nutzer gesteuert

Die ganzheitlich dezentrale Variante stellt ein Szenario einer ausschließlich vom Nutzer gesteuerten Regelung dar. Der Nutzer hat Zugriff auf die Regelung der einzelnen Komponenten, was weiterhin dazu führt, dass auch ein Fehlverhalten des Nutzers abgebildet werden muss. Ein zentrales Steuerungselement existiert in dieser Variante nicht.

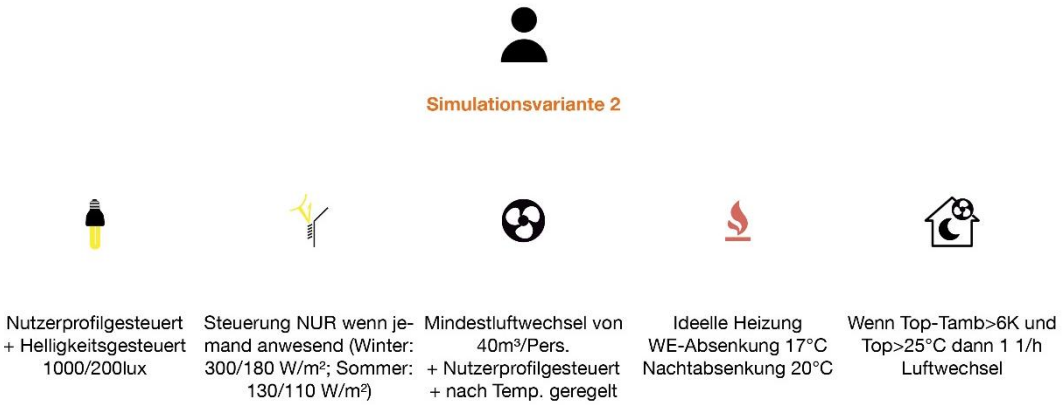


Abbildung 5.26 Übersicht Simulationsparameter Variante 2

Um das dezentrale Verhalten des Nutzers und eine Variabilität im Tagesverlauf repräsentativ für unterschiedliches Verhalten jedes Individuums im Büroraum detaillierter abbilden zu können, wurde ein eigenes, mit Python entwickeltes Programm implementiert. Dieses Prinzip ersetzt das bisher verwendete, sich wöchentlich wiederholende Anwesenheitsprofil nach DIN 15232. Basierend auf 12 eigens definierten, typischen Tagesprofilen (Abbildung 5.27, S. 61) wird mittels der Anzahl der Nutzer in einem Büroraum für jede Woche im Jahr ein individuelles, wöchentliches Arbeitsprofil erstellt. In Summe ergeben die Arbeitsstunden über das Jahr mit 2214 h/a nahezu dieselbe Anzahl an Arbeitsstunden, als das Standardanwesenheitsprofil mit 2174 h/a (Abweichung <2 %), dennoch weicht die Verteilung der Arbeitsstunden deutlich vom Standardprofil ab.

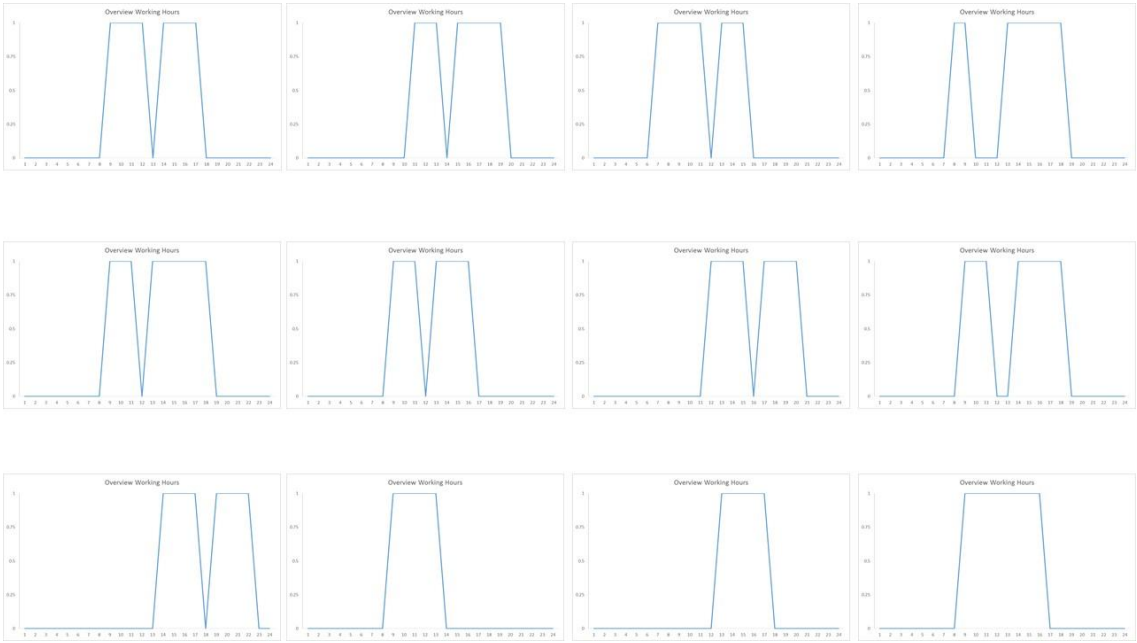


Abbildung 5.27 Überblick typisch, zufällig gewählte Arbeitsprofile

All diese Maßnahmen und Regelungsstrategien führen dazu, dass der Energiebedarf gegenüber Variante 1 wieder deutlich steigt. Mit einem 31 % höheren Energiebedarf kommt **Variante 2 auf 85,9 kWh/(m²a) Primärenergiebedarf**. Vor allem der Mehrbedarf gegenüber Variante 1 an Kühlenergie (+362 %) sowie Strom für die Beleuchtung (+113 %) schlagen hier ins Gewicht (Abbildung 5.28, S. 62). Besonders die Steuerung der künstlichen Beleuchtung ohne zentralen Kern führt so zu einem erhöhten Energieaufwand.

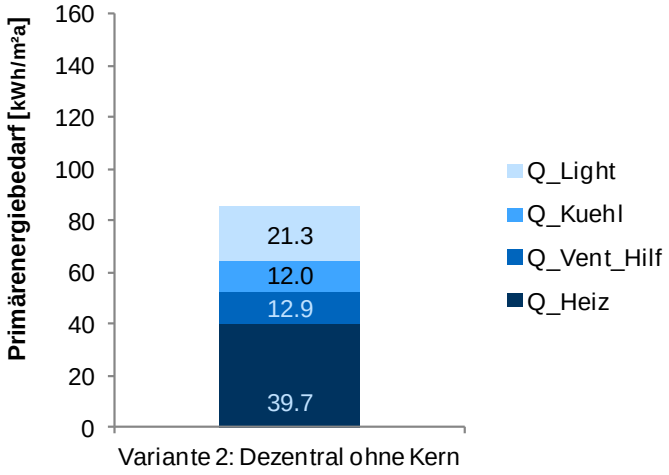


Abbildung 5.28 Primärenergiebedarf pro m² von Variante 2

Im Jahresverlauf der einzelnen Bereiche kann man in Abbildung 5.29 den erhöhten Kühlenergiebedarf (hellblaue Linie) sowie den Energiebedarf für die künstliche Beleuchtung (gelbe Linie) gegenüber Variante 1 in Abbildung 5.23, S. 58 erkennen.

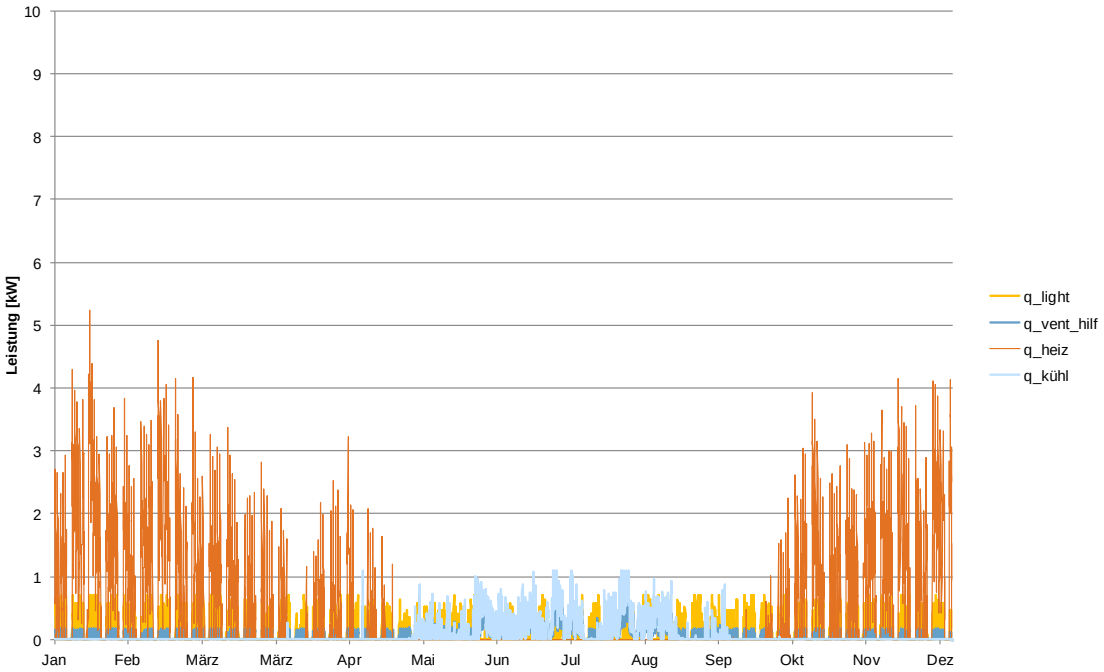


Abbildung 5.29 Primärenergiebedarf pro m² der Variante 2 nach Einsatzgebiet

Durch eine komplett dezentrale Steuerung verschlechtert sich der Komfort sowohl gegenüber der Basisvariante, als auch gegenüber Variante 1. Die Gesamtabweichungsgradstunden nach DIN EN 15251 steigen auf 54 Kh und liegen damit nur noch knapp unter der zulässigen Grenze (Abbildung 5.30).

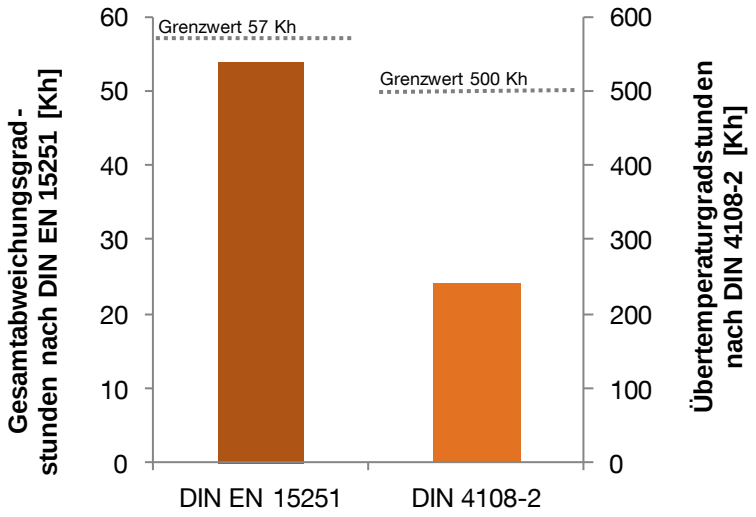


Abbildung 5.30 Gesamtabweichungsgradstunden nach DIN EN 15251 und Übertemperaturgradstunden nach DIN 4108-2 der Variante 2

5.3 Vergleich und Interpretation der Variantenergebnisse

In den vorangegangenen Kapiteln wurden die verschiedenen Varianten und auch die Zwischenschritte der Einzelmaßnahmen beschrieben und ausgewertet. Um eine zentrale Regelung mit den beiden dezentralen Strategien zu vergleichen werden sie nun gegenübergestellt (Abbildung 5.31, S. 64). Während die dezentrale Variante 1 (mit zentralem Kern) gegenüber der Basisvariante den Energiebedarf nahezu halbiert, erhöhte sich in Variante 2, einer komplett dezentralen Variante ohne zentralen Kern, der Energiebedarf wieder um 30 % im Vergleich zu Variante 1. Gegenüber der Basisvariante liegt der Energiebedarf von Variante 2 dennoch um 31 % niedriger.

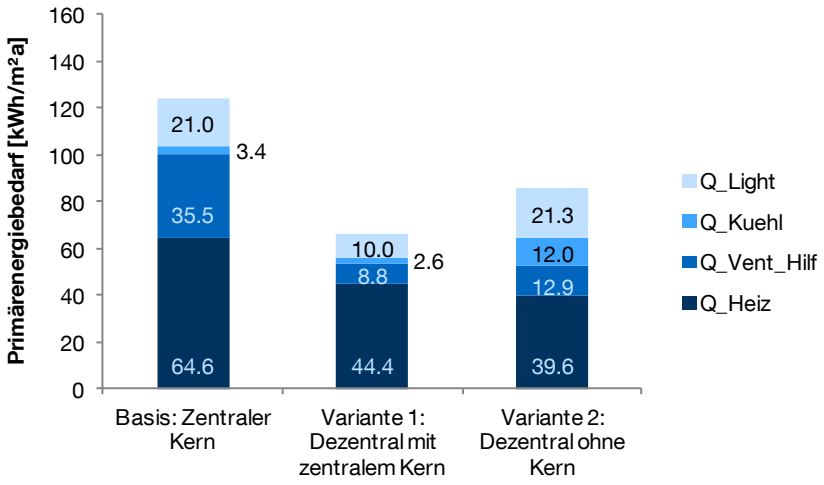


Abbildung 5.31 Primärenergiebedarf pro m² im Vergleich

Vor allem Heizenergie und Hilfsenergie der Lüftung kann durch die Dezentralisierung eingespart werden. Energie für künstliche Beleuchtung kann hingegen nur in Variante 1 reduziert werden. Die benötigte Kühlenergie steigt sogar durch eine Dezentralisierung ohne zentrale Steuerung (Variante 2).

Durch die hohen Energieeinsparungen der Variante 1 leidet der Komfort allerdings nicht. Nach folgender Abbildung 5.32 liegen die durchschnittlichen PPD-Werte aller Sensorpunkte der Basisvariante, sowie der Variante 1, bei ca. 7 %. In Variante 2 steigt der PPD um knapp 1 % gegenüber der Basisvariante, bleibt aber ebenfalls im akzeptablen Bereich der Komfortkategorie B der DIN EN ISO 7730 (6 – 10 %).

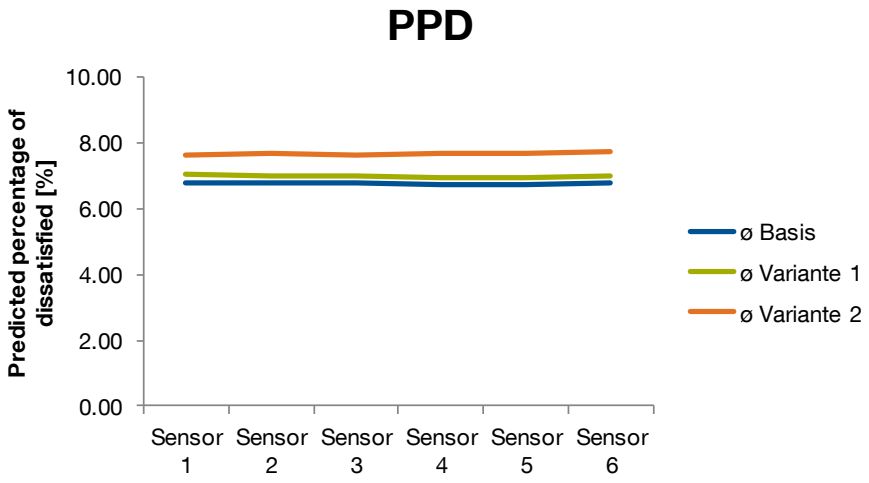


Abbildung 5.32 PPD-Auswertung der sechs Sensorpunkte im Vergleich

Die Unterschiede der einzelnen Sensorpunkte der einzelnen Simulationsvarianten sind nach Abbildung 5.33 größer als der Unterschied zwischen der Basisvariante und Variante 1. Dies bedeutet, die Platzwahl hat einen größeren Einfluss auf den individuellen Komfort als eine Umstellung der Gebäudesteuerung von zentral zu dezentral. Personen mit einem eher wärmeren Komfortbedürfnis sollten sich zum Gebäudeinneren hin orientieren, Personen die es gerne etwas kühler bevorzugen Richtung Fassade.

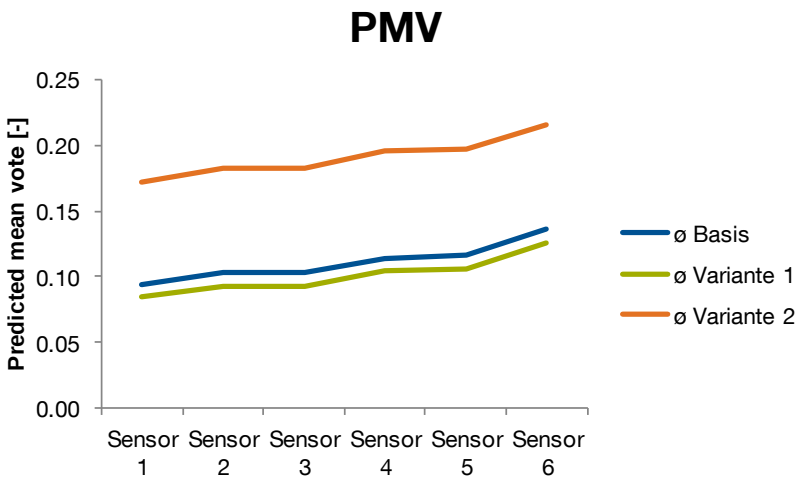


Abbildung 5.33 PMV-Auswertung der sechs Sensorpunkte im Vergleich

Alle drei Varianten bleiben unter dem Grenzwert an Gesamtabweichungsgradstunden nach DIN EN 15251, wobei auch hier Variante 1 am besten abschneidet (siehe Abbildung 5.34). Hier liegen die wenigsten Stunden außerhalb des Komfortbandes. Während in der Basisvariante insgesamt 38 Kh außerhalb liegen, sind es in Variante 2 hingegen insgesamt 54 Kh. In Variante 1 liegen 31 Kh außerhalb des Komfortbandes.

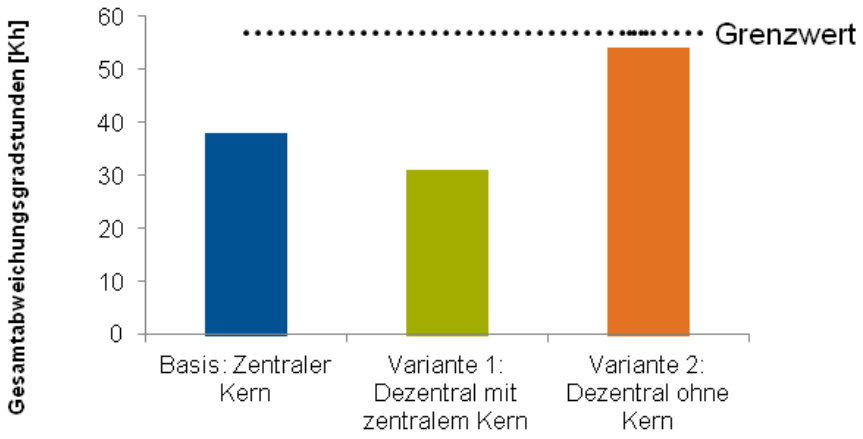


Abbildung 5.34 Gesamtabweichungsgradstunden nach DIN EN 15251 im Vergleich

In folgender Abbildung 5.35 lässt sich erkennen:

Variante 2 besitzt grundsätzlich etwas höhere operative Innenraumtemperaturen. Weiter ist zu ersehen, wie sich die Gesamtabweichungsgradstunden der Variante 2 hauptsächlich aus Übertemperaturgradstunden bilden, während in Variante 1 Über- und Untertemperaturgradstunden nahezu ausgeglichen sind.

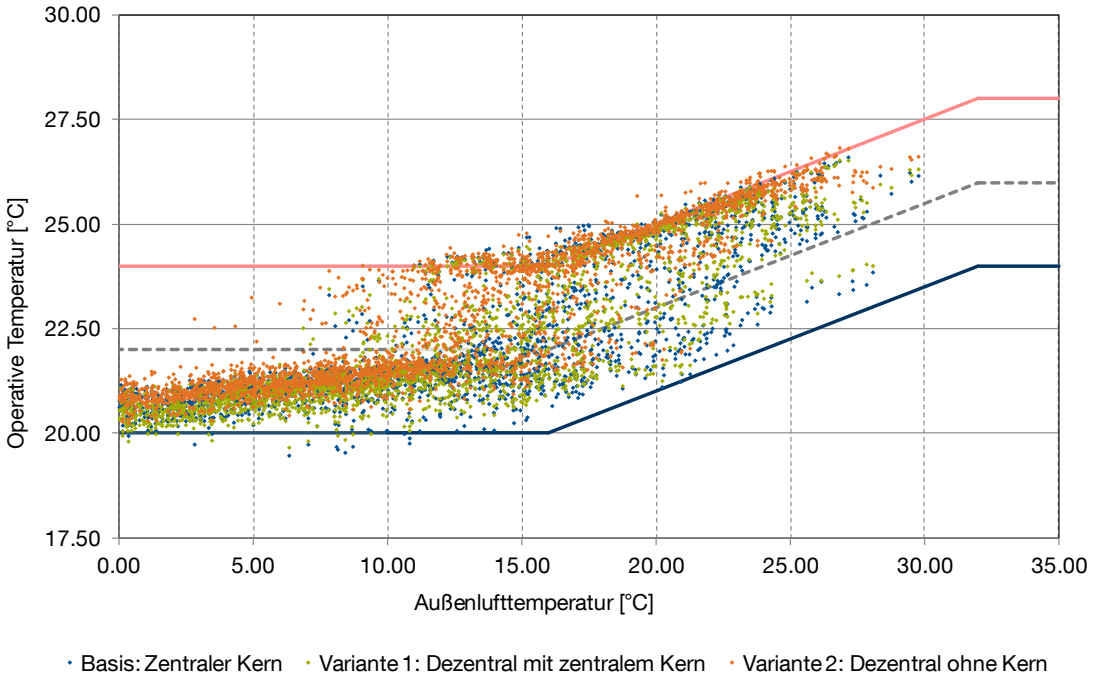


Abbildung 5.35 Behaglichkeit nach DIN EN 15251 im Vergleich

5.4 Einfluss der Klimaveränderung

Vor dem Hintergrund der Klimaveränderung wurde der Einfluss zukünftigen Wetters am Standort Stuttgart untersucht. Dabei wurden dem Wetterfile DE-Stuttgart-107370.tm2 sowohl ein mit der Software Meteonorm [24] erzeugtes Wetterfile für 2050 sowie 2100 gegenübergestellt. Die Jahresmitteltemperatur steigt demnach von aktuellen 9,0 °C auf 10,9 °C im Jahr 2050 und 12,8 °C im Jahr 2100. Die Minimal- und Maximaltemperaturen steigen ebenfalls von -13,0 °C auf -11,6 °C und -9,9 °C bzw. von 31,7 °C auf 32,8 °C und schließlich 34,7 °C (Abbildung 5.36, S. 68).

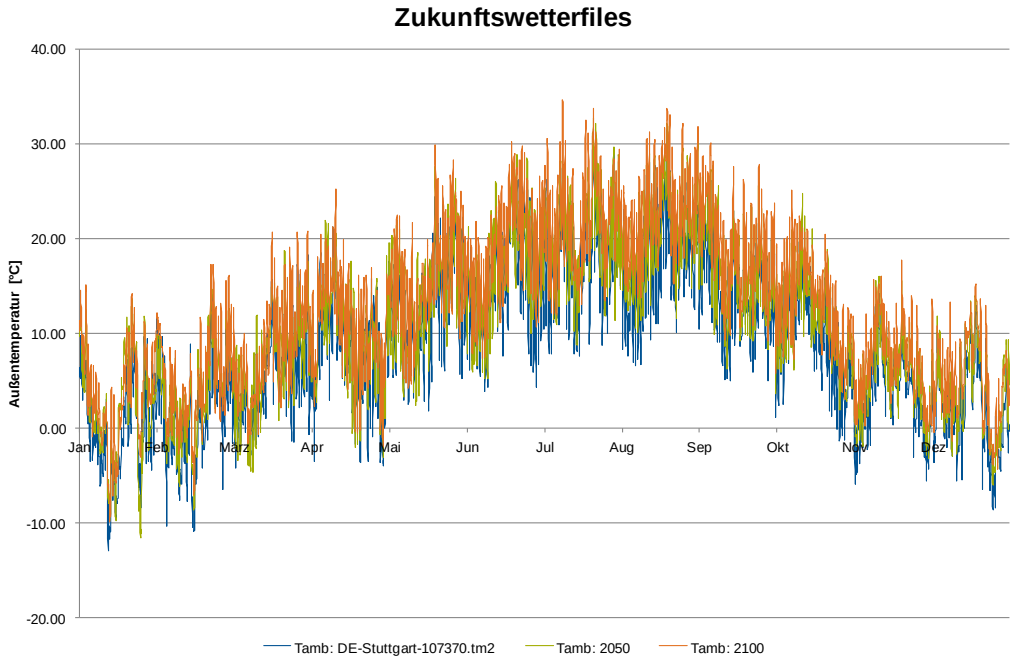


Abbildung 5.36 Außentemperatur Stuttgart aktuell/2050/2100

Durch die steigenden Außentemperaturen sinkt auf der einen Seite der Heizenergiebedarf, auf der anderen Seite steigt der Kühlenergiebedarf. Da in der Basisvariante, bedingt durch den hohen Luftwechsel, der Heizenergiebedarf dominiert, sinkt in dieser Variante der Gesamtprimärenergiebedarf (bis 2050 um 7 % und bis 2100 insgesamt um 8 %). Sowohl in Variante 1 als auch in Variante 2 sinkt der Gesamtprimärenergiebedarf bis zum Jahr 2050 (um 5,5 % bzw. um 1 %) hingegen bis 2100 steigt er (insgesamt um 2,5 % in Variante 1 und um 7,5 % in Variante 2). Es zeigt sich, dass Variante 2 weniger robust gegenüber Klimaveränderung ist als Variante 1. Obwohl die Basisvariante als einzige Variante bis 2100 sinkt, liegt der Primärenergiebedarf dennoch deutlich über den dezentralen Varianten.

Abbildung 5.37 veranschaulicht die zukünftig zu erwartenden Primärenergiebedarfe und stellt diese gegenüber.

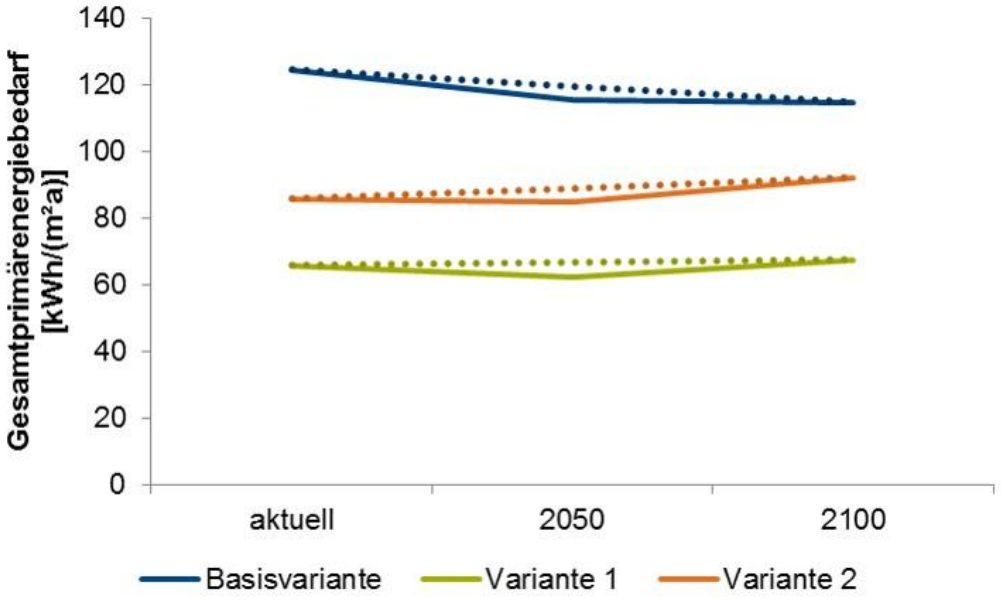


Abbildung 5.37 Primärenergiebedarf mit Zukunftswetter

Mit steigenden Außentemperaturen steigen auch die Übertemperaturgradstunden aller Simulationsvarianten. Bei Verwendung des Wetterdatensatzes für das Jahr 2050 überschreitet die Basisvariante und Variante 2 bereits den zulässigen Grenzwert nach DIN EN 15251. Wird der Wetterdatensatz für 2100 zugrunde gelegt, übersteigt diesen auch Variante 1 (Abbildung 5.38, S. 70). Untertemperaturgradstunden spielen dabei dann kaum mehr eine Rolle. Eine erhöhte Kühlleistung bzw. optimierte passive Nachtauskühlung wären Möglichkeiten die sommerliche Überhitzung in den Griff zu bekommen.

Da der Fokus dieser Forschungsarbeit hauptsächlich auf dem Potenzial einer dezentralen Gebäudesteuerung liegt, werden die Klimaauswirkungen auf die verschiedenen Simulationsvarianten an dieser Stelle nicht tiefergehender ausgewertet.

Die Analyse der Gesamtabweichungsgradstunden nach DIN EN 15251 mit Zukunftswetterdatensätzen zeigt dennoch, dass auch in Zukunft eine dezentrale Gebäudesteuerung zu niedrigeren Primärenergiebedarfen bei gleichzeitig verbessertem Komfort führen. Man kann also bestätigen, dass eine dezentrale Steuerung im Vergleich zu einem zentralen System robuster in Bezug auf die Veränderung des Klimas reagiert.

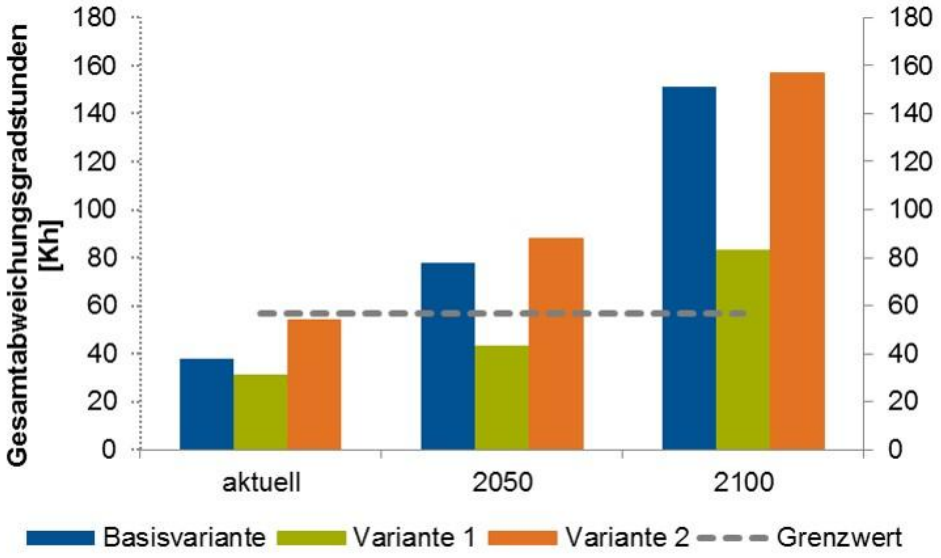


Abbildung 5.38 Gesamtabweichungsgradstunden mit Zukunftswetter

6. Zusammenfassung

Im folgenden Kapitel 6 soll abschließend eine Zusammenfassung zum Forschungsprojekt erfolgen. Zunächst werden in Kapitel 6.1 die Ergebnisse zusammengefasst und interpretiert sowie Empfehlungen gegeben, welche sich unmittelbar aus den Ergebnissen des Forschungsprojektes ableiten. Anschließend werden in Kapitel 6.2 das Fazit und die Grenzen des Forschungsprojektes aufgezeigt. Ein Ausblick und welche zusätzlichen Potenziale aus den aktuellen Forschungen hervorgehen bzw. wie das aktuelle Forschungsvorhaben weiter voranschreiten könnte, veranschaulicht Kapitel 6.3.

6.1 Interpretation der Erbgebnisse und Empfehlungen

Zunächst werden die generellen Ergebnisse des Forschungsprojektes aufgezeigt. Anschließend werden die wesentlichen Schritte sowie die Hürden bei der Erstellung und der Implementierung der Applikation aufgezeigt und interpretiert. Es wird erläutert ob und wie eine dezentrale Bottom-Up Regelung umsetzbar ist. An geeigneter Stelle werden Empfehlungen aus den Ergebnissen abgeleitet. Zuletzt sollen nochmals die gesamten Ergebnisse in Bezug auf die potenziellen Energieeinsparungen und die Komfortsteigerung durch eine dezentrale Steuerung in Form der thermisch, dynamischen Simulation mit TRNSYS erläutert werden.

Forschungskonzept

Die eingangs gestellt Hypothese, dass ein dezentral gesteuertes Gebäudetechniksystem im Vergleich zu einem Top-Down geregelten System energieeffizienter und thermisch komfortabler für den Nutzer ist, kann bestätigt werden. Dennoch ist aus der Analyse hervorgegangen, dass auf ein zentrales Element nicht zu verzichten ist, denn eine komplett dezentrale Steuerung stellt keine Korrekturhilfe für das Fehlverhalten des Nutzers bereit. Weiter ist ein zentrales Element essenziell für das Verwenden einer

profilabhängigen Steuerung. Allgemein lässt sich festhalten, dass eine dezentrale Steuerung und Regelung heutzutage prinzipiell umsetzbar ist und dass die benötigten Sensoren, Softwaretools und Regelungselemente auf dem Markt vorhanden sind und eine entsprechende Implementierung möglich machen. Dies lässt die Aussage zu, dass durch einen Zugriff auf diese Komponenten durch den Nutzer der Komfort zoniert gesteigert werden kann. Das Forschungsprojekt zeigt auch, dass durch die Kombination dieses Ansatzes mit einem zentralen Steuerungselement auch Energie eingespart werden kann. Nicht nur durch eine dezentralere Steuerung sondern bereits durch eine intelligentere zentrale Steuerung der Gebäudetechnik kann Energie eingespart werden. Unter energetischem Gesichtspunkt sollte dies auch der erste Schritt sein, da oftmals keinerlei Umrüstung der Gebäudetechnik vonnöten ist. Fortführend ist festzuhalten, dass durch eine dezentralere Auslegung der Gebäudetechnik noch weiter Energie eingespart und zugleich der Komfort gesteigert werden kann.

Applikation

Auch die Implementierung der Applikation kann durchgeführt werden und somit ist die Hypothese, dass durch eine IoT-basierte Applikation ein dezentrales Verhalten in Bezug auf die Gebäudetechnik in einem Bürogebäude implementiert werden kann, bestätigt. Dies hat zur Folge, dass der Nutzereinfluss in einem Bürogebäude gesteigert werden kann, da durch die Applikation eine Steuerung des Sonnenschutzes, der künstlichen Beleuchtung, der Lüftungsanlage sowie des Heizsystems ermöglicht wird.

Durch die Kombination der Smart-Devices mit den implementierten Bluetooth-Beacons ist es möglich innerhalb einer Komfortzone unterschiedliche Wünsche zu erkennen und dementsprechende Kompromisse unter den Nutzern auszuhandeln. Durch eine ausreichend akkurate Lokalisierung des Nutzers im Raum lässt sich dieser Prozess je nach Zone automatisiert wiederholen. Weiterhin bieten die Bluetooth-Beacons den Vorteil, dass die Kommunikation und Lokalisierung zwischen den Geräten abseits des bestehenden Netzwerksystems eines Unternehmens realisiert werden kann, d.h. die Implementierung eines dezentralen Steuerungssystems wird dadurch deutlich vereinfacht. Durch die Anzahl und die individuelle Positionierung der Beacons ist der Betreiber zudem in der Lage je nach Größe und Beschaffenheit der internen Räumlichkeiten modu-

lar zu reagieren, so dass die einzelnen Zonen selbst frei definiert werden können (Steigerung der Flexibilität). Lediglich der Zugriff auf die einzelnen Komponenten muss somit über das lokale Netzwerk durchgeführt werden, um eine individuelle Steuerung der Gebäudetechnik zu verwirklichen.

Simulation

Auf Ebene der Simulation kann die Hypothese ebenso bestätigt werden. Die Simulationsergebnisse zeigen, dass eine Steigerung des Komforts und gleichzeitig eine Energieeinsparung erzeugt werden kann. Es zeigt sich auch, dass ein komplett dezentrales Verhalten ohne Steuerung durch ein zentrales Element nicht ideal ist, da der Nutzer sich nicht zu jedem Zeitpunkt richtig verhält und somit Komfort eingebüßt und unnötig Energie verbraucht wird. Grundsätzlich wurde durch die Basisvariante versucht, eingeschränkt durch notwendige Annahmen, die reale Situation im Büroraum abzubilden. Weiter wurden zwei Simulationsvarianten analysiert, die sich in ihrer Regelungsstrategie unterscheiden. Zum einen basiert die Steuerung auf dem Nutzer, welcher dezentral über sein Smartphone die Gebäudetechnikkomponenten an seine thermischen Bedürfnisse anpassen kann, bei Abwesenheit des Nutzers aber dennoch ein zentrales Steuerungselement die Steuerung übernimmt. Die zweite Simulationsvariante bildet ein rein dezentrales Verhalten des Nutzers ab, ohne ein zentrales Element.

Die Simulationsergebnisse zeigen auf, dass die dezentrale Variante mit einem zentralen Steuerungselement die thermisch komfortabelste und energetisch effizienteste Lösung darstellt. Nummerisch bedeutet dies im Vergleich zur Basisvariante, dass der Komfort in Form der Gesamtabweichungsgradstunden um 18,5 % auf 31 Kh sinkt (in diesem Fall 57 Kh zulässig) und gleichzeitig der Primärenergiebedarf von 124,5 kWh/(m^{2}a) auf 65,8 kWh/(m^{2}a) um 47 % reduziert wird. Ein komplett dezentrales Verhalten reduziert den Energiebedarf im Vergleich zur Basisvariante nur um 31 %; wobei der Komfort im Raum in Bezug auf die Gesamtabweichungsgradstunden sogar um 6 % auf 54 Kh ansteigt.

Weiter wurde gezeigt, dass durch die in Zukunft zu erwartenden erhöhten Temperaturen, resultierend durch den Klimawandel, eine dezentrale Regelung mit zentralem Kern

robuster gegenüber den klimatischen Veränderungen ist, als die Basisvariante mit einer zentral geregelten Steuerung. Die dezentrale Variante mit zentralem Steuerungselement verzeichnet folglich weniger Komforteinbußen und besitzt einen geringeren Anstieg an benötigter Energie, im Vergleich zur komplett zentralen bzw. komplett dezentralen Steuerung.

6.2 Fazit und Grenzen des Projektes

In diesem Abschnitt soll ein Fazit gezogen und aufgezeigt werden inwieweit Einschränkungen hinsichtlich des allgemeinen Forschungskonzeptes sowie Einschränkungen und Annahmen in Bezug auf die thermische Simulation auftraten. Des Weiteren werden Hindernisse und Herausforderungen bei der Implementierung der Applikation angesprochen.

Forschungskonzept

Generell ist festzuhalten, dass das Forschungsprojekt die Potenziale einer dezentralen Steuerung der Gebäudetechnik nur für eine Nutzungsart und vor allem nur in Bezug auf einen Standort und damit resultierend nur für eine Klimazone und dessen Orientierung evaluiert hat. Weiter wurde das Potenzial einer dezentralen Steuerung nur anhand eines Haustechniksystems, in Anlehnung an die Gegebenheiten im Demonstratorraum, analysiert. Dies lässt keine gültigen Aussagen für anderweitige Heiz-, Kühl und Lüftungssysteme zu. Zuletzt ist die Anzahl der Probanden im Testraum gering, was eine statistische Auswertung dieser Ergebnisse nicht zulässt. Viele Aussagen und Erkenntnisse dieses Forschungsprojekts sind daher auf einen konkreten Fall beschränkt und lassen keine globalen, allgemeingültigen quantitativen Aussagen zu. Qualitative Kerngedanken und Bemerkungen lassen sich aber dennoch in ausreichendem Maße erkennen.

Applikation

Im Folgenden werden noch etwaige Einschränkungen bei der Erstellung sowie bei der Implementierung der Applikation aufgezeigt. Es erhalten nur Nutzer Zugriff auf die Steuerung, die sich für die Applikation registriert haben. Grundsätzlich wird davon ausgegangen, dass der Nutzer sein Smartphone mit sich führt und die Applikation innerhalb der Räumlichkeiten zu jeder Zeit aktiv bleibt. Bei gleichzeitiger Anwesenheit mehrere Nutzer in einer Zone muss eine Kompromisslösung für die unterschiedlichen Steuerungsparameter gefunden werden. Unterschiedliche Kompromissszenarien sind durchaus denkbar (aktuell wird zunächst nur der Kompromiss über das arithmetische Mittel gebildet). Unterschiedliche Kompromisslösungen wie Gewichtungen nach Hierarchie oder Anwesenheitszeit, u.a. waren innerhalb des Forschungsprojektes nicht mehr möglich und bedingen weiteren Untersuchungen. Darüber hinaus wäre besonders eine Implementierung eines dezentraleren und noch individueller steuerbareren Übergabesystems für die Kontrollparameter wichtig, um Situationen für eine notwendige Kompromissbildung zu reduzieren.

Die Kommunikation der einzelnen Endgeräte wird oft insofern erschwert, da die Sicherheitsanforderungen innerhalb des Netzwerkes meist zu restriktiv sind. Weiter hängt die Implementierung der Applikation stets von Fachplanern ab, da die Zonierung durch die Bluetooth-Beacons selbst vorgenommen werden muss. Abschließend ist anzufügen, dass der Fokus der Entwicklung dieser Applikation auf der prototypischen Funktionalität und dem Konzept des dezentralen Verhaltens liegt. Darüber hinaus sind wesentliche Optimierungspotenziale hinsichtlich des Designs und des Layouts der Applikation vorhanden.

Simulation

Auf Ebene der Simulation gibt es zum einen Annahmen, welche die Simulation einschränken und somit eine gewisse Entfernung zur Realität darstellen. Zum anderen gibt es Limitierungen in Bezug auf das generelle Auswerten durch eine Simulation. Im Nachfolgenden sollen diese beiden Kategorien bezüglich des Forschungsprojektes aufgezeigt werden.

Zunächst werden die konkreten Annahmen, welche zur Durchführung der Simulation getroffen wurden, beschrieben. Für die Potenzialanalyse kommt das Konzept eines ideellen Heizers zur Verwendung, welcher zwar in seiner Leistung beschränkt ist, aber nicht das exakte und komplette Heizsystem des Gebäudes widerspiegelt. Das Verhalten eines dezentralen Nutzers wurde, wie in den vorangestellten Kapiteln beschrieben, über ein eigenes dafür entwickeltes Programm abgebildet. Hierbei werden zwölf „typische“ Arbeitsprofile für jeden Nutzer im Raum verwendet. Diese Arbeitsprofile basieren dennoch nicht auf offiziell anerkannten und per Norm definierten Verhaltensmustern; diese wurden von den Verfassern nach bestem Wissen definiert. Darüber hinaus bildet der Demonstratorraum nur einen Teil der Bürolandschaft des gesamten Stockwerks ab. Diese Tatsache wird zwar über die Eigenschaft eines adiabaten Grenzverhaltens berücksichtigt, dennoch sind die strömungsdynamischen und thermischen Prozesse so nur sehr vereinfacht berücksichtigt.

Generell als Limitierung kann man das Modell des thermischen Komforts ansehen, was in sich bereits Einschränkungen mit sich bringt und jeden Nutzer gleich darstellt. Hierbei wird eine Vielzahl an Annahmen getroffen und nicht individuell differenziert. Weiter wurde in diesem Forschungsvorhaben nur der thermische Komfort analysiert, wohingegen der visuelle nicht mit in die Auswertung aufgenommen wurde. Hierbei müsste ebenfalls überprüft werden, ob dem Nutzer zu jeder Zeit genügend Tageslicht zur Verfügung steht oder dieser durch Blendung beeinträchtigt werden kann.

6.3 Ausblick

Eine der großen Herausforderungen in modernen Bürogebäuden ist, dem Nutzer ein behagliches Raumklima bereitzustellen. Um dies (aufgrund unterschiedlichster Nutzerempfindungen und Komfortansprüchen des Personals) bewerkstelligen zu können, müssen dem Anwender zwangsläufig gewisse Eingriffe zur Beeinflussung des Raumklimas ermöglicht werden. Allerdings können die benötigten Einflussmaßnahmen, bedingt durch die im Allgemeinen in Bürogebäuden verbaute zentrale Gebäudetechnik, oft nicht bzw. nur sehr eingeschränkt realisiert werden.

Durch das Forschungsprojekt „Konzeptentwicklung zur dezentralen Mess-, Steuer- und Regelungstechnik in Gebäuden im Kontext des Internet of Things“ konnte anhand von Simulationen und in der Praxis mithilfe eines Demonstratorraumes in den Räumlichkeiten der Bosch GmbH bereits aufgezeigt werden, welches erhebliche energetische Einsparpotenzial durch Nachrüstungen von dezentralen Einflusselementen erreicht werden kann. Mittels einer entwickelten Smartphone-Applikation wird hier dem Nutzer die Möglichkeit angeboten innerhalb seiner jeweiligen Aufenthaltszone, unmittelbar das Raumklima beeinflussen zu können. Neben der Wärmeabgabe durch Radiatoren, dem Verschattungsgrad sowie den Lichtverhältnissen kann auch innerhalb gewisser Vorgaben die Zuluft durch den Nutzer individuell beeinflusst werden. Anhand dieser zonierten Einflussnahme durch die Nutzer kann so die Behaglichkeit gesteigert, die Nutzerzufriedenheit zu einem gewissen Grade angehoben und gleichzeitig die Energieeinsparung durch Nachjustierung und Anpassung der Gebäudetechnik erhöht werden.

Da sich die Einflussnahme der raumklimatischen Komponenten bisher lediglich auf Zonen beschränkt und innerhalb dieser Bereiche Kompromisse zwischen den Nutzern gefunden werden müssen, ist daher der Grad des eigenen Einflusses hinsichtlich des Komforts begrenzt. Der Schritt hin zum individuell einstellbaren Micro-Komfortbereich am Arbeitsplatz ist neben den gebäudetechnischen Veränderungen daher vor allem hinsichtlich der Anpassung des Systems an individuelle Nutzerbedürfnisse interessant. „Optimale raumklimatische Bedingungen stehen im engen Zusammenhang zu Gesundheit und Zufriedenheit der Beschäftigten. Abweichungen davon bis hin zu Belastungen durch Kälte oder Hitze am Arbeitsplatz führen zu einer Minderung der Leistungsfähigkeit, Unzufriedenheit mit der Arbeit und zu einer möglichen Gefährdung der Sicherheit und Gesundheit“ [vgl.25, S. 4]. Wird zusätzlich die durchschnittliche Arbeitszeit von vollerwerbstätigen Personen von 41 Stunden in der Woche in die Betrachtung mit aufgenommen [26, S. 4] ist die Notwendigkeit zur Steigerung der Behaglichkeit deutlich erkennbar.

Nach [27], einer aktuellen Studie aus 2017, ist zu ersehen welche messbaren Komfortsteigerungen alleine durch die Benutzung eines manuell steuerbaren Standventilators (engl. fan) nachgewiesen werden können. Liegt beispielsweise die Innenraumtemperatur bei 26 °C empfinden 80 % der Testpersonen ohne „fan“ diese als hinnehmbar, mit „fan“ erhöht sich die Akzeptanz der Probanden auf 91 % (Steigerung von 11 %). Steigt

die Temperatur im Innenraum auf 29 °C (außerhalb des Behaglichkeitsbereiches) bewerten immerhin 88 % der Testpersonen mit Ventilator das Szenario als akzeptabel, ohne Ventilator allerdings nur noch 62 %. Das individuelle Komfortempfinden des Menschen setzt sich aus mehreren Aspekten zusammen und ist in Summe ein komplexer Bewertungsprozess. Nach [28] beziehen derzeitige Modelle, wie etwa das PMV (Predicted mean vote) Modell nur die Nacken-, nicht aber die Fußgelenktemperatur (relevanter z.B. bei und) in die Komfortbewertungen von Personen mit ein. Hierfür wurde innerhalb dieser Studie bereits ein dementsprechend neues Modell entwickelt.

Aufgrund der Spreizung der Einzelempfindungen und Bewertungen von Nutzern spricht vieles für die Schaffung eines persönlichen Mikroklimas am Arbeitsplatz. Das bedeutet, dass dem Nutzer zukünftig die Möglichkeit in erhöhtem Maße eingeräumt werden sollte, seinen Arbeitsplatz an sein individuelles Komfortbedürfnis anpassen und unabhängig von anderen kontrollierbar machen zu können. An diesem Punkt besteht weiterer Forschungs- und Entwicklungsbedarf.

Hypothese

Durch die Implementierung eines autark dezentral und individuell einstellbaren Nutzerkomforts ist es prinzipiell möglich, das Temperaturband der zur Verfügung gestellten Raumtemperaturen merklich zu erweitern (allgemein Kategorie lll von 20-26 °C auf ca. 19-27 °C (Abbildung 6.1, S. 79). Das bedeutet, dass das Temperaturband, welches durch die zentrale Gebäudetechnik erzeugt und vorgehalten werden muss, dementsprechend größer ausgelegt werden kann. Dies wiederum führt dazu, dass die zentrale Gebäudetechnik für einen Büroraum kleiner dimensioniert und somit Energie eingespart werden kann.

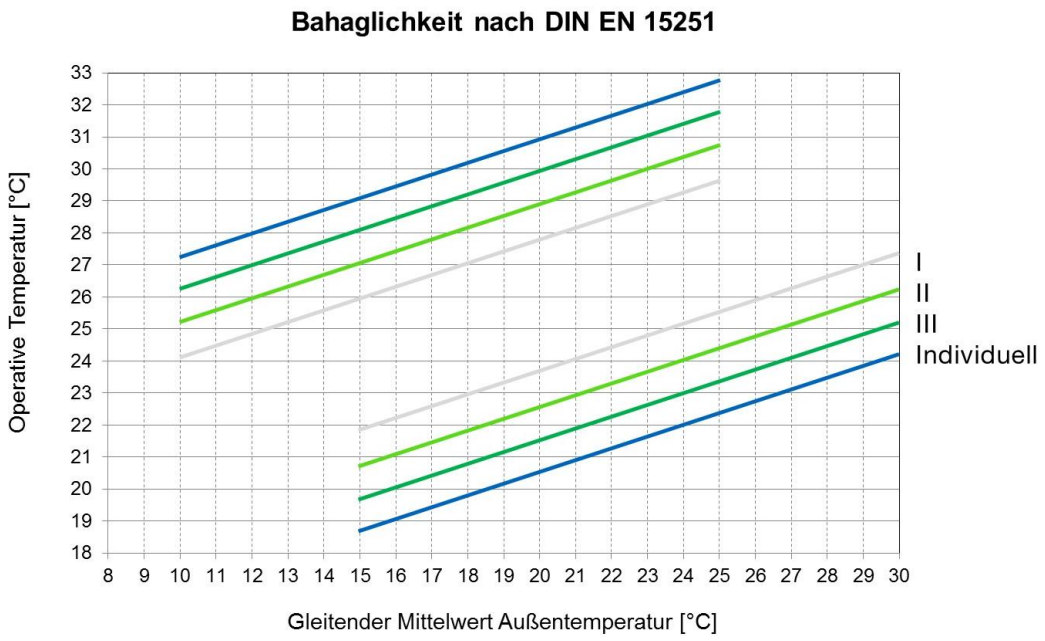


Abbildung 6.1 Erweiterung des Behaglichkeitsbandes

Potenzial

Aus aktuellen Studien sowie den Ergebnissen des Projektes und der Zusammenarbeit mit der Robert Bosch GmbH lassen sich unter Berücksichtigung der Energieeffizienz sowie des thermischen Komforts weitere erhebliche Potenziale erkennen. Um diese Potenziale zu untersuchen und abschätzbar zu machen, ist es sinnvoll dieses anhand eines neuen Forschungsvorhabens zu erörtern und entsprechend zu quantisieren. Zu diesem Zweck müssen autark dezentral steuerbare, sog. personalisierte Individual-Komfort-Regelungen (IKR) an Testarbeitsplätzen konzipiert und entwickelt werden. Anhand entsprechender Komponenten in Kombination mit der als Basis dienenden bereits entwickelten Basis-Applikation kann ein auf den jeweiligen Nutzer zugeschnittenes Mikroklima erzeugt und autark gesteuert werden (Abbildung 6.2, S. 80).

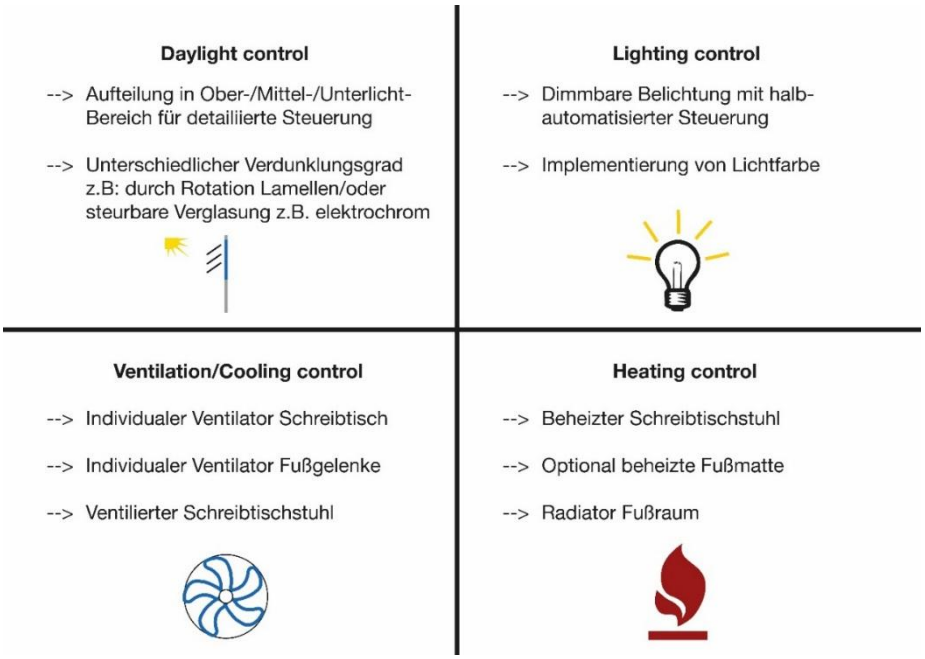


Abbildung 6.2 Upgrade des Arbeitsplatzmobiliars

Des Weiteren können dem Anwender anhand lernender Profildaten je nach Komfortwunsch personalisierte Behaglichkeitsprofile bereitgestellt werden (algorithmusbasierte Steuerung). Durch eine IoT-gestützte Anbindung der Komponenten werden Kontrollmechanismen implementiert, welche zum einen die Komfortkompromisse zwischen den Nutzern minimieren und zum anderen in der Lage sind die Dimensionierung der zentral bereitzustellenden Gebäudetechnik weiterhin zu reduzieren. Hierbei wäre zu untersuchen inwieweit die zum Einsatz kommenden zentralen Einheiten auf ein zu spezifizierendes Basisniveau dimensioniert werden könnten (Abbildung 6.3, S. 81).

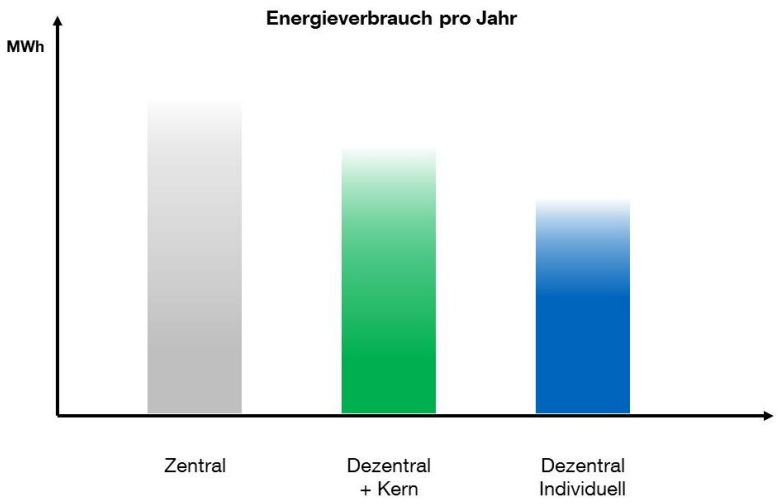


Abbildung 6.3 Qualitative Darstellung des Energieeinsparpotenzials

Mögliche, sich ergebende Vorteile und Funktionalitäten für den Nutzer:

- Keine Kompromissaushandlungen unter den Nutzern erforderlich
- Implementierung von Individualprofilen
- Erhöhte Nutzerzufriedenheit durch individuelle Einstellungen
- Verringerung der Belastungen, verursacht durch Kälte oder Hitze
- Erhöhung der Leistungsfähigkeit
- Erhöhung der Sicherheit und Gesundheit
- Freie Arbeitsplatzwahl

Mögliche, sich ergebende Vorteile und Funktionalitäten für die Gebäudetechnik:

- Heiz- bzw.- Kühlenergieeinsparung infolge ausgedehnteren Set-Points
- Kleinere Dimensionierung der Gebäudetechnik

- Höhere Energieeffizienz aufgrund der höheren Auslastung hinsichtlich eines kleiner dimensionierten Gebäudetechniksystems
- Längere Lebensdauer der Gebäudetechnikkomponenten bezüglich eines ausgeglicheneren Betriebes
- Eventuell Einsparung von Gebäudetechnik infolge dezentraler Komfortelementen
- Open-Window-Detection
- Anwesenheitssteuerungen („Automatic away-settings“)
- Optional: „Absence preventive climate control“
- Datenauswertung (Backend)
    - Büroraumanalaysen (Belegungsraten, -zeiten, ungenutzte Räume)
    - Matching/Mismatching von Nutzerkombinationen
    - Energieverbrauch aufgespaltet in Gebäudetechnikkomponenten

7. Abkürzungen

App	Application
CoAP	Constrained Application Protocol
CPU	Central Processing Unit
GPS	Global Positioning System
GUI	Graphical user interface
HTTP	Hypertext Transfer Protocol
iOS	Internetwork Operating System
IoT	Internet of Things
MSR	Mess-, Steuerungs- und Regelungstechnik
MQTT	Message Queue Telemetry Transport
PPD	Predicted percentage of dissatisfied
PMV	Predicted mean vote
P2P	Peer-to-Peer
TGA	Technische Gebäudeausrüstung
TRNSYS	Transient System Simulation Tool
UI	User Interface
W-LAN	Wireless Local Area Network
XMPP	Extensible Messaging and Presence Protocol

8. Abbildungs- und Tabellenverzeichnis

Abbildungen

Abbildung 3.1 Konzept der Kommunikation zwischen Smartphones/Nutzer und Server/Datenbank 10

Abbildung 3.2 Unterteilung der Räumlichkeiten in Einzelzonen (schematische Darstellung) hinsichtlich dezentraler Einflussmöglichkeiten innerhalb des Demonstratorraumes (Bildausschnitt aus Anhang A, Abbildung A.1, S. 95) 12

Abbildung 3.3 Beispiel eines Bluetooth Beacons (nach [7]), links: Umhüllung, rechts: Innenleben 13

Abbildung 3.4 Beispielhafte, aufgrund des Belegungsplanes, durch die Applikation zugewiesene Betriebsmodi (schematische Darstellung) innerhalb des Demonstratorraumes (Bildausschnitt aus Anhang A, Abbildung A.1, S. 95) 15

Abbildung 3.5 Allgemeines Ablaufschema (Funktionsschema) der Entscheidungsprozesse der Applikation (Flow-Chart) 16

Abbildung 4.1 Schema des Kommunikationsablaufs 21

Abbildung 4.2 Prototypisches User Interface der Applikation mit Hauptseite und beispielhafter Detailansicht (links: Hauptübersicht-ViewController [Quelle Original-Karte: Robert Bosch GmbH]; rechts: Sensor-ViewController) 26

Abbildung 4.3 Kartenübersicht zur Visualisierung der Lokalisation des Nutzers und der Peers (Ausschnitt Hauptübersicht-ViewController) [Quelle Original-Karte: Robert Bosch GmbH] 27

Abbildung 4.4 Menüfeld mit Buttons zur Auswahl und zum Laden der jeweiligen Detailansichten (Ausschnitt Hauptübersicht-ViewController) 27

Abbildung 4.5 Slider inkl. Übersichtfeld zur Darstellung der persönlichen Präferenz, des aktuellen IST-Wertes sowie des Kompromisswertes (Sensor-ViewController) 28

Abbildung 4.6 Übersichtsfeld zur Visualisierung aller relevanten Informationen (Compact Overview Komponente) 29

Abbildung 5.1 Räumlichkeiten und Demonstratorraum (Bild aus Anhang A, Abbildung A.1, S. 95) 32

Abbildung 5.2 Simulationsbereich (Demonstratorraum) mit interner Möblierung (Bildausschnitt aus Anhang A, Abbildung A.1, S. 95) 33

Abbildung 5.3 Nutzerprofil Büro nach DIN 15232-1:2017 Bild C.5 (Grafik nachgezeichnet nach [15, S. 70]) 34

Abbildung 5.4 Übersicht Simulationszonen TRNSYS 36

Abbildung 5.5 3D-Sketchup-Modell des Demonstratorraumes 37

Abbildung 5.6 Primärenergiefaktoren nach DIN V 4701-10 und EnEV 38

Abbildung 5.7 Position der Komfortauswertungspunkte im Kontext der Lüftungsauslässe (Bildausschnitt aus Anhang B, Abbildung A.2, S. 96) 39

Abbildung 5.8 PPD als Funktion des PMV - Bild 1 der EN ISO 7730:2005 [21, S. 14] 40

Abbildung 5.9 Komfortraumtemperatur (gestrichelte Linie) mit dem zugelassenen Toleranzbereich für die operative Raumtemperatur (durchgezogene Linien) in Abhängigkeit der Außenlufttemperatur (Grafik nachgezeichnet nach [22, S. 5]). .. 41

Abbildung 5.10 Übersicht Simulationsvarianten TRNSYS 42

Abbildung 5.11 Eingangsparameter der Simulationsvarianten 43

Abbildung 5.12 Übersicht Simulationsparameter Basisvariante 46

Abbildung 5.13 Primärenergiebedarf pro m² der Basisvariante ohne und mit Nachtabsenkung 47

Abbildung 5.14 Primärenergiebedarf pro m² der Basisvariante nach Einsatzgebiet 48

Abbildung 5.15 PMV Auswertung der sechs Komfortauswertungspunkte der Basisvariante 49

Abbildung 5.16 PMV nach EN ISO 7730 über der Außentemperatur der Sensorpunkte 1 & 6 50

Abbildung 5.17 Gesamtabweichungsgradstunden nach DIN EN 15251 und Übertemperaturgradstunden nach DIN 4108-2 der Basisvariante 51

Abbildung 5.18 Behaglichkeit nach DIN EN 15251 der Basisvariante 51

Abbildung 5.19 Primärenergiebedarf pro m² der Basisvariante mit Lüftung nur 7 – 18Uhr 52

Abbildung 5.20 Primärenergieverbrauch der Maßnahmen pro m² 55

Abbildung 5.21 Übersicht Simulationsparameter Variante 1 56

Abbildung 5.22 Primärenergiebedarf pro m² von Variante 1 57

Abbildung 5.23 Primärenergiebedarf pro m² der Variante 1 58

Abbildung 5.24 Behaglichkeit nach DIN EN 15251 der Variante 1 59

Abbildung 5.25 Gesamtabweichungsgradstunden nach DIN EN 15251 und Übertemperaturgradstunden nach DIN 4108-2 der Variante 1 59

Abbildung 5.26 Übersicht Simulationsparameter Variante 2 60

Abbildung 5.27 Überblick typisch, zufällig gewählte Arbeitsprofile 61

Abbildung 5.28 Primärenergiebedarf pro m² von Variante 2 62

Abbildung 5.29 Primärenergiebedarf pro m² der Variante 2 nach Einsatzgebiet..... 62

Abbildung 5.30 Gesamtabweichungsgradstunden nach DIN EN 15251 und Übertemperaturgradstunden nach DIN 4108-2 der Variante 2..... 63

Abbildung 5.31 Primärenergiebedarf pro m² im Vergleich 64

Abbildung 5.32 PPD-Auswertung der sechs Sensorpunkte im Vergleich..... 65

Abbildung 5.33 PMV-Auswertung der sechs Sensorpunkte im Vergleich 65

Abbildung 5.34 Gesamtabweichungsgradstunden nach DIN EN 15251 im Vergleich 66

Abbildung 5.35 Behaglichkeit nach DIN EN 15251 im Vergleich 67

Abbildung 5.36 Außentemperatur Stuttgart aktuell/2050/2100 68

Abbildung 5.37 Primärenergiebedarf mit Zukunftswetter 69

Abbildung 5.38 Gesamtabweichungsgradstunden mit Zukunftswetter..... 70

Abbildung 6.1 Erweiterung des Behaglichkeitsbandes 79

Abbildung 6.2 Upgrade des Arbeitsplatzmobiliars 80

Abbildung 6.3 Qualitative Darstellung des Energieeinsparpotenzials 81

Abbildung A.1 Grundriss 1. OG Bürogebäude 111, Forschungscampus Bosch GmbH in Renningen (Belegungslayout) (Quelle: Robert Bosch GmbH) 93

Abbildung A.2 Grundriss 1. OG Bürogebäude 111, Forschungscampus Bosch GmbH in Renningen (Lufttechnik) (Quelle: Robert Bosch GmbH) 94

Abbildung A.3 Leistungsprozente nach Volumenstromanteil (Hilfsenergie Ventilator Zuluft) 97

Abbildung A.4 Leistungsprozente nach Volumenstromanteil (Hilfsenergie Ventilator Abluft) 98

Abbildung A.5 Behaglichkeit nach DIN EN 15251 (Basis mit Nachtabsenkung) ... 100

Abbildung A.6 Energieverbrauch (Basis mit Nachtabsenkung) 100

Abbildung A.7 Behaglichkeit nach DIN EN 15251 (Variante 1) 102

Abbildung A.8 Energieverbrauch (Variante 1) 102

Abbildung A.9 Behaglichkeit nach DIN EN 15251 (Variante 2) 104

Abbildung A.10 Energieverbrauch (Variante 2) 104

Tabellen

Tabelle 3.1 Vor- und Nachteile verschiedener Kommunikationsprotokolle im Bereich des IoT (nach [2]) 9

Tabelle 4.1 Vor- und Nachteile der Lokalisierung mit W-LAN 18

Tabelle 4.2 Vor- und Nachteile der Lokalisierung mit GPS 19

Tabelle 4.3 Vor- und Nachteile der Lokalisierung mit Bluetooth 19

Tabelle 4.4 Vor- und Nachteile der Lokalisierung mit Bluetooth 20

Tabelle 4.5 Struktur der statischen Datenbanktabelle 24

Tabelle 5.1 Darstellung der Simulationszonen und ihre Funktionen 37

Tabelle 5.2 Ergebnisse der Einzelmaßnahmen 53

Tabelle A.1 Wandaufbauten des Rng111 (Quelle: Robert Bosch GmbH) 95

Tabelle A.2 Hilfsenergie WRG (Quelle: Robert Bosch GmbH) 96

Tabelle A.3 Hilfsenergie Ventilator Zuluft (Quelle: Robert Bosch GmbH) 97

Tabelle A.4 Hilfsenergie Ventilator Abluft (Quelle: Robert Bosch GmbH) 98

Tabelle A.5 Informationen zu Basis mit Nachtabsenkung 99

Tabelle A.6 Informationen zu Variante 1 101

Tabelle A.7 Informationen zu Variante 2 103

9. Literaturverzeichnis

[1] FHEM e.V., *MQTT Einführung – FHEMWiki.* [Online] Verfügbar unter: https://wiki.fhem.de/wiki/MQTT_Einf%C3%BChrung. Zugriff am: Nov. 19 2018.

[2] D. Obermaier, *IoT-Protokolldschungel - Ein Wegweiser.* [Online] Verfügbar unter: https://www.informatik-aktuell.de/betrieb/netzwerke/iot-protokolldschungel-ein-wegweiser.html. Zugriff am: Nov. 14 2018.

[3] Vogel Communications Group GmbH & Co. KG, *Was ist ein Beacon?* [Online] Verfügbar unter: https://www.ip-insider.de/was-ist-ein-beacon-a-665274/. Zugriff am: Nov. 19 2018.

[4] Wikipedia, *Bluetooth.* [Online] Verfügbar unter: https://de.wikipedia.org/w/index.php?oldid=182576212. Zugriff am: Nov. 19 2018.

[5] Wikipedia, *Funkbake.* [Online] Verfügbar unter: https://de.wikipedia.org/w/index.php?oldid=174201300. Zugriff am: Nov. 19 2018.

[6] Wikipedia, *Lateration.* [Online] Verfügbar unter: https://de.wikipedia.org/w/index.php?oldid=173749444. Zugriff am: Nov. 19 2018.

[7] Amazon, *Ibeacon nRF51822 Bluetooth 4.0 SMART BLE Mediumstrecke Näherungsgerät Leuchtfeuer Diamond fuer Apple Android: Amazon.de: Elektronik.* [Online] Verfügbar unter: https://www.amazon.de/nRF51822-Bluetooth-Mediumstrecke-N%C3%A4herungsger%C3%A4t-Leuchtfeuer/dp/B015JMXSJS/ref=sr_1_25?ie=UTF8&qid=1542632624&sr=8-25&keywords=bluetooth+beacon. Zugriff am: Nov. 19 2018.

[8] Apple Inc., *iOS 12 - Apple Developer.* [Online] Verfügbar unter: https://developer.apple.com/ios/. Zugriff am: Nov. 28 2018.

[9] Apple Inc., *Swift - Apple Developer.* [Online] Verfügbar unter: https://developer.apple.com/swift/. Zugriff am: Nov. 28 2018.

[10] Wikipedia, *iBeacon.* [Online] Verfügbar unter: https://de.wikipedia.org/w/index.php?oldid=175110207. Zugriff am: Nov. 19 2018.

[11] Apple Inc., *Background Execution.* [Online] Verfügbar unter: https://developer.apple.com/library/archive/documentation/iPhone/Conceptual/iPhoneOSProgrammingGuide/BackgroundExecution/BackgroundExecution.html. Zugriff am: Nov. 28 2018.

[12] Apple Inc., *Bonjour - Apple Developer.* [Online] Verfügbar unter: https://developer.apple.com/bonjour/. Zugriff am: Nov. 28 2018.

[13] *Lüftung von Nichtwohngebäuden*, DIN EN 13779, 2007.

[14] NARVA Lichtquellen GmbH + Co. KG, „LT 49 W T5 / 840 Datenblatt: 17449_0001_DABL“, NARVA Lichtquellen GmbH + Co. KG, Mrz. 2015. [Online] Verfügbar unter: http://www.narva-bel.de. Zugriff am: Nov. 29 2018.

[15] *Energieeffizienz von Gebäuden*, DIN EN 15232-1, 2017.

[16] *Heizungsanlagen in Gebäuden*, DIN EN 12831, 2003.

[17] *Heizsysteme in Gebäuden*, DIN EN 12831 Beiblatt 1, 2008.

[18] A. F. Davani, „Gekoppeltes Gebäude- und Anlagenmodell von Rng141 in TRNSYS“, Robert Bosch GmbH, Renningen, Nov. 2016. Zugriff am: Nov. 26 2018.

[19] *Energetische Bewertung heiz- und raumlufttechnischer Anlagen*, 4701-10, 2003.

[20] *Energieeinsparverordnung vom 24. Juli 2007 (BGBl. I S. 1519), die zuletzt durch Artikel 3 der Verordnung vom 24. Oktober 2015 (BGBl. I S. 1789) geändert worden ist.: Verordnung über energiesparenden Wärmeschutz und energiesparende Anlagentechnik bei Gebäuden (Energieeinsparverordnung - EnEV)*, 2007.

[21] *Ergonomie der thermischen Umgebung*, DIN EN ISO 7730, 2006.

[22] *Eingangsparameter für das Raumklima zur Auslegung und Bewertung der Energieeffizienz von Gebäuden*, DIN EN 15251, 2012.

[23] *Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden*, DIN 4108-2:2013-02, 2013.

[24] Meteotest AG, *Meteonorm.* [Online] Verfügbar unter: https://meteonorm.com/. Zugriff am: Nov. 29 2018.

[25] K. Bux, „Klima am Arbeitsplatz: Stand arbeitswissenschaftlicher Erkenntnisse – Bedarfsanalyse für weitere Forschung, Regelung und Normung“. Projekt F 1987 - der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin, Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin, Dortmund, 2006. Zugriff am: Nov. 26 2018.

[26] DESTATIS, *Pressekonferenz „Qualität der Arbeit – Geld verdienen und was sonst noch zählt“.* [Online] Verfügbar unter: https://www.destatis.de/DE/PresseService/Presse/Pressekonferenzen/2017/Arbeitsmarkt/Statement_Arbeitsmarkt_2017.pdf?__blob=publicationFile. Zugriff am: Nov. 26 2018.

[27] S. Schiavon, B. Yang, Y. Donner, V. W.-C. Chang und W. W. Nazaroff, „Thermal comfort, perceived air quality, and cognitive performance when personally controlled air movement is used by tropically acclimatized persons“ (eng), *Indoor air*, Jg. 27, Nr. 3, 690–702 (695), 2017.

[28] S. Liu, S. Schiavon, A. Kabanshi und W. W. Nazaroff, „Predicted percentage dissatisfied with ankle draft“ (eng), *Indoor air*, Jg. 27, Nr. 4, S. 852–862, 2017.

10. Anhang

Anhang A

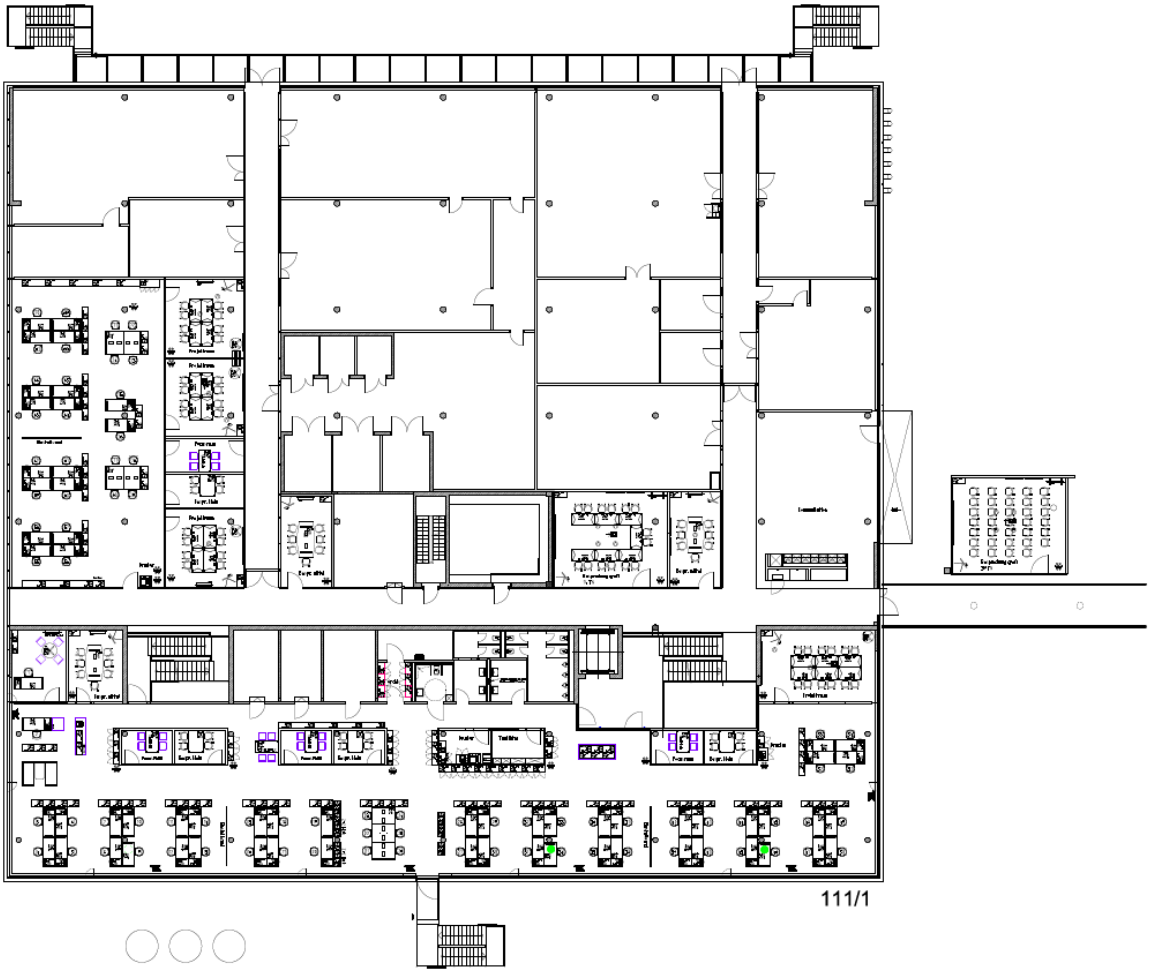


Abbildung A.1 Grundriss 1. OG Bürogebäude 111, Forschungscampus Bosch GmbH in Renningen (Belegungslayout) (Quelle: Robert Bosch GmbH)

Anhang B

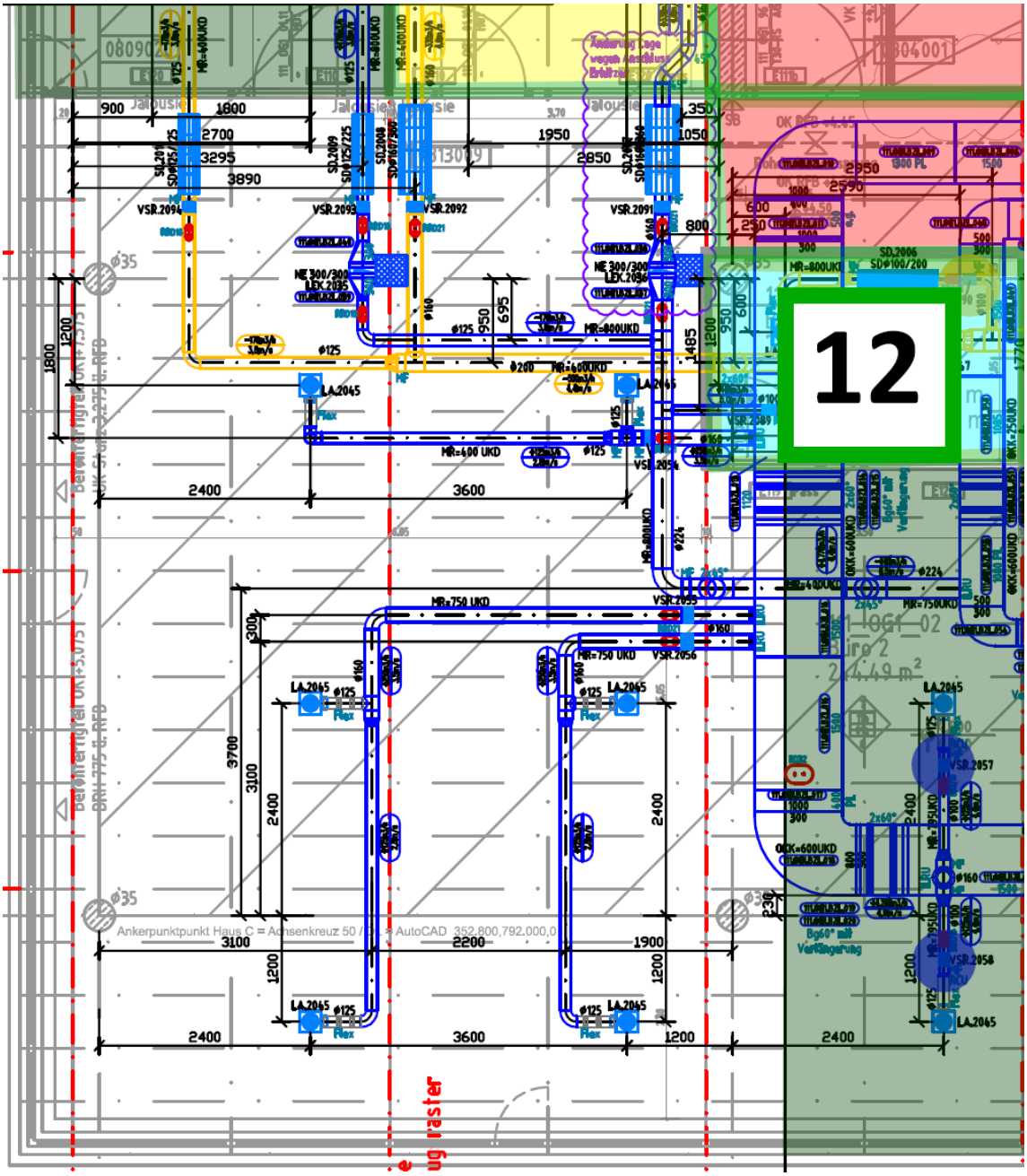


Abbildung A.2 Grundriss 1. OG Bürogebäude 111, Forschungscampus Bosch GmbH in Renningen (Lufttechnik) (Quelle: Robert Bosch GmbH)

Anhang C

Tabelle A.1 Wandaufbauten des Rng111 (Quelle: Robert Bosch GmbH)

Bauteil	Wandschicht	Dicke	Stoffeigenschaften			U-Wert
		[m]	Wärmeleit-fähigkeit [W/mK]	Spez. Wärme-kapazität [kJ/kgK]	Dichte [kg/m³]	[W/m²K]
Außenwand	Normalbeton	0,15	2,100	1,00	2400	0,190
	Mineraldämmwolle	0,16	0,039	0,90	80	
	Schallschutzdämmung	0,03	0,050	1,44	80	
Boden	Estrich	0,03	1,400	1,05	2200	0,787
	Steinwolle	0,02	0,047	0,84	75	
	Beton	0,12	2,036	0,92	2100	
	Luftspalt	0,0044	0,0262	1,007	1,2	
	Steinwolle	0,02	0,047	0,84	75	
	Blech	0,001	58,000	0,48	7800	
Decke	Normalbeton	0,25	2,100	1,00	2400	0,319
	Mineraldämmwolle	0,1	0,039	0,90	80	
	Zementestrich	0,085	1,400	1,00	2000	
	Fliesen	0,015	1,000	1,00	2000	
Glaswand	Glas	0,015	1,000	0,75	2500	2,709
	Luftspalt	0,0044	0,0262	1,007	1,2	
	Glas	0,015	1,000	0,75	2500	
Innenwand leicht	Gipskartonplatte	0,013	0,250	0,96	900	0,335
	Mineraldämmwolle	0,098	0,039	0,90	80	
	Gipskartonplatte	0,013	0,250	0,96	900	
Sichtbeton-wand	Gipsputz	0,015	0,350	1,00	1200	0,592
	Kalksandstein	0,175	0,988	1,00	1800	
	Schallschutzdämmung	0,01	0,050	1,44	80	
	Mineraldämmwolle	0,04	0,039	0,90	80	
	Gipsputz	0,025	0,350	1,00	900	
Außen-fenster					g=0,3	1,300

Anhang D

Hilfsenergie WRG:

Tabelle A.2 Hilfsenergie WRG (Quelle: Robert Bosch GmbH)

Betriebsanleitung für Regelantriebseinheiten
rotortronic VVX 15, 25 und 35 BV1

4. Technische Daten

	Funktion	15	25	35
Ausgangsdaten	Drehzahl (U/min)	5-250		
	Drehmoment[1] (Nm)	1.5	4	6
	Leistung (W)	40	100	160
	Drehrichtung	Reversibel		
	Intervallbetrieb	Integrierte Funktion		
	Motorschutz	Integrierte Funktion		
	Sanftanlauf/-stopp (Sek.)	15/15	25/25	35/35
	Alarmausgang	Wechselkontakt, max 5 A 230 VAC		
Eingangsdaten	Netzspannung	230 VAC ±15%, 50/60 Hz		
	Strom (A)	0.7	1.3	1.7
	Steuersignal	0–10 V, 2–10 V, 0–20V Phasenanschnitt, 0–20 mA, 4–20 mA, 10 kOhm-Potentiometer		
Allgemeines	Schutzart	IP 54		
	Gewicht, Steuergerät (kg)	1.7		
	Gewicht, Motor (kg)	5	8	11
	Anschlüsse	3 of Pg11 and 2 of Pg9		
	Umgebungstemp.	-30 - +40° C		
	Tachometer	Elektronisches Tachometer, kein Tachometer-kabel erforderlich		
	EMV, Emissionen	EN 50081-1		
	EMV, Störsicherheit	EN 50082-2		

1) Konstantes Drehmoment über den gesamten Drehzahlbereich.

Tabelle 4 Technische Daten

ZU	RWT-Wärmerückgewinnung	
Fabrikat	Lautner	
Typ	P_10-2800-WZV-VVX35	
Anzahl	1	Stck.
Raddurchmesser	2650	mm
Material Speichermasse	Al	
Betriebsgewicht	670	kg
Winterfall		
Rückwärmzahl	71,1	%
Rückfeuchtezahl	38,7	%
Leistung, sensible	254,6	kW
Leistung, latent	29,0	kW
Leistung, gesamt	283,6	kW

Hilfsenergie Ventilator Zuluft:

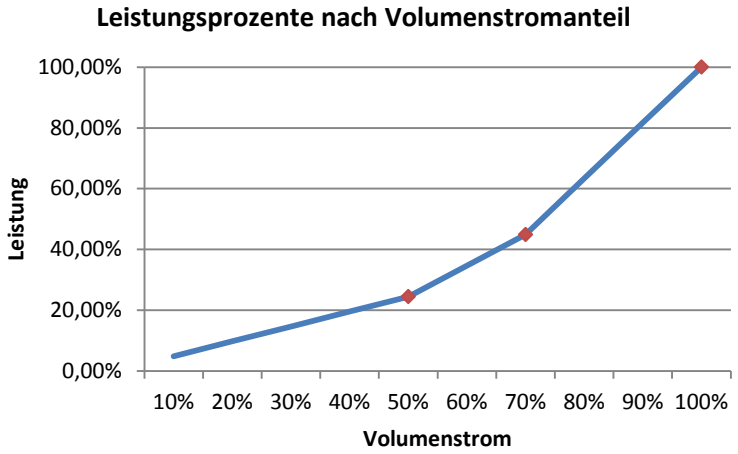


Abbildung A.3 Leistungsprozente nach Volumenstromanteil (Hilfsenergie Ventilator Zuluft)

Tabelle A.3 Hilfsenergie Ventilator Zuluft (Quelle: Robert Bosch GmbH)

ZU	Elektromotor	
Fabrikat	ABB	
Typ	M3AA200MLA4	
Anzahl	1	Stck.
Polzahl	4	
Effizienzklasse	IE2	
Betriebsspannung	400	V
Nennleistung	30,0	kW
Nenndrehzahl	1.480	min^{-1}
Nennstrom	55,3	A
Anlaufstrom	398,2	A
Wirkungsgrad	93,2	%
Wirkleistung vor FU bei 100%	15,6	kW
Betriebsfrequenz	59,7	Hz
Max. Frequenz	73,8	Hz
Min. Frequenz	36,1	Hz
Anlaufzeit bei Direktanlauf	2,0	sek.
Gewicht	219	kg
Frequenz	50,0	Hz
Schutzart	IP55	
Isolierklasse	F	
Bauform	B3	
Ex-Schutz / Zündgruppe	ohne	
max. Lagerkraft Motor	5.980	N
Nachschmiefrist	40000	h
Nachschmiermenge	40,0	g
Fettart	Shell Albida EMS 2, oder glw.	

ZU	Ventilator	
Fabrikat	S+E	
Typ	R82-063/DX/K	
Anzahl	1	Stck.
Drehzahl	1.767	min^{-1}
Volumenstrom	28.000	m³/h
Druckverlust extern	640	Pa
Druckverlust intern	835	Pa
Druckverlust total	1.615	Pa
Totalwirkungsgrad	85,7	%
Wellenleistung	14,7	kW
Specific Fan Power (SFP)	1.786	Ws/m³
SFP - Category	4	
2. Betriebspunkt		
Volumenstrom	19.600	m³/h
Druckverlust extern	315	Pa
Druckverlust intern	655	Pa
Druckverlust total	1.039	Pa
Totalwirkungsgrad	85,7	%
Wellenleistung	6,6	kW
3. Betriebspunkt		
Volumenstrom	14.000	m³/h
Druckverlust extern	160	Pa
Druckverlust intern	565	Pa
Druckverlust total	768	Pa
Totalwirkungsgrad	82,7	%
Wellenleistung	3,6	kW
max. Betriebtemperatur	40	°C
Fördermedium	Luft	
Ex-Schutz	kein	
Wuchtgüte VDI 2060	2,5	
Gehäusestellung	GL270	
Grundrahmen	U120 870x2000	mm
Gewicht Ventilator+Motor	720	kg

Hilfsenergie Ventilator Abluft:

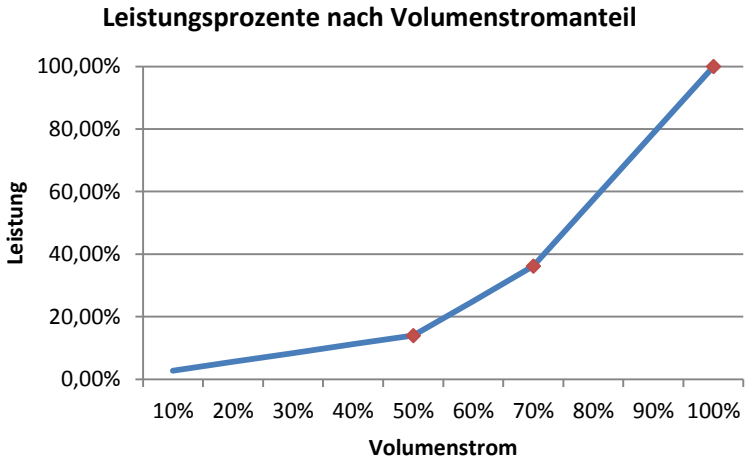


Abbildung A.4 Leistungsprozente nach Volumenstromanteil (Hilfsenergie Ventilator Abluft)

Tabelle A.4 Hilfsenergie Ventilator Abluft (Quelle: Robert Bosch GmbH)

AB	Elektromotor
Fabrikat	ABB
Typ	M3AA180MLB4
Anzahl	1 Stck.
Polzahl	4
Effizienzklasse	IE2
Betriebsspannung	400 V
Nennleistung	22,0 kW
Nenndrehzahl	1.478 min^{-1}
Nennstrom	40,9 A
Anlaufstrom	310,8 A
Wirkungsgrad	92,4 %
Wirkleistung vor FU	10,0 kW
Betriebsfrequenz	52,5 Hz
Max. Frequenz	63,8 Hz
Min. Frequenz	28,7 Hz
Anlaufzeit bei Direktanlauf	1,5 sek.
Gewicht	164 kg
Frequenz	50,0 Hz
Schutzart	IP55
Isolierklasse	F
Bauform	B3
Ex-Schutz / Zündgruppe	ohne
max. Lagerkraft Motor	3.300 N
Nachschmiefrist	40000 h
Nachschmiermenge	40,0 g
Fettart	Shell Albida EMS 2, oder glw. -

AB	Ventilator
Fabrikat	S+E
Typ	R82-063/DX/K
Anzahl	1 Stck.
Drehzahl	1.552 min^{-1}
Volumenstrom	28.000 m³/h
Druckverlust extern	640 Pa
Druckverlust intern	215 Pa
Druckverlust total	970 Pa
Totalwirkungsgrad	80,6 %
Wellenleistung	9,4 kW
Specific Fan Power (SFP)	1.290 Ws/m³
SFP - Category	4
2. Betriebspunkt	
Volumenstrom	19.600 m³/h
Druckverlust extern	315 Pa
Druckverlust intern	140 Pa
Druckverlust total	514 Pa
Totalwirkungsgrad	81,8 %
Wellenleistung	3,4 kW
3. Betriebspunkt	
Volumenstrom	14.000 m³/h
Druckverlust extern	160 Pa
Druckverlust intern	95 Pa
Druckverlust total	286 Pa
Totalwirkungsgrad	83,0 %
Wellenleistung	1,3 kW
max. Betriebtemperatur	40 °C
Fördermedium	Luft
Ex-Schutz	kein
Wuchtgüte VDI 2060	2,5
Gehäusestellung	GR090
Grundrahmen	U100 900x1889 mm
Gewicht Ventilator+Motor	570 kg

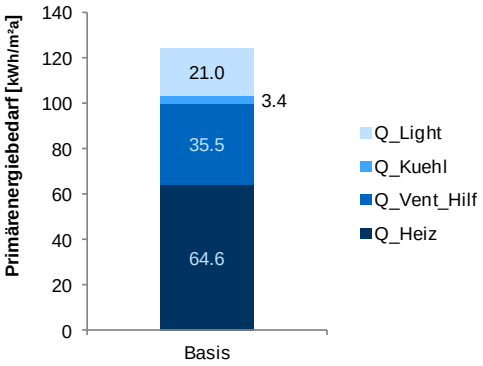
Anhang E

Basis mit Nachtabsenkung

Tabelle A.5 Informationen zu Basis mit Nachtabsenkung

Informationen zum Wetterfile:		
Jahresdurchschnittstemperatur:	9.0	°C
Min. Temperatur:	-13.0	°C
Max. Temperatur:	31.7	°C
Informationen zur Innenraumtemperatur:		
Jahresdurchschnittstemperatur:	21.9	°C
Min. Temperatur:	18.9	°C
Max. Temperatur:	26.6	°C

Primärenergiebedarf pro m²



Energieverbrauch:			Primärenergie-Faktor			
Q_Heiz	58.7	kWh/a*m²	1.1	64.6	kWh/a*m²	52%
Q_Kuehl	1.9	kWh/a*m²	1.8	3.4	kWh/a*m²	3%
Q_Vent_Hilf	19.7	kWh/a*m²	1.8	35.5	kWh/a*m²	29%
Q_Light	11.7	kWh/a*m²	1.8	21.0	kWh/a*m²	17%
	92.0	**kWh/a*m²**		**124.5**	**kWh/a*m²**	
	Nutzenergiebedarf pro m²			**Primärenergiebedarf pro m²**		

Komfortauswertung nach DIN EN 15251			**Grundsatzregel:** keine Abweichung um +-2K
Untertemp.gradstunden	10.81	Kh	eingehalten
Untertemp.stunden	53	h	
Übertemp.gradstunden	26.72	Kh	erlaubt nach DIN EN 15251
Übertemp.stunden	152	h	57.42 Kh
Gesamtabweichungsgradstunden	**37.53**	**Kh**	eingehalten

Übertemperaturgradstunden:			erlaubt nach DIN 4108-2 Tabelle 9:
Sommerklimaregion A	109	Kh	500 Kh
Sommerklimaregion B	5	Kh	500 Kh
Sommerklimaregion C	0	Kh	500 Kh

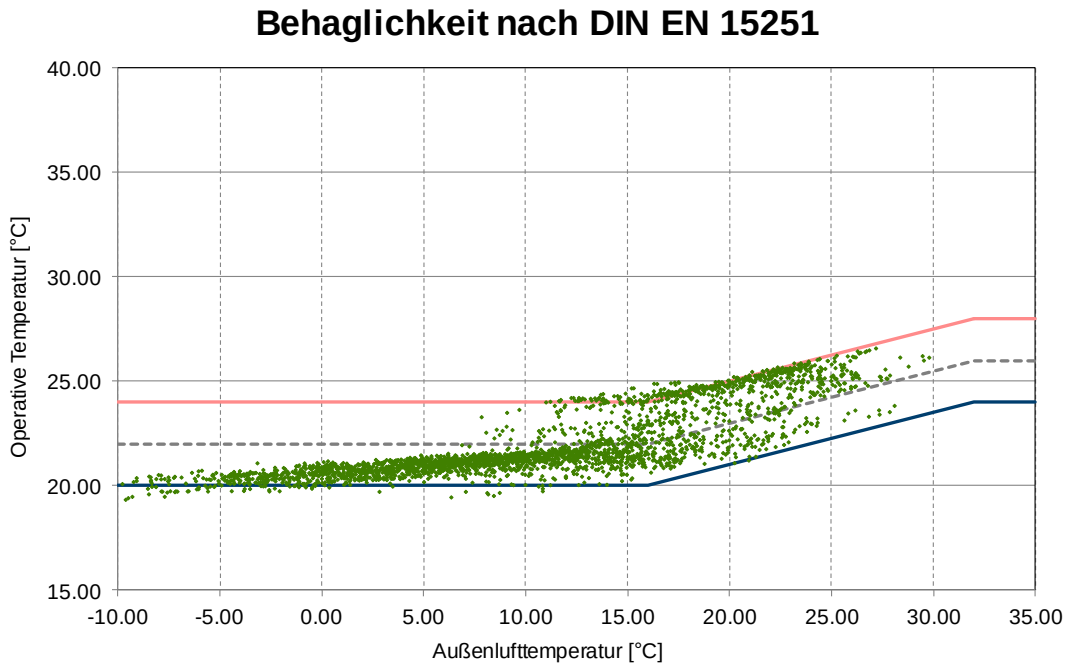


Abbildung A.5 Behaglichkeit nach DIN EN 15251 (Basis mit Nachtabsenkung)

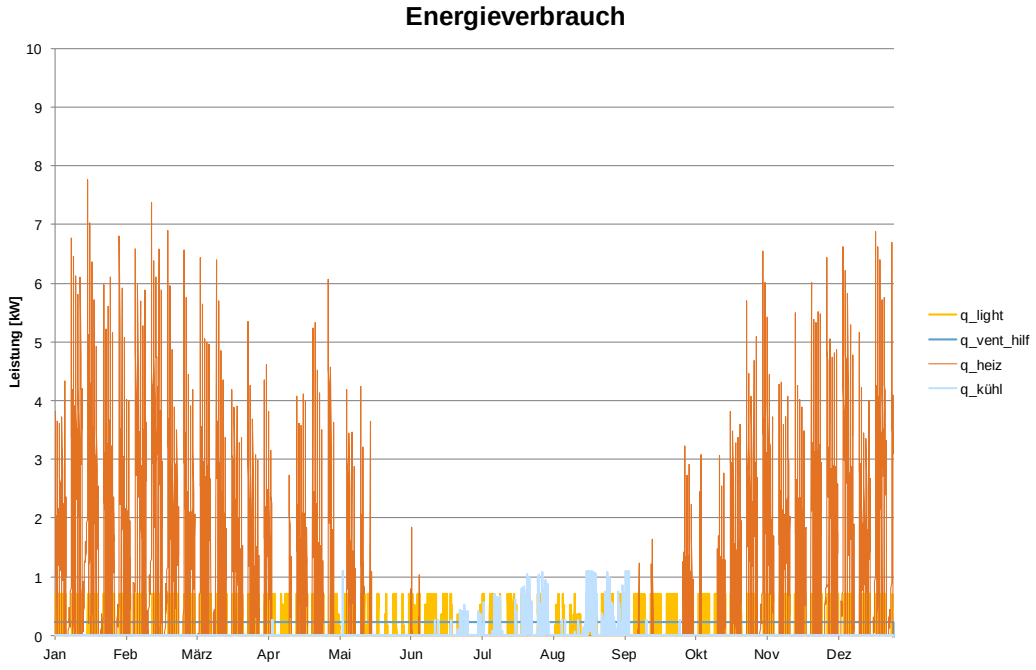


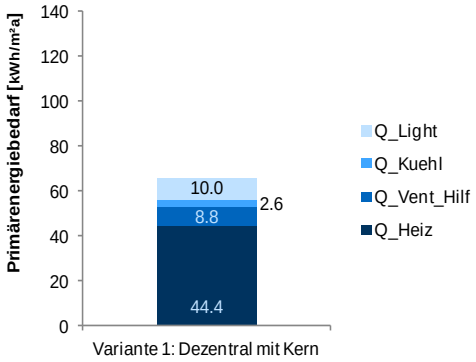
Abbildung A.6 Energieverbrauch (Basis mit Nachtabsenkung)

Dezentraler Fall mit einem zentralen Steuerungselement für Grundeinstellungen (Variante 1)

Tabelle A.6 Informationen zu Variante 1

Informationen zum Wetterfile:		
Jahresdurchschnittstemperatur:	9.0	°C
Min. Temperatur:	-13.0	°C
Max. Temperatur:	31.7	°C
Informationen zur Innenraumtemperatur:		
Jahresdurchschnittstemperatur:	21.9	°C
Min. Temperatur:	19.1	°C
Max. Temperatur:	26.6	°C

Primärenergiebedarf pro m²



Energieverbrauch:			Primärenergie-Faktor			
Q_Heiz	40.4	kWh/a*m²	1.1	44.4	kWh/a*m²	68%
Q_Kuehl	1.4	kWh/a*m²	1.8	2.6	kWh/a*m²	4%
Q_Vent_Hilf	4.9	kWh/a*m²	1.8	8.8	kWh/a*m²	13%
Q_Light	5.5	kWh/a*m²	1.8	10.0	kWh/a*m²	15%
	52.3	**kWh/a*m²**		**65.8**	**kWh/a*m²**	
	Nutzenergiebedarf pro m²			**Primärenergiebedarf pro m²**		

Komfortauswertung nach DIN EN 15251			**Grundsatzregel:** keine Abweichung um +-2K
Untertemp.gradstunden	19.57	Kh	eingehalten
Untertemp.stunden	98	h	
Übertemp.gradstunden	11.74	Kh	erlaubt nach DIN EN 15251
Übertemp.stunden	99	h	57.42 Kh
Gesamtabweichungsgradstunden	**31.30**	**Kh**	eingehalten
Übertemperaturgradstunden:			erlaubt nach DIN 4108-2 Tabelle 9:
Sommerklimaregion A	105	Kh	500 Kh
Sommerklimaregion B	5	Kh	500 Kh
Sommerklimaregion C	0	Kh	500 Kh

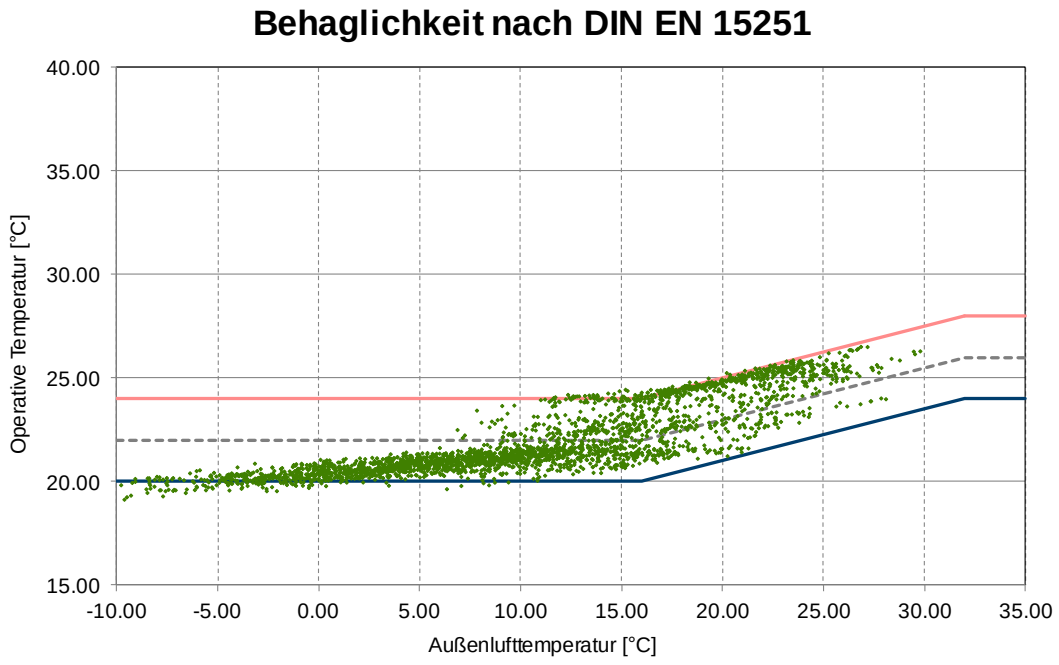


Abbildung A.7 Behaglichkeit nach DIN EN 15251 (Variante 1)

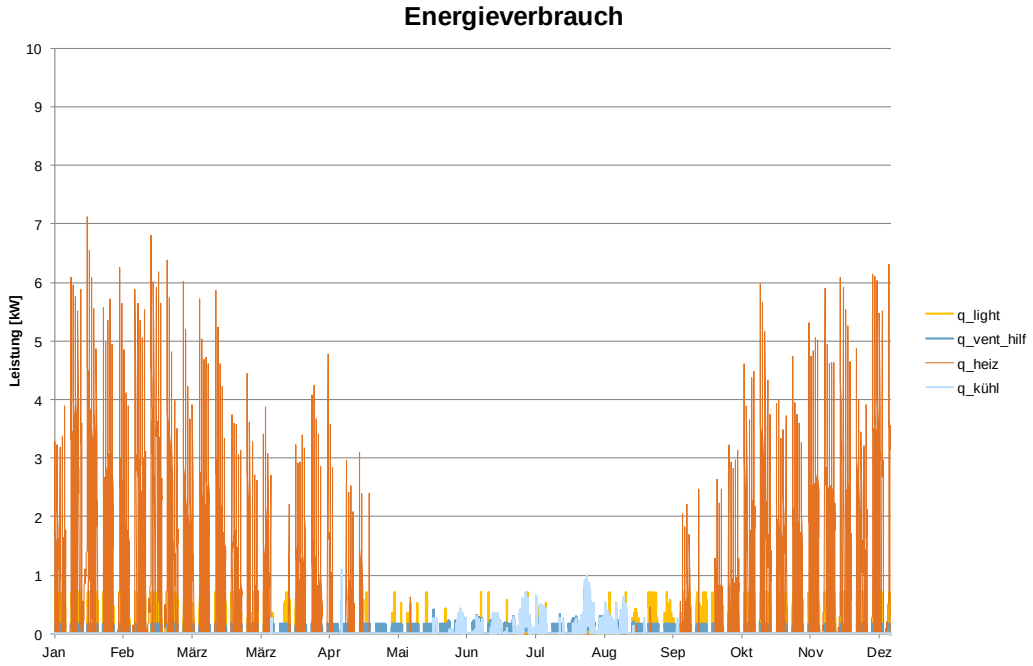


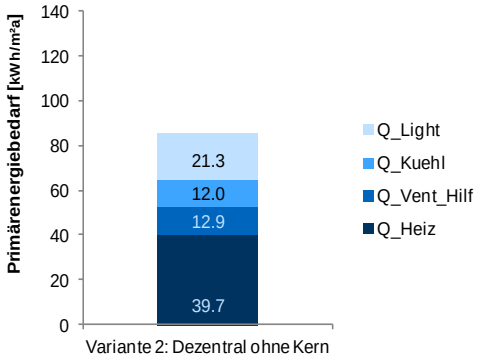
Abbildung A.8 Energieverbrauch (Variante 1)

Ganzheitlich dezentraler Fall (Variante 2)

Tabelle A.7 Informationen zu Variante 2

Informationen zum Wetterfile:		
Jahresdurchschnittstemperatur:	9.0	°C
Min. Temperatur:	-13.0	°C
Max. Temperatur:	31.7	°C
Informationen zur Innenraumtemperatur:		
Jahresdurchschnittstemperatur:	22.5	°C
Min. Temperatur:	19.5	°C
Max. Temperatur:	26.9	°C

Primärenergiebedarf pro m²



Energieverbrauch:			Primärenergie-Faktor			
Q_Heiz	36.1	kWh/a*m²	1.1	39.7	kWh/a*m²	46%
Q_Kuehl	6.7	kWh/a*m²	1.8	12.0	kWh/a*m²	14%
Q_Vent_Hilf	7.1	kWh/a*m²	1.8	12.9	kWh/a*m²	15%
Q_Light	11.8	kWh/a*m²	1.8	21.3	kWh/a*m²	25%
	61.7	**kWh/a*m²**		**85.8**	**kWh/a*m²**	
	Nutzenergiebedarf pro m²			**Primärenergiebedarf pro m²**		

Komfortauswertung nach DIN EN 15251			**Grundsatzregel:** keine Abweichung um +-2K
Untertemp.gradstunden	2.89	Kh	eingehalten
Untertemp.stunden	13	h	
Übertemp.gradstunden	51.50	Kh	erlaubt nach DIN EN 15251
Übertemp.stunden	302	h	57.42 Kh
Gesamtabweichungsgradstunden	**54.39**	**Kh**	eingehalten
Übertemperaturgradstunden:			erlaubt nach DIN 4108-2 Tabelle 9:
Sommerklimaregion A	240	Kh	500 Kh
Sommerklimaregion B	18	Kh	500 Kh
Sommerklimaregion C	0	Kh	500 Kh

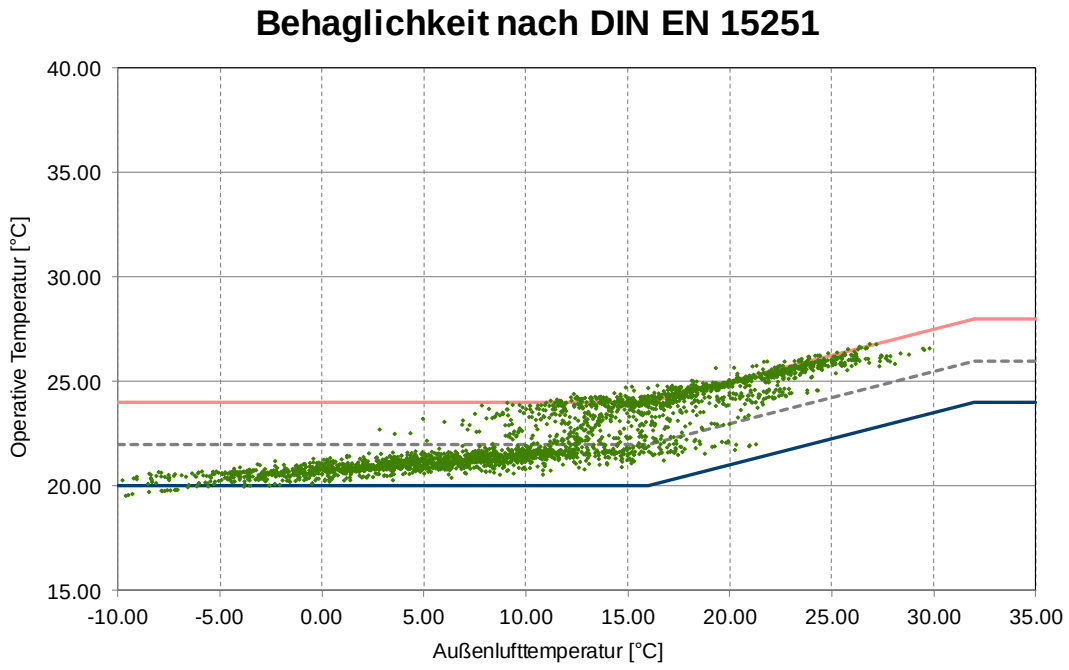


Abbildung A.9 Behaglichkeit nach DIN EN 15251 (Variante 2)

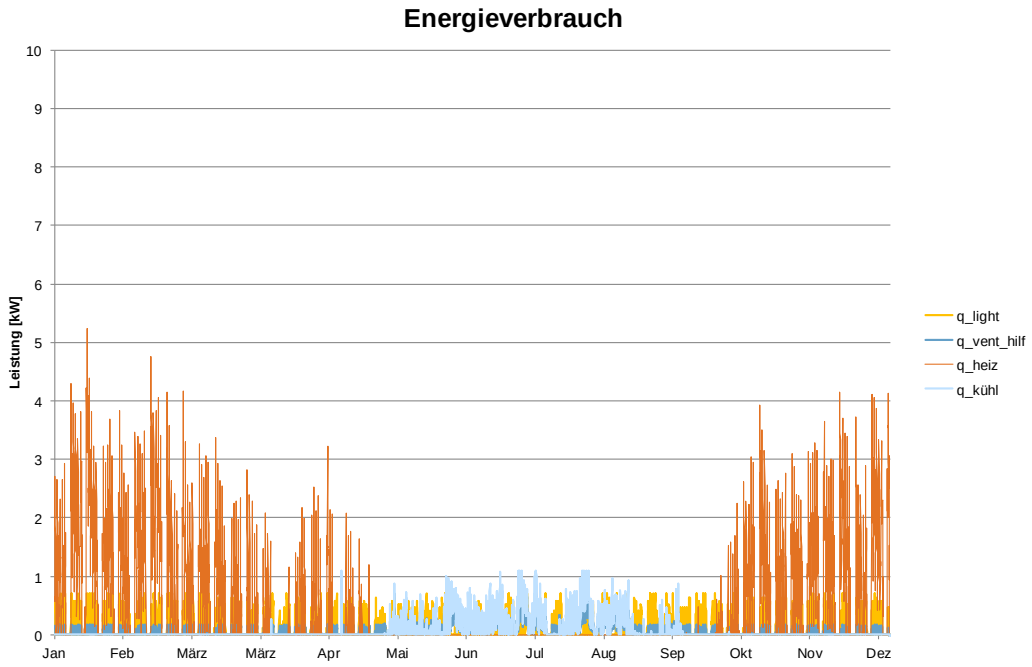


Abbildung A.10 Energieverbrauch (Variante 2)