

# LOWTECH

## FORSCHUNGSPROJEKTE

Nutzerinnen- und Nutzerkomfort durch Lowtech-Konzepte

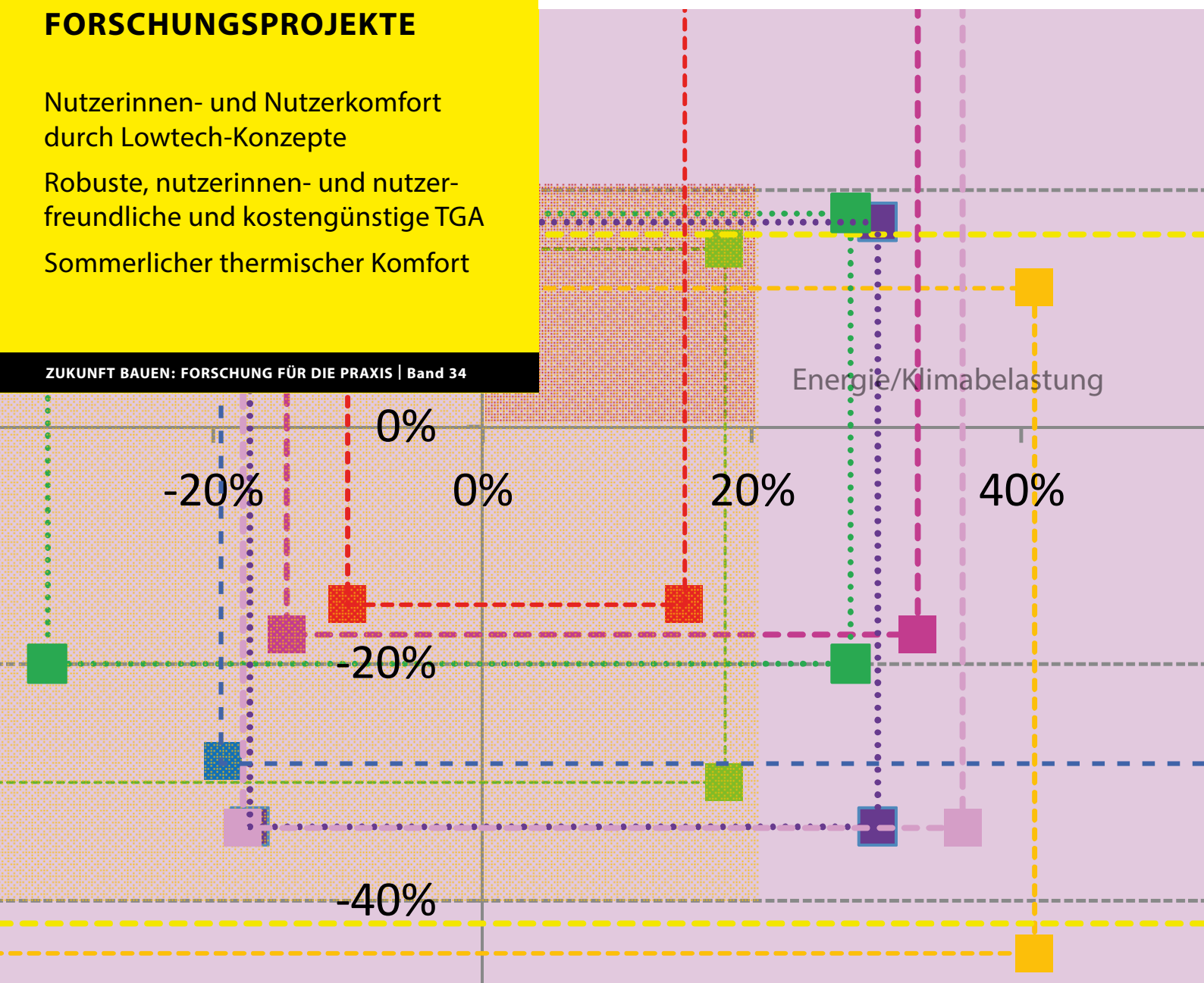
Robuste, nutzerinnen- und nutzerfreundliche und kostengünstige TGA

Sommerlicher thermischer Komfort

ZUKUNFT BAUEN: FORSCHUNG FÜR DIE PRAXIS | Band 34



**ZUKUNFT BAU**  
FÖRDERN FORSCHEN ENTWICKELN



## Impressum

### Herausgeber

Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR)  
im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR)  
Deichmanns Aue 31–37  
53179 Bonn

### Wissenschaftliche Begleitung

Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung  
Referat WB 7 „Klimaneutralität im Gebäudebetrieb“  
Jörg Lammers  
joerg.lammers@bbr.bund.de  
Thomas Tschirner  
thomas.tschirner@bbr.bund.de

### Redaktion

Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung  
Referat WB 7 „Klimaneutralität im Gebäudebetrieb“  
Jörg Lammers

### Autorinnen und Autoren

Thomas Auer  
Daniel Bell  
David Briels  
Alexander Granmayeh  
Ernst Gruber  
Margarete Huber  
Lukas Lauss  
Bernhard Lipp  
Andreas Meier  
Ute Muñoz-Czerny  
Annika Rink  
Lisa Schmitteckert  
Patrick Vidovic  
Thomas Zelger  
  
Jörg Lammers

### Korrektorat

satzweiss.com, Saarbrücken

### Stand

April 2024

### Produktionsbetreuung

sans-serif.de, Berlin

### Druck

Druckerei Rüss, Potsdam



### Bestellungen

wb7@bbr.bund.de, Stichwort: Lowtech ZB-Projekte

### Bildnachweis

Titelbild: LowTRI, FH Technikum Wien.  
Sämtliche Graphiken und Tabellen sind von den Autorinnen und Autoren zur Verfügung gestellt worden.

### Nachdruck und Vervielfältigung

Alle Rechte vorbehalten  
Nachdruck nur mit genauer Quellenangabe gestattet.  
Bitte senden Sie uns zwei Belegexemplare zu.

Der Herausgeber übernimmt keine Gewähr für die Richtigkeit, die Genauigkeit und Vollständigkeit der Angaben sowie für die Beachtung privater Rechte Dritter. Die geäußerten Ansichten und Meinungen müssen nicht mit denen des Herausgebers übereinstimmen.

ISBN 978-3-87994-100-1

ISSN 2199-3521

Bonn 2024

# Lowtech-Forschungsprojekte

## **Nutzerkomfort durch Lowtech Konzepte in Gebäuden**

IBO – Österreichisches Institut für Bauen und Ökologie GmbH, Wien

wohnbund:consult, Wien

FH Technikum Wien – Renewable Energy Systems, Wien

## **Robuste, nutzerfreundliche und kostengünstige TGA in Gebäuden**

Technische Universität München – Lehrstuhl für Gebäudetechnologie  
und klimagerechtes Bauen

## **Sommerlicher thermischer Komfort –**

## **Neuformulierung der „Klimarichtlinie“ für Bauprojekte des Bundes**

IBO – Österreichisches Institut für Bauen und Ökologie GmbH, Wien

wohnbund:consult, Wien

FH Technikum Wien – Renewable Energy Systems, Wien

Technische Universität München – Lehrstuhl für Gebäudetechnologie  
und klimagerechtes Bauen

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Wohnen, Stadtentwicklung  
und Bauwesen

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages



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



**ZUKUNFT BAU**  
FORSCHUNGSFÖRDERUNG

Die Projekte wurden gefördert vom Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR)  
im Auftrag des Bundesministeriums für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen (BMWSB)  
aus Mitteln des Innovationsprogramms Zukunft Bau.

### **Nutzerkomfort durch Lowtech Konzepte in Gebäuden**

Aktenzeichen: 10.08.18.7-19.44

Projektlaufzeit: 09.2019 bis 06.2022

### **Robuste, nutzerfreundliche und kostengünstige TGA in Gebäuden**

Aktenzeichen: 10.08.18.7-19.42

Projektlaufzeit: 09.2019 bis 06.2022

### **Sommerlicher thermischer Komfort**

Aktenzeichen: 10.08.18.7-21.07

Projektlaufzeit: 06.2021 bis 11.2023



# Inhaltsverzeichnis

|           |                                                                                                                                                              |            |
|-----------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>01</b> | <b>Einfach und technikreduziert Bauen.<br/>Zukunft-Bau-Ressortforschung zum Themenfeld .....</b>                                                             | <b>4</b>   |
| <b>02</b> | <b>Forschungsergebnisse .....</b>                                                                                                                            | <b>12</b>  |
|           | Nutzerkomfort durch Lowtech-Konzepte<br>in Gebäuden .....                                                                                                    | 13         |
|           | Daniel Bell, Ernst Gruber, Margarete Huber, Bernhard Lipp,<br>Ute Muñoz-Czerny, Patrick Vidovic, Thomas Zelger                                               |            |
|           | Robuste, nutzerfreundliche und kostengünstige<br>TGA in Gebäuden .....                                                                                       | 24         |
|           | Thomas Auer, Alexander Granmayeh,<br>Lukas Lauss, Andreas Meier, Annika Rink                                                                                 |            |
|           | Sommerlicher thermischer Komfort –<br>Neuformulierung der „Klimarichtlinie“<br>für Bauprojekte des Bundes .....                                              | 55         |
|           | Thomas Auer, Daniel Bell, David Briels, Ernst Gruber,<br>Margarete Huber, Lukas Lauss, Bernhard Lipp,<br>Ute Muñoz-Czerny, Lisa Schmitteckert, Thomas Zelger |            |
| <b>03</b> | <b>Zusammenfassung .....</b>                                                                                                                                 | <b>94</b>  |
| <b>04</b> | <b>Ausblick und Fazit .....</b>                                                                                                                              | <b>98</b>  |
| <b>05</b> | <b>Anhang .....</b>                                                                                                                                          | <b>104</b> |
| <b>06</b> | <b>Literatur .....</b>                                                                                                                                       | <b>108</b> |

Die Kapitel 01, 03, 04 und 05 sowie das Literaturverzeichnis  
sind aus allen drei Forschungsprojekten zusammengestellt  
und punktuell von Jörg Lammers ergänzt worden.  
Die kompletten Forschungsberichte sind als Download auf  
der Website des BBSR bzw. des Innovationsprogramms  
Zukunft Bau verfügbar.

# 01 Einfach und technikreduziert Bauen. Zukunft-Bau-Ressortforschung zum Themenfeld

## Hintergrund der drei Forschungsprojekte

Im vorliegenden Band „Zukunft Bauen: Forschung für die Praxis“ des Innovationsprogramms Zukunft Bau des Bundesministeriums für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen (BMWSB) werden drei Forschungsprojekte präsentiert, die im Kontext des von Referat WB 7 „Klimaneutralität im Gebäudebetrieb“ unterstützten Diskurses zum einfachen und technikreduzierten Bauen entstanden sind.

Angesichts der zunehmend steigenden energie-, ressourcen- und klimapolitischen Anforderungen an unsere Gebäude nimmt häufig auch der Technisierungsgrad zu, was zu einem höheren Fehlerrisiko durch die Technik einerseits und durch das Nutzerrinnen- und Nutzerverhalten andererseits führt. Dies kann wiederum erhebliche negative Folgen für den Energieverbrauch, klimaschädigende Emissionen, den Nutzerinnen- und Nutzerkomfort und die Betriebskosten von Gebäuden haben.

Die drei Projekte **„Nutzerkomfort durch Lowtech Konzepte in Gebäuden“**, **„Robuste, nutzerfreundliche und kostengünstige TGA in Gebäuden“** und **„Sommerlicher thermischer Komfort – Neuformulierung der „Klimarichtlinie“ für Bauprojekte des Bundes“** sollen sowohl die Ressortarbeit in den Themenbereichen des Klima- und Ressourcenschutzes als auch Planerinnen und Planer bei der konkreten Umsetzung von Bauprojekten unterstützen. Dabei wird nach Lösungswegen gesucht, die zugleich die Robustheit und die Benutzerinnen- und Benutzerfreundlichkeit von Gebäuden erhöht.

Technik in Gebäuden führt zu Erwartungshaltungen der Nutzerinnen und Nutzer, die vielfach nicht erfüllt werden können. Dies kann zu Unzufriedenheit, Diskomfort, fehlerhaftem Umgang mit Technik und einem erhöhten Ressourcenverbrauch führen. Die Sondierungsstudie zum Thema **„Nutzerkomfort durch Lowtech Konzepte in Gebäuden“** sollte Strategien eruieren, die durch die Umsetzung von einfachen Technikkonzepten sowohl den Nutzerinnen- und Nutzerkomfort als auch die Benutzerfreundlichkeit im Gebäude erhöhen. Ziel ist es, Lösungswege zu formulieren, die Nutzerinnen- und Nutzerzufriedenheit in Bezug auf den winterlichen und sommerlichen thermischen Komfort verbessern, den Energieverbrauch und die Betriebskosten reduzieren und somit auch die Lebenszykluskosten eines Gebäudes reduzieren.

Die parallel beauftragte Sondierungsstudie zum Thema **„Robuste, nutzerfreundliche und kostengünstige TGA in Gebäuden“** hatte das Ziel, Strategien und Maßnahmen zur Verbesserung der Gebäudeperformance zu entwickeln. In der Praxis treten häufig Performance Gaps, also die Diskrepanzen zwischen den Zielgrößen in der Planungsphase und den Messwerten im Gebäudebetrieb, auf. Diese können während unterschiedlicher Lebenszyklusphasen von Gebäuden entstehen, wodurch die Qualität des Gebäudebetriebes negativ beeinflusst wird. Um das Klimaschutzziel eines klimaneutralen Gebäudebestandes bis 2045 zu erreichen, müssen insbesondere wirksame

Methoden und Lösungen für Bestandsgebäude umgesetzt werden. Dabei muss der Fokus auf die Gebäude- und Anlagentechnik sowie deren Automation gelegt werden, da hierbei neben großen Energieeinsparpotenzialen auch häufig Effizienzlücken durch Betriebsfehler, unerwartetes Nutzerinnen- und Nutzerverhalten sowie Klimaveränderungen festgestellt werden.

An die bereits deutlich spürbaren Veränderungen des Klimas knüpft das dritte Projekt zum **„Sommerlicher thermischer Komfort“** an. Nach den vergangenen Sommern mit ungewöhnlich langen Hitzeperioden zeigen sich Gebäudenutzerinnen und -nutzer sowie Gebäudeplanerinnen und -planer im Hinblick auf den Einsatz von technischen Geräten zur Kühlung von Innenräumen in zunehmendem Maße sensibilisiert. Dies erschwert die argumentative Umsetzung von passiven Konzepten zur Klimaanpassung bisweilen sehr stark. Vor diesem Hintergrund und angesichts der sich verändernden klimatischen Bedingungen in Mitteleuropa sollte das Projekt den zukünftigen Handlungsspielraum für den weitgehenden Verzicht auf eine maschinelle Kühlung in Gebäuden ausloten, ohne die Gesundheit und die Leistungsfähigkeit der Gebäudenutzerinnen und -nutzer zu beeinträchtigen. Dabei sollen adaptive und interdependente Behaglichkeitsmodelle, die Erwartungen an Technik, die Möglichkeit der unmittelbaren Einflussnahme der Gebäudenutzerinnen und -nutzer auf das Raumklima, die aktuellen Testreferenzjahre (TRY) bzw. Prognosedaten des Deutschen Wetterdienstes (DWD) sowie die wichtigsten baulichen bzw. ausstattungspezifischen Parameter wie Fassaden- und Lüftungskonzepte, thermisch aktivierbare Baumasse, innere thermische Lasten etc. berücksichtigt werden.

## Lowtech im Gebäudebereich

In einer Zeit zunehmender Digitalisierung und Automatisierung scheint der Ruf nach einfachen und technikreduzierten Lösungen im ersten Moment ein Schritt zurück zu sein. Obwohl oder vielleicht gerade weil der Begriff Lowtech mittlerweile zu einem Schlagwort avanciert, ist es nicht ganz eindeutig, was eigentlich dahintersteht. Ausdrücke haben die Bedeutung, die wir ihnen geben. Weil das Wort *low* mit *niedrig*, *gering* oder *schwach* übersetzt werden kann, ist Lowtech teils negativ konnotiert. Betrachtet man Lowtech im Gebäudebereich jedoch weder als quantitative noch als qualitative Wertung, sondern als intelligente Verbindung nicht-„technisierter“ Maßnahmen unter Berücksichtigung sozialer und ökologischer Aspekte, kann darunter auch eine menschenfreundliche, ressourcen- und energiesparende Designstrategie verstanden werden.

Bei der ökologischen und ökonomischen Bewertung von Gebäudekonzepten sind stets alle beeinflussenden Parameter zu berücksichtigen – sowohl sämtliche generierten Kosten, Energie-, und Materialströme als auch die Wirkung auf und Bedürfnisse der Menschen, auch wenn diese nicht immer ausreichend abgebildet werden können. Gebäude sind Systeme – sie bestehen aus einer Vielzahl von Einzelkomponenten, die einander beeinflussen, sie existieren in Abhängigkeit von anderen Systemen und haben Auswirkungen darauf. Diese Auswirkungen werden unter anderem von den Umgebungsbedingungen, Gebäudeeigenschaften, dem historischen und regionalen Kontext und den Nutzenden bestimmt und beziehen sich auf die gesamte Lebensdauer eines Gebäudes und darüber hinaus.

Auch (oder vor allem) die eingesetzte Gebäudetechnik hat Auswirkungen auf Menschen, funktioniert aber auch nur mit Menschen. Wesentlich für das Funktionieren des Systems Gebäude unter energieeffizienten Gesichtspunkten ist deshalb die Einbindung der Personen, die in diesem System agieren, weil mitunter durchdachte Steuerungskonzepte von ihnen mitgetragen werden müssen. Um ihre Bereitschaft zu fördern, aktiver Teil dieses Systems zu sein, sind Akzeptanz und Komfort im Gebäude von entscheidender Bedeutung. Hier spielt vor allem die Schnittstelle zwischen Mensch und Technik eine Rolle – also ob und, wenn ja, welcher Beitrag geleistet werden muss, um ein bestimmtes Bedürfnis zu befriedigen.

Der vorliegende Band des Innovationsprogramms Zukunft Bau soll anhand dreier Forschungsprojekte darstellen, welchen Einfluss unterschiedliche Maßnahmen im Bereich der Gebäudeplanung und -ausstattung auf den Nutzerinnen- und Nutzerkomfort haben, inwiefern sie sowohl mit den Innenraumkonditionen wie beispielsweise dem Klima als auch mit deren Beeinflussungsmöglichkeiten zufrieden sind, welche technischen Systeme sich im Betrieb als besonders robust erweisen und inwiefern sogenannte Lowtech oder passive Konzepte zur Raumkonditionierung auf Akzeptanz stoßen. Aus diesen Erkenntnissen werden Strategien ermittelt und entwickelt, wie durch die Umsetzung von einfachen, robusten Technikkonzepten sowohl die Benutzerinnen- und Benutzerfreundlichkeit als auch der Nutzerinnen- und Nutzerkomfort in Gebäuden positiv beeinflusst werden.

## **Charakterisierung von Lowtech und Hightech**

Um die Bedeutung der Begriffe Lowtech und Hightech besser fassen zu können, wurden im Rahmen des Projekts „Nutzerkomfort durch Lowtech Konzepte in Gebäuden“ Interviews mit Fachleuten durchgeführt. Ziel war es, durch qualitative Interviews den bereits vorhandenen Wissensstand zu prüfen und weitere Erkenntnisse zu gewinnen. Die Befragten verfügen über umfangreiche Erfahrungen sowohl im Themenfeld des einfachen als auch in dem des hochtechnisierten Bauens und kamen konkret aus den Bereichen Architektur (AR), Forschung (FOR), Gebäudetechnik (GT) und Projektentwicklung (PE). Alle Befragten kommen demnach aus Tätigkeitsbereichen, in denen die Aspekte der Planung, des Betriebs, der Entwicklung sowie des Nutzerinnen- und Nutzerkomforts gut eingeschätzt werden können. Die Auswertung der Ergebnisse erfolgte mittels einer strukturierenden Inhaltsanalyse in Anlehnung an Mayring [2016]. Dazu wurden Kategorien definiert, denen exemplarisch Ankerbeispiele aus den Interviews zugeordnet wurden. Nach einem weiteren Durchlauf des Interviewmaterials wurden die Kategorien nochmals überarbeitet und Überkategorien gebildet. Danach erfolgte die Zuordnung relevanter Textbestandteile aus dem gesamten Interviewmaterial zu den Überkategorien. Die Textteile unter den einzelnen Kategorien wurden in der Folge zusammengefasst und mit konkreten Textstellen in Form von wörtlichen, aber anonymisierten Zitaten.

## **Charakterisierung von Lowtech**

In Bezug auf die Begriffsdefinition von Lowtech werden unterschiedliche Aspekte genannt, es ergibt sich aber trotzdem ein in sich schlüssiges Gesamtbild. Aus den Interviews geht hervor, dass weniger der generelle Verzicht auf technische Lösungen als

vielmehr die **Suche nach robusten, langlebigen und nachhaltigen Gebäuden** im Vordergrund steht. Es gehe um die Erarbeitung **sinnvoller, technikreduzierter Lösungsvorschläge**. Die Erwartungshaltung gegenüber Lowtech Lösungen sei, dass sie **reduzierte Ansprüche an den Betrieb und an das Facility Management** stellen. Mehrfach werden vergleichende Umschreibungen für Lowtech-Konzepte genutzt, wie beispielsweise die folgende:

„Das Fahrrad ist ein gutes Beispiel: Ein E-Bike ist eine Unterstützung. Müssten wir nicht Gebäude bauen, die uns unterstützen, aber nicht limitieren? Ohne Motor kann ich auch so weiterradeln – das Thema Lowtech steckt da drin: Es soll eine Unterstützung und keine Limitierung sein.“ (GT)

### Einsatz von Lowtech

**Nachhaltigkeits- und Gesundheitsaspekte** würden bei Lowtech stärker als bei High-tech-Gebäuden im Vordergrund stehen. Ein wichtiger Aspekt seien die **einsetzbaren Materialien** wie beispielsweise Ziegel oder Lehmputz und ihre baubiologische Bedeutung. Auch langfristige **Kosteneinsparungen** könnten ein Argument für Lowtech sein. So wird beispielsweise Betonkernaktivierung als günstige Lowtech-Lösung mit zugleich hohem Komfort mehrfach genannt. Als Einsatzgebiet mit dem größten Potenzial wird der **Bürobau** genannt. Hier erscheint der Einsatz von Lowtech aufgrund der vorherrschenden „Übertechnologisierung“ am sinnvollsten, wie eine befragte Person aus dem Bereich Projektentwicklung meint.

### Grenzen von Lowtech

Bei Lowtech-Konzepten wird eine gewisse **Trägheit bei Heizung und Kühlung** gerortet, die den Einsatz unter sensiblen Bedingungen wie in Museen oder bei einer schnell wechselnden Dichte von Menschen wie bei Hörsälen oder Veranstaltungsräumen erschweren oder ausschließen könne. Grenzen des Einsatzbereiches von Lowtech werden auch im **Hochhausbau** gesehen, wo starke Windlasten außenliegende Verschattungen erschweren oder nicht umsetzen ließen. Dies habe auch unmittelbare Auswirkungen auf die Architektur, wie die Vermeidung **großflächiger Verglasungen**. Aufgrund noch geringer Erfahrungswerte sei der **Aufwand der an der Planung** beteiligten Personen signifikant höher als bei gängiger Vorgehensweise („business as usual“). Dies stelle höhere Anforderungen an das **Budget in der Planungsphase** und auch an den Umgang mit bzw. bei der Interpretation von Normen.

### Beispiele für Lowtech

Das von allen Interviewpartnerinnen und -partnern genannte Beispiel für ein Gebäude mit einem Lowtech-Ansatz ist das Bürogebäude „**2226**“ des österreichischen Architekten Dietmar Eberle in Vorarlberg. Das Gebäude, das gleichzeitig Firmensitz ist, sei jenes Beispiel, an dem man sich momentan „messen und reiben“ müsse.

„Im Grunde ist das ein nachgebautes Gründerzeithaus: eine Passivhaushülle mit einer Dämmung aus speicherfähiger Ziegelwand, also mineralischem Material, außer am Dach da gibt es aus statischen Gründen wohl EPS oder etwas Ähnliches.“ (AR)

Das Gebäude greife auch punktuell auf hoch entwickelte Technologien zurück wie die komplexe Regelungstechnik der **automatisierten Lüftungsklappen** der Fenster für Lüftung und Nachtkühlung im Sommer. Die Nutzung der Abwärme der eingesetzten Beleuchtungskörper und elektronischer Geräte wie Computer wird einhellig als **Elektroheizung** identifiziert. Kritisch beurteilt wird der fehlende Sonnen- und Blendschutz. Das Gebäude sei zudem **schwer multiplizierbar**. Die speziellen **rechtlichen Rahmenbedingungen** für seine Umsetzung machen es ebenso zu einem Pionierprojekt wie die Tatsache, dass **Bauherr, Planer und Betreiber in Personalunion** auftreten. Diese Konstellation müsse auch bei der **Beurteilung des Nutzerinnen- und Nutzerkomforts** mitberücksichtigt werden, ebenso wie eine vergleichsweise geringe Nutzungsdichte innerhalb der Bürogeschosse.

Punktuelle Erwähnung finden das derzeit entstehende „**LowErgetikum**“ im burgenländischen Pinkafeld (Österreich) als Demonstrations- und Versuchsgebäude. Dort sollen unterschiedliche Grade eines Lowtech-Einsatzes hinsichtlich Gebäudetemperierung, Kühlung und Lüftung getestet werden. Das „**Solare Gewinnhaus N11**“ von 2014 im schweizerischen Zweisimmen, ein Büro-Wohnhaus als reiner Holzbau, komme ohne Heizungssystem aus, ebenso das „**Lehmhaus Rauch**“, ein Einfamilienhaus in Schlins (Vorarlberg, Österreich) von 2008 in Lehmbauweise. Als Beispiel für einen stark ortsspezifischen Lowtech-Einsatz wird die „**Zeche Zollverein**“ genannt, in der die Abwärme des Grubenwassers aus den ehemaligen Fördergruben für eine Bauteilaktivierung genutzt werde. Auch der Einsatz **vorhandener Bauressourcen** spiele bei einer ganzheitlichen Lowtech-Betrachtung eine Rolle.

## Charakterisierung von Hightech

Gegenüber den eben beschriebenen Aspekten von Lowtech werden Hightech-Anwendungen allgemein durch **hohe Komplexität** und einen **hohen Technisierungsgrad** beschrieben. Für Hightech-Lösungen sprächen Aspekte wie die **maximale Regelbarkeit** oder die **Einhaltung** der klassischen „26-Grad-Anforderung“. In diesem Zusammenhang wird auch das Argument der **niedrigen Energiekosten im Vergleich zu hohen Personalkosten** erwähnt, die bei Ausfall von Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern durch Krankheit aufgrund zu geringen Komforts entstünden. Der **Planungseinsatz** sei bei einem gängigen Ansatz besser kalkulierbar, ebenso wie das erzielbare Ergebnis und damit zusammenhängende Haftungsrisiken.

### Einsatz von Hightech

Als Beispiel für sinnvolle Einsatzbereiche von Hightech wird die Gebäudetechnik eines **Museums** genannt, um eine **konstante Luftfeuchtigkeit** unabhängig von den Außenbedingungen und der Besucherzahl zu gewährleisten. Auch in einem Bürohaus könnte sich eine BUS-Technologie als System zur Datenübertragung zwischen mehreren Teilnehmern über einen gemeinsamen Übertragungsweg rentieren, wenn beispielsweise im Zuge von Umstellungen **von Zellen- auf Großraumbüros** Beleuchtung durch einfaches „Umbefehlen“ geändert werden kann.

Im Sinne einer **optimalen Ausnutzung von Ressourcen** wird die Möglichkeit genannt, **Wärme und Strom** zwischen miteinander verbundenen Einheiten **zu verschieben**. Dadurch könne Leistung reduziert werden. Innerhalb eines Gebäudes könne diese beispielsweise über die Nutzung der Wärme von Allgemeinräumen, Geschäften

und Lokalen im Gebäudesockel für die Beheizung von Büros in den oberen Etagen genutzt werden. Gebäudeübergreifend werden beispielhaft die Nutzung von Überschusswärme von EDV-Zentren genannt oder Energienetze in der Schweiz im Bereich kalter Fernwärme. Das sei „nicht Lowtech, sondern der Versuch, Intelligenz-tech zu machen“, wie ein Gebäudetechniker meinte, da dies eine intelligente Steuerung wie durch BUS oder Mikroprozessoren bedinge. Beim Thema Strom wird der Einsatz von Energiegemeinschaften genannt, um Unterschiede in Verfügbarkeit und Bedarf von Strom innerhalb eines Netzes ausgleichen zu können. Dadurch könne auf Stromspeicher verzichtet werden.

### Grenzen von Hightech

Gegen den Einsatz von Hightech-Lösungen sprächen eine größere **Fehleranfälligkeit** und der Aufbau von **Abhängigkeiten** durch den Einsatz spezifischer, anbieterabhängiger Produkte. Dies könne dann problematisch werden, wenn man Dinge verändern will.

„Überlebt die Firma, die ein System liefert? Wir sind in einem Hamster-rad, die EDV muss dauernd upgedatet werden. Man muss das BUS-System immer am Laufen halten, neue Versionen aufspielen, das ist auch mit Kosten verbunden.“ (GT)

Bei digitalen Systemen komme die **Datenschutzproblematik** hinzu. Komplexe, smarte Regelungssysteme, die in der Lage seien, Nutzungsprofile zu erkennen, erweckten bei den Nutzerinnen und Nutzern mitunter Skepsis gegenüber dem dahinterliegenden Umgang mit derartigen Daten.

Unter allen genannten Gebäudetechnikaspekten wird die Kühlung als zentrale Herausforderung im gegenwärtigen Bürobau genannt. Es seien kaum aktuelle Büroneubauten bekannt, die ohne Klimatisierung oder Entfeuchtung auskämen. Dies hänge mit teils hohen Glasanteilen der Fassaden zusammen, der teils fehlenden Möglichkeit für außenliegende Beschattung sowie mit dem Anspruch der Nutzenden, verfügbare Technologie für den eigenen Komfort auch zu gebrauchen. Die Folge sei oft ein übermäßiger Umgang mit Kühlanlagen.

„Die Leute haben Ansprüche, die fordern etwas. Wenn man eine Kühlung hat, wird die ab 22 Grad aktiviert. Und wenn dem Nutzer dann jemand sagt: ‚sei doch vernünftig‘, dann sagt der: ‚du spinnst doch!‘“ (GT)

### Begriffsdefinition von Lowtech

Die Exploration zum Terminus Lowtech im Gebäudebereich zeigt, dass der Begriff ein weites Feld umfasst und unterschiedliche Assoziationen hervorruft. Um einen Begriff greifbarer zu machen, ist es oft hilfreich, den am gegenüberliegenden Ende der Skala stehenden zu definieren und mit dessen Hilfe eine Gegenthese zu erarbeiten. Hightech wird assoziiert mit Smarthome, hohem Supportbedarf, per Handy steuerbaren Geräten, hohem Herstellungs- und Energieaufwand der eingesetzten Materialien, aufwendiger Sensorik und vor allem großem Automationsanteil. Daraus abgeleitet würde Lowtech den Einsatz von mit geringem Aufwand und Energie hergestellten Materialien und eine reduzierte bzw. nicht vorhandene Technik und Automation bedeuten.

Nur – so einfach ist es leider nicht. Lowtech kann sowohl von unterschiedlichen Standpunkten als auch Ebenen betrachtet unterschiedliche Bedeutungen haben. Es ist die Frage zu beantworten, welches Ziel mit Lowtech-Strategien erreicht werden soll bzw. auf welche Bereiche sie Auswirkungen haben. Auch der Begriff Nachhaltigkeit wird in diesem Zusammenhang oft strapaziert, da beispielsweise bestimmte technische Lösungen einen geringeren Energiebedarf in der Nutzungsphase ermöglichen, allerdings einen höheren in der Herstellungsphase aufweisen. Zudem geht eine effiziente Energienutzung oftmals einher mit veränderten Materialkompositionen wie beispielsweise der Nutzung seltener Erden für erneuerbare Energiesysteme. Aus diesem Grund ist eine systemische Betrachtung des Gebäudes zweckmäßig, um wechselseitige „Abhängigkeiten zwischen physikalisch-geologischen und ökonomisch-sozialen Systemen“ zu verstehen [UBA 2019:52].

Es gibt eine Reihe von Aspekten, die ein sogenanntes Lowtech-Gebäude „greifbar“ machen (können), wie beispielsweise der kulturelle Kontext, die zeitlich-historische Einordnung, die isolierte Betrachtung einzelner Gebäudebestandteile, Nutzerinnen- und Nutzererwartungen oder herangezogene Definitionen. Selbst bei einer statischen Betrachtung kontemporärer Gebäude überschneiden sich die einzelnen Parameter und beeinflussen einander. Gebäude sind Systeme mit Wirkungen auf Mensch und Umwelt – ob und, wenn ja, welche Aspekte höhere Priorität haben als andere, ist im Einzelfall abzuwägen.

Die im Begriff Lowtech enthaltene Bezeichnung „Technik“ deutet einerseits auf die Art eines Vorganges bzw. einer Methode hin, andererseits auf materielle Artefakte. Rammer [2000:42] versteht darunter *„die Gesamtheit derjenigen kreativ und kunstfertig hervorgebrachten Verfahren und Einrichtungen [...], die in Handlungszusammenhänge als Mittler eingebaut werden, um Tätigkeiten in ihrer Wirksamkeit zu steigern [...]“. Technik umfasst sowohl das Inventar an gegenständlichen Instrumenten und Installationen als auch das Repertoire an Kunstfertigkeiten und Kenntnissen, im Umgang mit der Umwelt intendierte Zustände zu erzielen und unerwünschte zu vermeiden.“*

In Hinblick auf das Ziel des einfachen, ressourcen- und klimaschonenden Bauens sind darunter einerseits Maßnahmen zu verstehen, die ohne Einsatz zusätzlicher materieller Mittel unter Nutzung der inhärenten Materialeigenschaften und durch gezielte Schritte während des Planungsprozesses gesetzt werden (z. B. konstruktive Verschattung), andererseits Sachsysteme/Instrumente zur Beeinflussung der Umgebungsbedingungen, für deren Betrieb Energie benötigt wird (z. B. Komfortlüftung).

Den Technisierungsgrad in Gebäuden minimieren zu können, setzt weitreichende Maßnahmen im Planungsprozess voraus. Mit einem Fokus auf die Nutzerinnen und Nutzer wird unter einem Lowtech-Gebäude ein System verstanden, in welchem der Komfort in erster Linie durch die Gebäude- und Materialeigenschaften selbst erreicht wird, ergänzt durch minimal eingesetzte, leicht regel- und wartbare Haustechnik zur Sicherstellung von „passiv“ nicht abgedeckten Nutzerinnen- und Nutzerbedürfnissen. Die Abwägung zwischen minimal notwendiger Technik und zu erzielendem Komfort muss im Einzelfall und unter Berücksichtigung der jeweiligen Bauaufgabe und der Rahmenbedingungen erfolgen.



## 02 Forschungsergebnisse

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

Um dem anthropogenen Klimawandel entgegenzuwirken und ihn bremsen zu können, ist ein massives Umdenken erforderlich. Insbesondere der Bau- und Gebäudesektor muss hierzu einen entscheidenden Beitrag leisten. Auf diesen Bereich entfallen in Deutschland während Herstellung, Bau und Betrieb etwa 90 % der mineralischen Rohstoffe [VDI 2021], circa 35 % des Endenergieverbrauchs [Dena 2021] und rund 40 % der CO<sub>2</sub>-Emissionen [Frischknecht 2020]. Dementsprechend müssen wirksame Maßnahmen entwickelt und umgesetzt werden, um die ambitionierten Klimaziele der Bundesregierung, einen bis 2045 nahezu klimaneutralen Gebäudebestand, zu erreichen.

Das gemeinsame Anliegen der drei hier zusammengefassten Zukunft-Bau-Forschungsprojekte ist es, alternative Strategien zu eruieren, die die Umweltwirkung des Gebäudebestands nachhaltig reduzieren. Der Fokus auf technikzentrierte Effizienzstrategien hat in den vergangenen Jahrzehnten nicht zu den gewünschten Effekten geführt. Einfaches und technikreduziertes Bauen, das einen Schwerpunkt auf Konsistenz- und Suffizienzansätze legt, gilt als notwendige ergänzende Strategie, um die Ziele des Klima- und Ressourcenschutzes zu erreichen und die Robustheit sowie Benutzerfreundlichkeit von Gebäuden zu erhöhen. Im Folgenden werden dabei sowohl die unterschiedlichen Perspektiven der Projekte dargestellt, die die jeweilige methodische Vorgehensweise sowie das Forschungsdesign der Studien wesentlich bestimmt haben, als auch die wesentlichen Forschungsergebnisse zusammengefasst.

# Nutzerkomfort durch Lowtech-Konzepte in Gebäuden

---

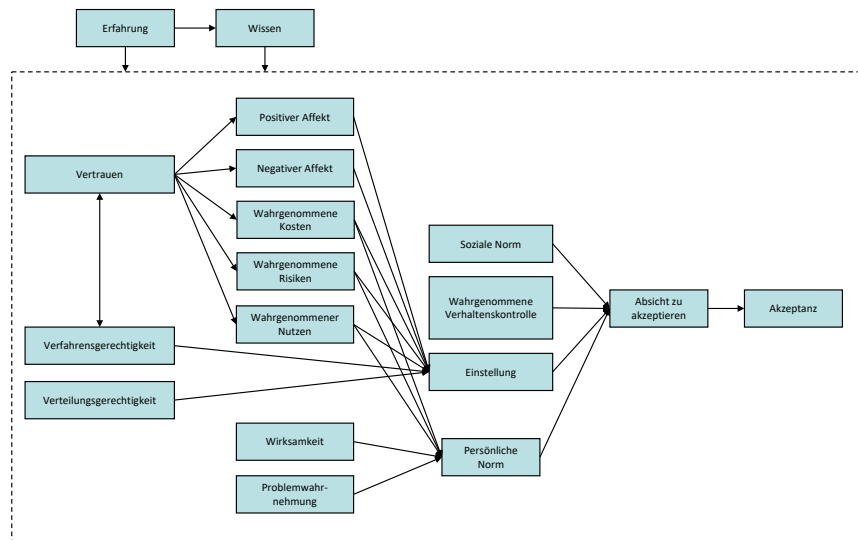
**Daniel Bell, Ernst Gruber, Margarete Huber, Bernhard Lipp,  
Ute Muñoz-Czerny, Patrick Vidovic, Thomas Zelger**

Die Kontrollmöglichkeiten individueller Raumkonditionierung spielen eine wachsende Rolle für Komfort sowie Nutzerinnen- und Nutzerzufriedenheit. Aktuelle Studien zeigen, dass Lowtech-Lösungen, die beispielsweise nur eine manuelle Steuerung der Beschattung oder der Beleuchtung zulassen, zu einem höheren Maß an allgemeiner Nutzerinnen- und Nutzerzufriedenheit führen als Lösungen, in denen diese Funktionen voll automatisiert ausgeführt werden [Boerstra 2010]. Diese Effekte manueller Eingriffsmöglichkeiten auf den visuellen Komfort und die subjektive Nutzungszufriedenheit eines Raumes bzw. eines Gebäudes sind unter anderem auf das psychologische Kontrollbedürfnis der eigenen Umgebung zurückzuführen, das in voll automatisierten Umgebungen nur schwer oder gar nicht befriedigt werden kann.

Der subjektive Nutzungskomfort in energieeffizienten Gebäuden wird neben der Möglichkeit, manuelle Einstellungen vornehmen zu können, auch durch Aspekte wie Vorhersehbarkeit und Nachvollziehbarkeit der technischen Funktionsweise beeinflusst. Die teilweise Unvorhersehbarkeit und damit verbundene Störungen automatischer Beschattungsanlagen können diesbezüglich zu erheblichem visuellen Diskomfort führen, wie experimentelle Studien im Bürokontext zeigen [vgl. Grunning 2017].

Empirische Analysen haben mittlerweile umfassend nachgewiesen, dass sowohl Nutzungskomfort als auch Nutzungszufriedenheit, Gesundheit und Produktivität am Arbeitsplatz unmittelbar durch die aktive Einbindung der Nutzerinnen und Nutzer in die Steuerung der Gebäudefunktionen erhöht werden und gleichzeitig die Energieeffizienz gesteigert werden kann [Loftness 2018]. Die Potenziale von Lowtech-Lösungen, die sich weniger auf die aktive Interaktion mit IoT-Lösungen (Internet of Things) zur Beeinflussung der Raumbedingungen stützen, sondern stärker auf die aktive und manuelle Steuerung durch entsprechend informierte Nutzerinnen und Nutzer, werden als vielversprechender Ansatz herausgestrichen. Nutzerinnen- und Nutzerbefragungen können in diesem Zusammenhang durch die Erfassung der konkreten Bedürfnisse am Arbeitsplatz weiteren Einblick in die idealen Konditionen bei der Nutzung von Lowtech-Gebäuden liefern und Alternativen zum Modell der automatisierten Gebäudeinteraktion aufzeigen.

Die Erhöhung der Akzeptanz von Maßnahmen zur Verbesserung der Energieeffizienz ist unter anderem abhängig von den individuellen Bedürfnissen unterschiedlicher Nutzerinnen- und Nutzergruppen in Hinblick auf Technologieakzeptanz und Technikaffinität. Die entsprechende Berücksichtigung soziodemografischer, arbeitsorganisatorischer sowie einstellungsbezogener Faktoren kann dabei helfen, ein empirisch differenziertes Bild der Nutzungszufriedenheit mit Lowtech-Konzepten zu zeichnen [Schiavon 2014: 148 ff. und Wissner 2018: 45 ff.]



**Abbildung 1:** Technologieakzeptanz Rahmenmodell [angepasst nach Hujits 2012: 530]

Die Akzeptanz jeder Form von technologischer Innovation durch Nutzerinnen und Nutzer – auch von Lowtech-Lösungen, die ein Mindestmaß an Nutzerinnen- und Nutzerinteraktion erfordern – muss im Spannungsfeld subjektiver und gesellschaftlicher Einflussfaktoren analysiert werden.

In Gebäuden mit niedrigerem Technisierungsgrad, in denen die Eingriffsmöglichkeiten zur Steuerung der Gebäudetechnik von außen (oder Feinjustierung durch ein automatisiertes Steuerungssystem) gering und damit die notwendige Interaktion zur Sicherstellung der eigenen Komfortbedürfnisse im Vergleich höher sind, sind Analyse und Maßnahmen zur Beeinflussung einzelner Dimensionen des Technologieakzeptanz-Rahmenmodells entscheidend. Nachdem das Arbeitsumfeld ein teilweise höheres Maß an interpersonellen Abstimmungen hinsichtlich individueller und kollektiver Präferenzen erfordert, kann die Identifikation spezifischer Bedürfnisgruppen hier Ansätze liefern, die die Akzeptanz auch in komplexen Nutzungsszenarien sicherstellen.

Mohs [2007: 165ff] differenziert im Kontext der Mensch-Technik-Interaktion spezifisch zwischen Erwartungskonformität, dass die Funktionen oder Ergebnisse von Handlungen, die bewusst oder unbewusst angenommen werden, auch eintreten, und der tatsächlichen Benutzbarkeit, die wiederum eine intuitive und nicht auf einer Einschulung basierende Anwendung voraussetzt.

Im Arbeitsplatzkontext zeigen Befragungsdaten, dass die Erwartungshaltung einen Effekt auf die Arbeitsplatzzufriedenheit haben kann, wobei dies vor allem für die Bewertung des thermischen Komforts von Bedeutung ist [Gossauer 2008: 52]. Suschek-Berger [2014: 82] geben an, dass gerade in Hightech-Gebäuden ein signifikanter Zusammenhang zwischen dem Wissen um Eingriffsmöglichkeiten in die Haustechnik und der Arbeitsplatzzufriedenheit besteht. Generell ist anzunehmen, dass die Erwartungshaltung gegenüber einem Gebäude, in dem der alltäglichen Arbeit nachgegangen wird, vom jeweiligen, den Arbeiterinnen und Arbeitern bekannten Gebäudestandard abhängig ist.

Ähnliche Schlüsse lassen sich auch durch das Beispiel der Lichtbedingungen ziehen, wobei Moosmann [2003] zeigt, dass beispielsweise mit der Gestaltung des Gebäudes konkrete Erwartungen an die Beleuchtung verbunden sind (z. B. mehr Glasflächen – mehr Licht).

Hinsichtlich der Steuerungsmöglichkeiten am Arbeitsplatz zeigte sich bereits bei Brägger [2004: 32], dass sich mit höherer individueller Kontrolle über die Haustechnikfunktionen am eigenen Arbeitsplatz auch die Erwartungen an den thermischen Komfort verändern – je mehr Kontrollmöglichkeiten, umso eher entsprechen neutrale Temperaturen den idealen Raumtemperaturen. Je höher die Zufriedenheit mit den persönlichen Kontrollmöglichkeiten in der Arbeitsumgebung, umso höher die allgemeine Zufriedenheit mit dem Arbeitsplatz, wobei diese saisonabhängig bzw. nicht immer positiv korreliert sind – zum Beispiel ist im Sommer der Einfluss auf die Temperatur und die Beschattung wichtig, während sich umfassendere Kontrollmöglichkeiten der Ventilation negativ auf das Komfortempfinden auswirken [Bluyssen 2011].

Nach durchgeführter Literaturrecherche konnten zwei wesentliche Erkenntnisse hervorgehoben werden:

1. Nutzerinnen und Nutzer, die stärker mit dem Gebäude interagieren können, sind zufriedener.
2. Die Erwartungen der Nutzerinnen und Nutzer an das Gebäude (Low- und Hightech) beeinflussen deren Akzeptanz von Raumklima und Komfort.

## Interviews mit Expertinnen und Experten

Im Rahmen einer empirischen Erhebung wurden zunächst sechs Expertinnen- und Experteninterviews durchgeführt. Ziel war es, durch qualitative Interviews die bereits recherchierten Ergebnisse aus der Literatur zu prüfen und für die quantitativen Feldstudien weitere Erkenntnisse zu gewinnen. Dadurch sollten mögliche Wissenslücken geschlossen und potenzielle neue Fragestellungen erkannt werden. Die Befragten verfügen über umfangreiche Erfahrungen sowohl im Themenbereich „Lowtech“ als auch „Hightech“ und kamen konkret aus den Bereichen:

- Architektur (AR)
- Forschung (FOR)
- Gebäudetechnik (GT)
- Projektentwicklung (PE)

Alle Befragten kommen demnach aus Tätigkeitsbereichen, in denen die Aspekte der Planung, des Betriebs, der Entwicklung sowie des Nutzerinnen- und Nutzerkomforts gut eingeschätzt werden können. Es wurden zwei Frauen und vier Männer befragt.

## Methodische Umsetzung

Für alle Interviews wurden Leitfäden erstellt, die den Interviewpartnerinnen und -partnern vorab zugeschickt wurden. Die Leitfäden orientierten sich an den Leitthemen **Kontext und Diskurs, Definition bzw. Unterschied Hightech zu Lowtech**, Aspekte der **Planung** und der **Haustechnik** und des **Betriebs**, Aspekte der **Flexibilität** und

späteren Nutzungsänderung, **Kosten**, rechtliche **Normen** sowie **Komfortaspekte** und **Aspekte die Nutzerinnen und Nutzer betreffend**. Abschließend wurden alle Befragten um einen Ausblick sowie eine Einschätzung die zukünftigen Entwicklungen im Bereich Lowtech betreffend gebeten.

### **Ergebnisse**

Hinsichtlich des Begriffes Lowtech-Architektur geht aus den Interviews hervor, dass dabei weniger der generelle Verzicht auf technische Lösungen als die Suche nach robusten, langlebigen und nachhaltigen Gebäuden im Vordergrund steht. Dies geht mit technikreduzierten Lösungsvorschlägen und damit reduzierten Ansprüchen an den Gebäudebetrieb einher. Im Gegensatz dazu stehen Hightech-Lösungen mit maximaler Regelbarkeit der Technikausstattung, die vor allem bei Nutzungsprofilen wie Museen oder Hörsälen sinnvoll erscheinen.

Es wird des Öfteren auf traditionelle Lowtech- und gründerzeitliche Architekturprinzipien verwiesen. Bei der Frage nach der Beschaffenheit der Technikausstattung in Lowtech-Gebäuden werden vor allem Begriffe wie robust, fehlerstabil, effizient und intelligent genannt. Dies fordere eine intuitive Bedienung der vorhandenen komfortbeeinflussenden Ausstattung (z. B. Sonnenschutz, Temperaturregung usw.) sowie ausreichende Kommunikation und einen verständlichen Handlungs-Wirkungs-Zusammenhang. Im Hinblick auf den späteren Nutzerinnen- und Nutzerkomfort wie auch auf die Energieeffizienz im Betrieb wird die Rolle der Facility-Managerinnen und -Manager als sehr wichtig eingeschätzt.

### **Interviews mit Nutzerinnen und Nutzern**

Ziel der Befragungen von Nutzerinnen und Nutzern ausgewählter Testgebäude war die Erstellung eines standardisierten Fragebogens zur Bewertung der Gebäude-Performanz aus Nutzerinnen- und Nutzersicht. Der Fokus sollte auf Bürogebäuden liegen, wobei insbesondere die spezifischen Anforderungen an Lowtech-Ausführungen abgedeckt werden sollten. Zum Zwecke der Übertragbarkeit bzw. zur Erhöhung der Vergleichbarkeit der gewonnenen empirischen Ergebnisse sollte das zu entwickelnde Instrument leicht handhabbar und praktikabel in der Auswertung durch Dritte sein. Zusätzlich sollten die Ergebnisse mit Messdaten (objektiven Raumkomfortmessungen) zu den untersuchten Gebäuden abgleichbar sein, um eine Überprüfung der individuellen Komfortwahrnehmung mit den tatsächlich vorhandenen Bedingungen vor Ort durchführen zu können. Die Ergebnisse sollten, wenn möglich, mit anderen vorliegenden Ergebnissen von Nutzerinnen- und Nutzerbefragungen vergleichbar sein und in hohem Maße den Gütekriterien der Reliabilität und Validität gerecht werden.

### **Hypothesen**

Durch die Anwendung eines standardisierten Fragebogens sollen konkrete Hypothesen getestet werden. Diese wurden aus der Literaturrecherche und den ursprünglichen Fragestellungen abgeleitet. Durch die Prüfung der Hypothesen basierend auf dem gesammelten Datenmaterial in Gebäuden mit unterschiedlichen technischen Standards werden konkrete Vergleiche zwischen Hightech und Lowtech-Gebäuden hinsichtlich unterschiedlicher Komfortparameter möglich. Darüber hinaus lassen sich

Anforderungen ableiten, die Lowtech-Gebäude erfüllen müssen, um als komfortabel erlebt zu werden. Den Kern bilden dabei folgende Hypothesen:

1. Nutzerinnen und Nutzer von Lowtech-Gebäuden sind zufriedener oder mindestens ebenso zufrieden mit ihren Gebäuden wie Nutzerinnen und Nutzer von Hightech-Gebäuden
2. In Lowtech-Gebäuden gibt es mehr Eingriffsmöglichkeiten in Bezug auf Komfortparameter als in konventionellen oder Hightech-Gebäuden
3. Je umfassender die Eingriffsmöglichkeiten auf Komfortparameter sind, umso zufriedener sind die Nutzerinnen und Nutzer.

### **Befragungsdesign**

Als Basis für die Erstellung des Fragebogens wurde der „INKA“-Fragebogen (*Instrument für Nutzerbefragungen zum Komfort am Arbeitsplatz*) des Karlsruher Instituts für Technologie verwendet. Dieser wurde im Zeitraum 2008 bis 2010 von Andreas Wagner und Karin Schakib-Ekbatan im Rahmen des Bauforschungsprojekts „Nutzerzufriedenheit als ein Indikator für die Beschreibung und Beurteilung der sozialen Dimension der Nachhaltigkeit“ entwickelt [Schakib-Ekbatan 2012]. Ziel war dabei die Entwicklung eines Verfahrens zur Bewertung der Gebäude-Performanz aus Nutzerinnen- und Nutzersicht in Bürogebäuden mit spezifischem Fokus auf die Effekte variierender Gebäudestandards auf Wohlbefinden und Zufriedenheit der Arbeitenden und Angestellten. Dazu wurde ein computer- bzw. webbasierter Fragebogen erstellt, welcher die generelle Gebäudequalität misst, und zwar anhand der Überdimensionen „Arbeitsplatz“, „gebäudebezogene Qualität“ und „Standortqualität“ und 24 Subkriterien in Kombination mit zentralen soziodemografischen Variablen und Angaben zu Erfahrung und Nutzungskontexten des Gebäudes. Das standardisierte Befragungstool lässt dadurch umfassende Aussagen über die Nutzerinnen- und Nutzerzufriedenheit zu.

Darüber hinaus bietet der Gebäude-Gesamtindex, der alle Komfortbereiche kombiniert, eine leicht vergleichbare Maßzahl zur Identifikation von Differenzen unterschiedlicher Gebäude und Gebäudestandards.

Umfassend wurden sieben zentrale Komfortdimensionen (Lichtverhältnisse, Temperaturverhältnisse, Luftqualität, Akustik/Geräuschpegel, räumliche Bedingungen, Möblierung/Gestaltung, Nutzerinnen- und Nutzerfreundlichkeit des Gebäudes) erfasst, welche anhand mehrerer spezifischer Subskalen gemessen werden. Insgesamt beinhalten diese 78 Fragen zur Testung eines umfassenden Spektrums der jeweiligen Dimensionen. Sie gehen modularisiert in die einzelnen Indizes ein.

Um die Themenaspekte aus den Bereichen Lowtech und Hightech, welche im Rahmen der Recherchen und Vorarbeiten des Projekts umfassend definiert wurden, in den Fragebogen zu integrieren, wurden Ergänzungen und Modifikationen derart vorgenommen, dass sich einerseits keine Nachteile hinsichtlich Reliabilität und Validität der gesammelten Daten ergeben und gleichzeitig die relevanten Dimensionen des Forschungsprojekts umfassend miteinbezogen werden konnten.

### Referenzstudie

Zur Interpretation der Ergebnisse der Standard-INKA-Komfortdimensionen boten sich die **Daten aus Referenzstudien** von Schakib-Ekbatan [2011] aus 45 Vergleichsgebäuden unterschiedlicher Ausstattung an. Die Referenzdaten basieren auf Ergebnissen aus 26 Gebäuden und wurden in den Winter- und Sommermonaten in den Jahren 2005 bis 2011 gesammelt. Die Referenzgebäude bzw. die Ergebnisse der Studien in den jeweiligen Winter- bzw. Sommermonaten zeigen, dass sich zu beiden Jahreszeiten die Zufriedenheit im Mittel minimal im positiven Bereich bewegt. Ausschlaggebend ist dabei in den Wintermonaten vor allem der Aspekt der Luftqualität, während in den Sommermonaten vor allem die Temperaturverhältnisse eher negativ gewertet werden.

### Untersuchungsgebäude

Zusätzlich zum Pre-Test der empirischen Testmethode an der ENERGYbase (AUT, Wien [pos-architecture.com/projects/energy-base](http://pos-architecture.com/projects/energy-base)) wurden im Rahmen der Studie Daten in den folgenden Gebäuden erhoben:

- Haus des Lernens/AUT/Sankt Pölten
- Haus 2226/AUT/Lustenau
- BMI Krausenstraße/D/Berlin
- BBSR Reichpietschufer/D/Berlin
- Stadtelefant/AUT/Wien
- Ökologie-Institut/AUT/Wien

Bei Vergleich der Testgebäude nach Technisierungsgrad ergeben sich drei unterschiedliche Segmentierungsmöglichkeiten in Abhängigkeit von der Nutzung aktiver Klimatisierung:

- **Lowtech**
  - Haus 2226
  - BMI Krausenstraße
  - Ökologie-Institut
- **Midtech**
  - Haus des Lernens
  - Stadtelefant
- **Hightech**
  - BBSR Reichpietschufer

Eine detaillierte Beschreibung der Untersuchungsgebäude ist dem Endbericht der Studie „Nutzerkomfort durch Lowtech in Gebäuden“ zu entnehmen.

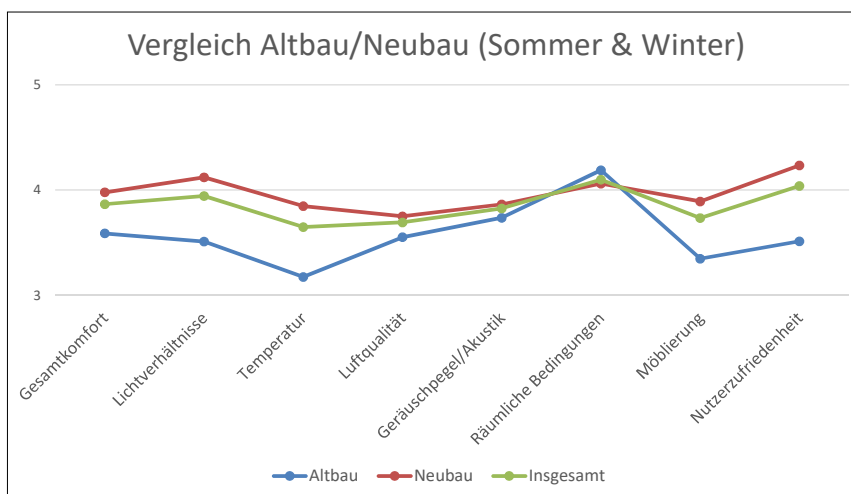
### Saisonale Vergleiche

Im übergeordneten Vergleich werden die Gebäude mit aktiver Kühlung am besten bewertet – konkret das Haus des Lernens (Wien, AUT) und das BBSR-Gebäude am Reichpietschufer (Berlin, DE), gefolgt von 2226 (Lustenau, AUT) und Stadtelefant (Wien, AUT). Betrachtet man die durchschnittlichen Gesamtgebäudekomfortbewertungen der 215 Studienteilnehmerinnen und -teilnehmer sowohl im Sommer (n = 112) als auch im Win-

ter (n = 103), lassen sich eindeutig zwei Testgebäude identifizieren, welche weniger positiv bewertet werden als die anderen: das BMI-Gebäude in der Krausenstraße und das Ökologie-Institut – beide Gebäude lassen sich in Hinblick auf die technische Nutzung aktiver Klimatisierung den Lowtech-Gebäuden der Testgebäude zuordnen. Insgesamt liegen alle Gebäude sowohl im Sommer als auch im Winter über den Referenzgebäuden der Ursprungsstudie des Karlsruher Instituts für Technologie.

Betrachtet man die Komfortparameter im saisonalen Vergleich, zeigen sich über alle Testgebäude hinweg erhebliche Unterschiede vor allem in den Bereichen Temperatur, Luftqualität und Nutzerinnen- und Nutzerzufriedenheit, in denen der Winterfall besser bewertet wird als der Sommerfall. Lediglich im Bereich Geräuschentwicklung bzw. der Akustik in den Arbeitsbereichen wurden durchschnittlich minimal bessere Bewertungen in den Sommermonaten verzeichnet als in den Wintermonaten.

Betrachtet man den Gesamtkomfort im saisonalen Vergleich, zeichnet sich ein Bild, das sich auch in den Referenzstudien wiederfindet: Nutzerinnen und Nutzer aller Gebäude, bis auf eine Ausnahme, geben in den Wintermonaten signifikant höhere Komfortbewertungen ab als in den vergleichbaren Sommermonaten. Diese Bewertungen sind in erster Linie auf die Temperatur und die (technischen) Möglichkeiten, diese aktiv zu beeinflussen, zurückzuführen. Beide Aspekte werden im Sommer signifikant schlechter bewertet, als dies in den Wintermonaten der Fall ist.



**Abbildung 2:** Vergleich zwischen Alt- und Neubauten in Hinblick auf die mittleren subjektiven Komfortparameter

Ausgehend von den Baujahren der Testgebäude konnten diese in Alt- und Neubauten eingeteilt werden, wodurch neue Vergleichsdimensionen erschlossen werden konnten. Sowohl in Hinblick auf die subjektive Bewertung des Gesamtkomforts als auch hinsichtlich der einzelnen Komfortparameter ergeben sich dadurch erhebliche Unterschiede zwischen den Bewertungen. Im Vergleich der Gesamtergebnisse zwischen Alt- und Neubauten werden über alle Komfortdimensionen hinweg die Neubauten in Hinblick auf den Komfort besser bewertet als die Altbauten. Die größten Differenzen zeigen sich im Bereich der Temperaturverhältnisse und der allgemeinen Nutzerinnen- und Nutzerzufriedenheit. Bei Berücksichtigung saisonaler Unterschiede in diesem Zusammenhang zeigt

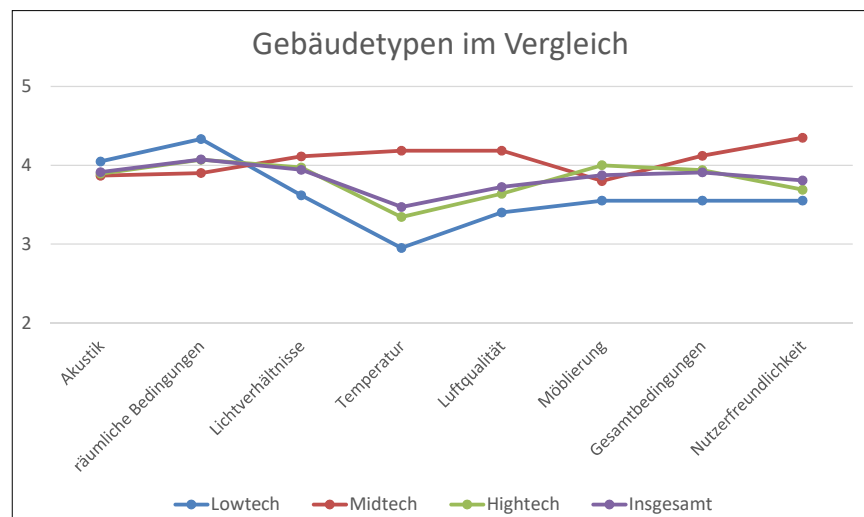
sich, dass sich Alt- und Neubauten in Hinblick auf den Nutzerinnen- und Nutzerkomfort vor allem in den Wintermonaten am deutlichsten unterscheiden.

*Die Nutzerinnen- und Nutzerzufriedenheit ist in den Wintermonaten generell höher als in den Sommermonaten. Diese Unterschiede sind vor allem auf die technischen Möglichkeiten zurückzuführen, im Winter die Lufttemperatur an die individuellen Komfortbedürfnisse anzupassen.*

### Nutzerinnen- und Nutzerkomfort in Low-, Mid- und Hightech-Gebäuden

Im Vergleich der zentralen Komfortparameter nach oben genannter Differenzierung zeigt sich, dass die Lowtech-Gebäude in Hinblick auf die allgemeinen Komfortparameter Lichtverhältnisse, Temperatur, Möblierung und auch die Bewertung der Gesamtbedingungen schlechter abschneiden als Mid- und Hightech-Gebäude. Allerdings bleiben die Bewertungen der Teilnehmerinnen und Teilnehmer auch bei diesen Gebäuden immer über dem Mittel der Referenzgebäude in Sommer und Winter und damit im Bereich einer generell positiven Gesamtbewertung.

Die Hypothese hinsichtlich der Differenzierung von Lowtech und Hightech, war, dass Nutzerinnen und Nutzer von Lowtech-Gebäuden mindestens ebenso zufrieden mit ihren Gebäuden wie Nutzerinnen und Nutzer von Hightech-Gebäuden sind oder gar zufriedener, konnte im Rahmen dieser Studie nicht nachgewiesen werden. Es zeigt sich, dass in Hinblick auf Lichtverhältnisse, Temperatur, Möblierung und Gesamtbedingungen die Lowtech-Gebäude weniger positiv bewertet werden als Mid- oder Hightech-Gebäude.



**Abbildung 3:** Vergleich zwischen Low-, Mid- und Hightech-Gebäuden in Hinblick auf die mittleren subjektiven Komfortparameter

Berücksichtigt man die Jahreszeit zusätzlich im Vergleich der Gebäudetypen, zeigen sich keine signifikanten Effekte – dementsprechend sind die Nutzerinnen und Nutzer von High-, Mid- und Lowtech-Gebäuden nicht unterschiedlich unzufriedener oder zufriedener in Abhängigkeit von der Jahreszeit (Sommer, Winter).

Entgegen der ursprünglichen Annahme ist die Zufriedenheit der Nutzerinnen und Nutzer hinsichtlich der zentralen Komfortdimensionen in den untersuchten Lowtech-Gebäuden geringer als in den Mid- und Hightech-Gebäuden. Sie liegen aber trotzdem über dem Mittel der Referenzgebäude der INKA-Studie.

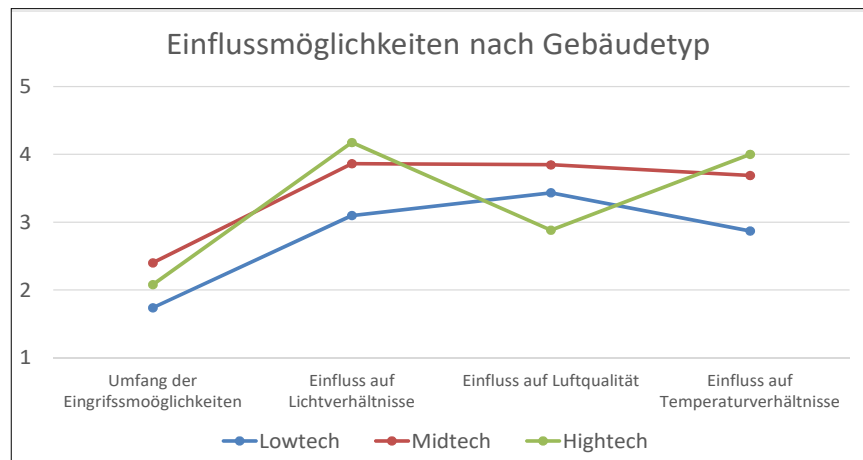
### **Eingriffsmöglichkeiten und Nutzerinnen- und Nutzerkomfort**

Eine Annahme der Studie war, dass die Möglichkeiten des Eingriffs in die Steuerung des Gebäudes zur Beeinflussung der zentralen Komfortparameter einen zentralen Aspekt im Kontext der Nutzerinnen- und Nutzerzufriedenheit darstellen. Diese Annahme konnte weitestgehend bestätigt werden. Die Hypothese, dass aus Sicht der Nutzerinnen und Nutzer in Lowtech-Gebäuden mehr Eingriffsmöglichkeiten als in konventionellen oder Hightech-Gebäuden zur Verfügung stehen, kann in den Testgebäuden nicht nachgewiesen werden – es gibt keine signifikanten Unterschiede in Hinblick auf die Bewertung der Eingriffsmöglichkeiten zwischen den definierten Gebäudetypen.

In Hinblick auf den Informationsstand der Teilnehmerinnen und Teilnehmer, Energie sparen zu können, ohne Komfortverluste in Kauf nehmen zu müssen, ergeben sich Unterschiede zwischen den Testgebäuden. Vor allem in den Lowtech-Gebäuden schätzt sich ein überwiegender Anteil bezüglich der Möglichkeiten, Energie zu sparen, ohne Einbußen beim individuellen Komfort in Kauf nehmen zu müssen, als gut informiert ein.

*Nutzerinnen und Nutzer in den untersuchten Lowtech-Gebäuden haben weniger Einflussmöglichkeiten auf die Komfortparameter als in den übrigen Gebäudetypen. Die Möglichkeiten, die in den Gebäuden zur Verfügung stehen, werden allerdings in allen Gebäudetypen auf gleichem Niveau positiv bewertet.*

Eine weitere Hypothese in diesem Zusammenhang adressiert ebenfalls die Möglichkeiten des Eingriffs in die Komfortparameter – konkret den Umfang der Möglichkeiten: Je umfassender die Eingriffsmöglichkeiten und damit die aktive Einbindung in die Steuerung der Komfortparameter wahrgenommen werden, umso zufriedener sind die Nutzerinnen und Nutzer. Diese Hypothese kann verifiziert werden – der Umfang (die Bewertung der Möglichkeiten des Eingriffs) korreliert mit starkem positiven Effekt, signifikant mit der Gesamtzufriedenheit der Teilnehmerinnen und Teilnehmer der Studie. Demnach ist hier der Umfang der Einflussmöglichkeiten eher entscheidend als die generelle Zufriedenheit mit den tatsächlich zur Verfügung stehenden Möglichkeiten. Darüber hinaus korreliert der Umfang der Einfluss- und Interaktionsmöglichkeiten – neben den Gesamtbedingungen – auch stark mit den einzelnen Komfortparametern: Nutzerinnen- und Nutzerfreundlichkeit, Akustik, Lichtverhältnisse, Luftqualität, Temperatur und Gestaltung des Büros.



**Abbildung 4:** Vergleich zwischen Low-, Mid- und Hightech-Gebäuden in Hinblick auf die mittleren subjektiven Komfortparameter

*Je mehr Möglichkeiten des Eingriffs in die Komfortparameter des Gebäudes verfügbar sind, umso höher ist die Gesamtzufriedenheit mit dem Gebäude. Darüber hinaus haben umfassende Interaktionsmöglichkeiten mit dem Gebäude einen positiven Effekt auf die Zufriedenheit mit Nutzerinnen- und Nutzerfreundlichkeit, Akustik, Lichtverhältnisse, Luftqualität, Temperatur und Gestaltung des Büros.*

## Zusammenfassung

Die Erhebung der Nutzerinnen- und Nutzerbedürfnisse über mehrere Sommer- und Wintersaisons hinweg bringt neben den saisonalen Vergleichsmöglichkeiten vor allem entsprechende Varianzen hinsichtlich der Komfortparameter und der Gebäudegesamtbewertung in den erfassten Gebäudetypen und Regionen. Darüber hinaus bietet die Erweiterung des Gebäudebestands – zusätzlich zu den Referenzgebäuden der Ursprungsstudie zur INKA-Entwicklung durch das Karlsruher Institut für Technologie – das Potenzial neuer Differenzierungen der Komfortbewertungen, beispielsweise durch die Einführung neuer Gebäudetypen (u. a. der Vergleich zwischen Alt- und Neubau sowie die Differenzierung in Low-, Mid- und Hightech).

Generell zeigen die Auswertungen über alle Testgebäude hinweg, dass der Trend der Referenzstudie mit positiveren Bewertungen im Winterhalbjahr auch hier beobachtbar ist. Diese Unterschiede lassen sich hauptsächlich auf die fehlenden Möglichkeiten zurückführen, im Sommer die Lufttemperatur an die individuellen Komfortbedürfnisse anzupassen. Vergleicht man nach Gebäudetyp, werden die Lowtech-Gebäude weniger positiv bewertet als die höher technisierten Gebäude (der Technisierungsgrad ist hier mit der aktiven Kühlung der Gebäude assoziiert).

Einige Gebäude stellen in Bezug auf einzelne Komfortparameter in den beiden Testsaisonen Ausreißer dar: Das BMI Krausenstraße, gefolgt vom Ökologie-Institut, stellt das am schlechtesten bewertete Gebäude in Bezug auf die Nutzerinnen- und Nutzerzufriedenheit dar. Allgemein weist das BMI-Gebäude in der Krausenstraße bis auf den Komfortparameter der räumlichen Bedingungen die niedrigsten Bewertungen der

Nutzerinnen und Nutzer auf und hat einen entsprechenden Einfluss auf die Clusterergebnisse der Lowtech-Gebäude im Gebäudetypenvergleich. Diese Ergebnisse verweisen auf zwei zentrale weiterführende Themenstellungen auf methodischer Ebene: Auf die Relevanz eines ausreichend großen Gebäude-Samples mit Erhebungen zu unterschiedlichen Saisons kann nicht oft genug verwiesen werden. Dadurch können Ausreißer identifiziert und entsprechende Segmentierungen der Gebäudetypen im Rahmen der Analyse verbessert werden. Die Relevanz der Kombination qualitativer und quantitativer Erhebungsmethoden im Kontext der Erfassung der Nutzerinnen- und Nutzerzufriedenheit in Gebäuden ist hier ebenfalls eine wichtige Conclusio. Die Kombination eines standardisierten Erhebungstools mit offenen Fragen gewährleistet, spezifische Charakteristika einzelner Gebäude zu erfassen, die eventuell in der Konzeptionsphase nicht berücksichtigt wurden, ohne die Vergleichbarkeit der Ergebnisse bzw. die Kombination mit anderen Datenquellen (z. B. objektiver Raumkomfortmessungen) zu gefährden.

Betrachtet man die Varianz der Komfortparameterbewertungen hinsichtlich der Gebäudetypen – Differenzierung nach Altbau und Neubau –, zeigt sich, dass die Altbauten in allen Komfortparametern außer den räumlichen Bedingungen weniger positiv bewertet werden als die Neubauten. Diese Unterschiede zwischen Altbau und Neubau sind dabei vor allem in den Wintermonaten eindrucklich, in denen bis auf Luftqualität, Akustik und die bereits erwähnten räumlichen Bedingungen die Altbauten weniger positiv bewertet werden als die Neubauten.

Der Informationsstand zu energiesparendem Verhalten, ohne dabei Einschränkungen des individuellen Komforts in Kauf nehmen zu müssen, variiert ebenfalls zwischen den Testgebäuden und den Gebäudetypen. Im Vergleich zwischen Alt- und Neubau in Hinblick auf diese Informationen wird der höchste Bedarf im Neubau gesehen. Im Vergleich zwischen Low-, Mid- und Hightech geben die Nutzerinnen und Nutzer der Lowtech-Gebäude an, am besten über den energiesparenden Umgang mit den Steuerungsmöglichkeiten des Gebäudes informiert zu sein.

Im Gegensatz zur anfänglichen Annahme ist die Zufriedenheit der Nutzer bezüglich der zentralen Komfortdimensionen in den Lowtech-Gebäuden geringer als in den Mid- und Hightech-Gebäuden. Darüber hinaus geben die Nutzerinnen und Nutzer der Lowtech-Gebäude an, weniger Interaktionsmöglichkeiten zu haben, um auf die zentralen Komfortparameter Einfluss zu nehmen.

In Hinblick auf die Eingriffs- und Interaktionsmöglichkeiten wird es in zukünftigen Studien zentral sein, zu erfassen, was unter Eingriffsmöglichkeiten auf technischer oder manueller Ebene aus Sicht der Nutzerinnen und Nutzer tatsächlich zu verstehen ist – die Summe der Eingriffsmöglichkeiten kann hoch sein, diese können aber einen (tatsächlich) geringen Effekt auf die Raumparameter haben. Bei Gebäuden mit hoher Technisierungs- und Automatisierungstiefe werden aktuell unterschiedliche Strategien erprobt, die explizit diesen Aspekt der nutzerseitigen Gebäudesteuerung adressieren – wie viele Eingriffsmöglichkeiten nötig sind und wie viel Einfluss auf die Raumparameter den Nutzerinnen und Nutzern zugestanden werden soll, ist eine Frage – speziell im Sommer- und Winterfall.

# Robuste, nutzerfreundliche und kostengünstige TGA in Gebäuden

---

**Lukas Lauss, Thomas Auer, Andreas Meier, Annika Rink,  
Alexander Granmayeh**

## Motivation und Aufgabenstellung

Ressourcenknappheit und der anthropogene Klimawandel zwingen zu einer Reduzierung von Performance Gaps in Bestandsgebäuden. Dieses zunehmend intensiver diskutierte Thema beschreibt die Differenz zwischen den Zielgrößen in der Planung und den Messwerten im Betrieb von Gebäuden. Diese Diskrepanz wirkt sich in der Regel nicht nur negativ auf den Energieverbrauch, sondern auch auf den Nutzerinnen- und Nutzerkomfort und den Ausstoß von Treibhausgasemissionen aus.

Performance Gaps sind insbesondere auf Betriebsfehler in der Gebäudetechnik und das unerwartete Nutzerinnen- und Nutzerverhalten im Gebäudebetrieb zurückzuführen [Mojic 2018 und Auer 2020]. Um Performance Gaps vorzubeugen, braucht es robuste und nutzerfreundliche Gebäudetechnikkonzepte. Darüber hinaus müssen durch energetische Qualitätssicherungsmaßnahmen im Gebäudebetrieb die Analyse von Energieverbräuchen und Anlagenzuständen sowie die Identifikation von Betriebsfehlern erfolgen.

Erfahrungswerte zeigen, dass es generell eine große Diskrepanz zwischen den Planungszielen wie dem Primärenergiebedarf und dem tatsächlichen Primärenergieverbrauch gibt. Dieser liegt bis zu einem Faktor 2 bis 2,5 darüber. Zwischen idealtypischen Simulations- und Berechnungsmodellen für die Planung und der tatsächlichen Nutzung liegen mitunter technische Mängel wie klemmende Ventile, die durch entsprechendes Monitoring behoben werden können, erforderliche Anpassungen an den Klimawandel und an sich ändernde Nutzungsszenarien, aber auch falsche Erwartungshaltungen und abweichende Nutzungsmuster durch die konkreten Gebäudenutzerinnen und -nutzer. Wenn von „Nutzerinnen und Nutzern“ die Rede ist, so sind jene Menschen gemeint, für die die Gebäude in ihrem „täglichen Betrieb“ ausgelegt sind, also nicht die Anlagenbetreibenden oder Facility-Manager (deren Rolle soll aber als Aspekt einer Wechselwirkung dieses komplexen Systems mit betrachtet werden).

Das Verfehlen von Energiezielen ist demnach nicht vorrangig dem Verhalten der Nutzenden zuzuschreiben, sondern deren fehlender Einbeziehung in die Planungs- und Nutzungsphase. Auch im Bereich der Wohnnutzung wird deutlich, dass nicht zuletzt der höhere persönliche Einsatz der Nutzerinnen und Nutzer in Lowtech-Gebäuden meist für die Erhaltung eines hohen Komfortniveaus erforderlich und verantwortlich ist (z. B. durch Nachtlüftung über Fenster, zusätzliche Fensterlüftung im Falle einer hygienischen Teillüftung, händisches Einschalten der Sommertemperierung etc.). Der persönliche Mehraufwand in Lowtech Nichtwohngebäuden kann dennoch zu höherer Nutzerzufriedenheit führen.

Für die hier zusammengefasste Studie wird der Fokus auf jene Faktoren gelenkt, die bei Lowtech-Gebäuden in Bezug auf die Nutzerinnen und Nutzer beeinflussbar sind.

Konkret sind dies:

- Stärkung der Eigenverantwortlichkeit
- Verständlichkeit und Aneignungsfähigkeit der Gebäudekonzepte
- Planungspartizipation (Einbindung der Nutzerinnen und Nutzer in Planung und Betrieb)
- Spektrum des Nutzerinnen- und Nutzerverhaltens

Beim Lowtech-Ansatz können je nach Konzept und Auslegung auch Komforteinschränkungen in Kauf genommen werden, wenn gleichzeitig bestimmte Faktoren berücksichtigt werden, welche die Nutzerinnen- und Nutzerzufriedenheit positiv beeinflussen. Bisherige Untersuchungen zeigen, dass sich z.B. folgende Faktoren positiv darauf auswirken:

- Möglichkeiten des Eingriffs ins System
- Erwartungshaltung der Nutzerinnen und Nutzer
- Kosten für Errichtung und Erhaltung
- „gutes Gewissen“ (Beitrag zum Klimaschutz)

Die Ursachen von Performance Gaps sind vielfältig und können im Wesentlichen in vier Gruppen kategorisiert werden:

→ Erstens können u. a. ein abweichender Energieverbrauch und/oder der Einfluss auf die thermische Behaglichkeit durch ein verändertes Klima resultieren, was mit dem Begriff Ambient Gap zusammengefasst wird. In der Planungsphase werden Klimadaten wie z.B. Außenlufttemperaturen, Solarstrahlungen, Wind etc. oder externe Verschattungen durch Bäume, Nachbargebäude, etc. angenommen, welche in der Regel zumeist von dem tatsächlich vorherrschenden Klima bzw. den realen Gegebenheiten am Standort abweichen.

→ Zweitens liegt eine weitere Begründung für das Auftreten von Performance Gaps in der Berechnungsmethodik von Normen bzw. Richtlinien, in denen pauschalisierte Angaben bzw. vereinfachten Annahmen zur Dimensionierung und Auslegung von Komponenten bzw. Bauteilen herangezogen werden („Norm Gap“).

→ Drittens trägt ein abweichendes bzw. unerwartetes Nutzerinnen- und Nutzerverhalten wie z.B. Anwesenheitszeiten, Nutzungs- und Belegungsprofile, Interaktion der Nutzerinnen und Nutzer mit der Gebäudetechnik sowie Komfortansprüche im Betrieb zu Performance Gaps bei und wird als „User-/Usage Gap“ bezeichnet. Grundsätzlich wird im eigentlichen Sinne von Performance Gaps gesprochen, wenn Unregelmäßigkeiten, Probleme und Betriebsfehler in gebäudetechnischen Anlagen auftreten.

→ Diese vierte Ursache wird mit dem Begriff Technical Gap beschrieben und kann sich negativ auf Energieverbrauch bzw. Treibhausgasemissionen und Nutzerinnen- und Nutzerkomfort auswirken [Mojic 2018 und Auer 2020].

Betriebsfehler führen in der Regel nicht zu einem Totalausfall des Gesamtsystems, sondern zu Abweichungen und Beeinträchtigungen im Betrieb von gebäudetechnischen Anlagen, was sich wiederum auf die Raumkonditionierung und thermische Behaglichkeit auswirken kann. In der Literatur wird ein Betriebsfehler als eine nicht zulässige Abweichung zumindest einer charakteristischen Eigenschaft vom Normalzustand de-

finiert [Dexter 2001]. Diese Definition kann auch breiter gefasst werden, und ein Fehler ist somit immer eine Abweichung von etwas, das erreicht werden sollte.

In diesem Zusammenhang ist zwischen der Fehlerwirkung und Fehlerursache zu unterscheiden. Fehlerwirkungen beschreiben die direkten Auswirkungen von Betriebsfehlern, wie z. B. eine zu niedrige Raumtemperatur. Die Begründung dafür kann darin liegen, dass der Sensor defekt ist oder das Wärmeabgabesystem zu klein dimensioniert wurde. Die Internationale Energie Agentur (IEA) definierte in ANNEX 34 Kategorien und Arten typischer Betriebsfehler zur Abgrenzung von Fehlerursachen und -wirkungen [Dexter 2001]. Darin werden Betriebsfehler in drei Kategorien unterteilt, und die Aufschlüsselung erfolgt durch die Einteilung in Fehlerkategorien. Hierbei wird zwischen Betriebsfehlern durch menschliches Versagen, Systemfehlern und Hardwarefehlern unterschieden. Es ist zu beachten, dass ein Fehler mehrere Ursachen haben kann, was dazu führt, dass nicht immer eine klare Zuordnung zu einer einzelnen Kategorie möglich ist.

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

## Methodik und Forschungsdesign

Im Rahmen dieser Arbeit erfolgt die Analyse von Betriebsfehlern mit einem regelbasierten Modell zur Fehlererkennung in gebäudetechnischen Anlagen. Damit konnten in zwei Nichtwohngebäuden zahlreiche fehlerhafte Betriebszustände identifiziert werden. Darauf aufbauend erfolgt die simulationstechnische Abbildung von Betriebsfehlern (Technical Gaps), Nutzerverhalten (User/Usage Gaps) und Klimawandelszenarien (Ambient Gaps). Diese Einflussfaktoren führen dazu, dass gebäudetechnische Systeme eine Vielzahl unterschiedlicher Betriebszustände einnehmen und sich diese Größen in einem Wertebereich bewegen bzw. nicht als statisch zu betrachten sind. Um diese Dynamik und die statistische Variation verschiedener Eingangsparameter aufgrund unsicherer Randbedingungen untersuchen zu können, werden Monte-Carlo-Simulationen (MCS) durchgeführt. In Kombination mit den Gebäudesimulationen werden Unsicherheits- und Sensitivitätsanalysen durchgeführt, um die Auswirkungen von Performance Gaps zu quantifizieren und die einflussreichsten Stellschrauben bzw. sensitivsten Eingangsgrößen zu identifizieren. Darüber hinaus werden neben Betriebsfehlern der Gebäudetechnik und unerwartetem Nutzerverhalten auch Aspekte zukünftiger klimatischer Veränderungen durch prognostizierte Wetterdatensätze (Zukunfts-Testreferenzjahre TRY des Deutschen Wetterdienstes) in die simulationstechnischen Untersuchungen einbezogen. Abschließend werden die Lebenszykluskosten für die jeweiligen Gebäude berechnet, um auch eine wirtschaftliche bzw. ganzheitliche Betrachtung zu ermöglichen und Erkenntnisse in einem breiten Forschungskontext abzuleiten.

Als Ergebnis können Potenziale und Möglichkeiten für eine robuste Gebäudetechnik auf Basis von Energieeinsparung und thermischer Behaglichkeit sowie deren Wechsel-

wirkungen identifiziert werden. Diese Ergebnisse und Erkenntnisse sollen für zukünftige Planungsprozesse und energetische Qualitätssicherungsmaßnahmen im Gebäudebetrieb genutzt werden. Damit soll ein Beitrag zur Optimierung der Gebäudeperformance durch Vermeidung von Performance Gaps geleistet werden, um in weiterer Folge das übergeordnete Ziel eines klimaneutralen Gebäudebestandes zu erreichen. Mit dem im Rahmen dieser Arbeit umgesetzten Forschungsansatz kann die Grundlage für Strategien und Maßnahmen für eine robuste, nutzerfreundliche und kostengünstige TGA in Gebäuden geschaffen werden.

## Untersuchung generischer Gebäudesimulationsmodelle

### Entwicklung generischer Gebäudesimulationsmodelle

#### Modellierung und Parametrierung

Zur Quantifizierung der Auswirkungen von Betriebsfehlern in gebäudetechnischen Anlagen und dem unerwarteten Nutzerinnen- und Nutzerverhalten auf den Energiebedarf und den thermischen Komfort wird zu Beginn der Forschungsarbeit ein generisches Gebäudemodell konstruiert. Dieses Modell soll ein für Deutschland typisches und repräsentatives Bürogebäude darstellen. Als Grundlage dient das Mustergebäude gemäß VDI 6009-1, um einen diversifizierten Mix aus Einzel-, Zwei- und Mehrpersonbüros am Standort München zu simulieren. Dabei werden die Randbedingungen des Nutzungsprofils für Einzel- und Gruppenbüros gemäß DIN V 18599-10 berücksichtigt.

#### Definition unsicherer Eingangsgrößen und Klassifizierung in Parametergruppen

Das generische Gebäudesimulationsmodell bildet die Grundlage für die Untersuchung des Einflusses von Technical Gaps und User/Usage Gaps sowie weiteren unsicheren Randbedingungen auf den Energiebedarf und thermischen Komfort. Um die umfassenden Betrachtungen aller Eingangsgrößen übersichtlicher zu gestalten, werden im Folgenden drei Parametergruppen, A, B, C, eingeführt.

#### Parametergruppe A: Betriebsfehler (inklusive Bedien- und Nutzerinnen- und Nutzerfehler)

1. error 1.1: Zuluft-Volumenstrom [ $\text{l/s}\cdot\text{m}^2$ ]
2. error 2.1: Differenzdruck Zuluftventilator [Pa]
3. error 2.2: Differenzdruck Abluftventilator [Pa]
4. error 2.4: Betriebsbeginn/Einschaltzeitpunkt RLT-Anlage [Uhrzeit]
5. error 2.5: Betriebsende/Ausschaltzeitpunkt RLT-Anlage [Uhrzeit]
6. error 3.1: Stellbereich Umluftklappe [%]
7. error 4.1: Sperrtemperatur WRG [ $^{\circ}\text{C}$ ]
8. error 4.5: Rückwärmezahl (Wärmeübergang) WRG [1]
9. error 5.1: Wärmeübergang Vorheizregister [1]
10. error 5.2: Massenstrom Regelventil Vorheizregister [ $\text{kg/s}$ ]
11. error 5.3: Differenzdruck Pumpe Vor-/Nachheizregister [Pa]
12. error 5.4: Temperaturspreizung Vorheizregister [K]
13. error 5.6: Wärmeübergang Nachheizregister [1]
14. error 5.7: Massenstrom Regelventil Nachheizregister [ $\text{kg/s}$ ]

15. error 5.8: Temperaturspreizung Nachheizregister [K]
16. error 5.10: Wärmeübergang Kühlregister [1]
17. error 5.11: Massenstrom Regelventil Kühlregister [kg/s]
18. error 5.12: Differenzdruck Pumpe Kühlregister [Pa]
19. error 5.13: Temperaturspreizung Kühlregister [K]
20. error 5.19: Raumlufthtemperatursensor (Offset) [°C]
21. error 6.1: Abluftfeuchtesensor (Offset) [% r. F.]
22. error 8.1: Anzahl Personen [1]
23. error 8.2: Regelung Sonnenschutz [W/m<sup>2</sup>]
24. error 8.3: Fensteröffnungszeit [h/d]

#### **Parametergruppe B: konstruktive bzw. bauphysikalische Faktoren und Sollwerte Raumkonditionierung**

25. Infiltration [1/h]
26. Fensterflächenanteil [1]
27. Ug-Wert (Verglasung) [W/m<sup>2</sup>K]
28. U-Wert Außenwand [W/m<sup>2</sup>K]
29. Minimaler Raumlufthtemperatur-Sollwert (Heizung) [°C]
30. Maximaler Raumlufthtemperatur-Sollwert (Kühlung) [°C]

#### **Parametergruppe C: bauliche bzw. mess-, steuerungs- und regelungstechnische (MSRT) Aspekte gebäudetechnischer Anlagen**

31. Betriebsbeginn/Einschaltzeitpunkt Anlagentechnik [Uhrzeit]
32. Betriebsende/Ausschaltzeitpunkt Anlagentechnik [Uhrzeit]
33. Wirkungsgrad Wärmeerzeuger [1]
34. Leistungszahl (Energy Efficiency Ratio EER) Kälteerzeuger [1]
35. Vorlauftemperatur-Sollwert Heizregister [°C]
36. Vorlauftemperatur-Sollwert Kühlregister [°C]
37. Temperatur-Sollwert Nachtabenkung [°C]

### **Relative Monte-Carlo-Simulationen**

#### **Parametergruppen A/B/C**

##### **Pre-Processing-relative Monte-Carlo-Simulationen**

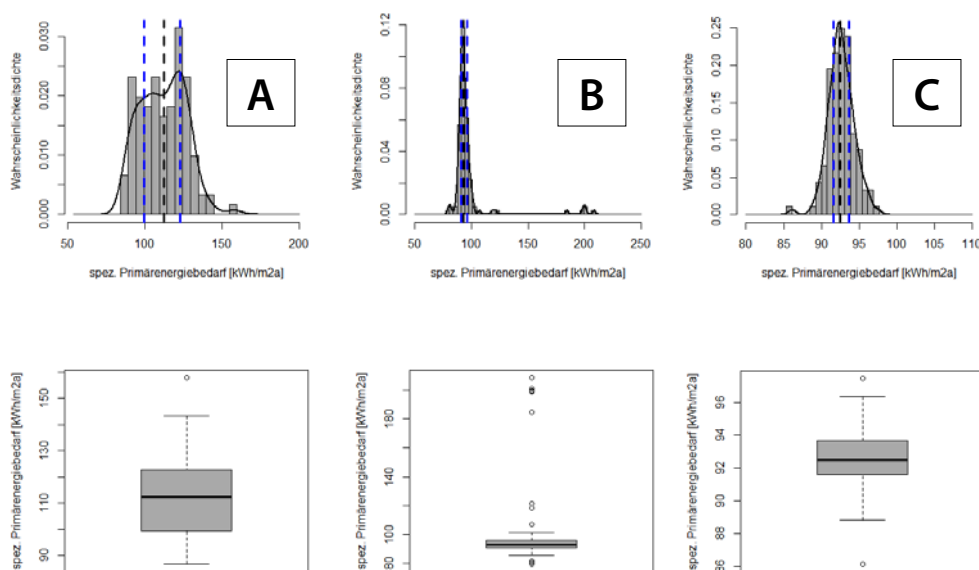
##### **Parametergruppen A/B/C**

Im Bereich der relativen Monte-Carlo-Simulationen wird für jeden Input die Wahrscheinlichkeitsverteilung mit einer Normalverteilung von  $\pm 5\%$  Standardabweichung beschrieben, in Anlehnung an Hopfe [2011] und Ioannou [2015]. Einige Parameter werden mit einer limitierten bzw. beschränkten Normalverteilung belegt, um die Über- bzw. Unterschreitung der Grenzwerte hinsichtlich technischer und physikalischer Eigenschaften zu vermeiden. Das Ziel ist es, die maßgeblichen Eingangsgrößen für jede der drei Zielgrößen zu identifizieren. Dabei werden die Parametergruppen separat betrachtet und die Eingangsgrößen gleich gewichtet. Die Grundlage hierfür bildet eine einheitliche Normalverteilung mit einer Standardabweichung von  $\pm 5\%$  für alle Inputs.

## Post-Processing-relative Monte-Carlo-Simulationen Parametergruppen A/B/C

### Unsicherheitsanalysen Parametergruppen A/B/C

Abbildung 5 zeigt die Simulationsergebnisse für die Zielgröße „Primärenergiebedarf“ (PEB) in Abhängigkeit der Parametergruppen A, B und C. Es werden drei Histogramme und drei Box-Plots dargestellt. Der Median (schwarz gepunktete Linie) für die Zielgröße „Primärenergiebedarf“ in Parametergruppe A beträgt  $112 \text{ kWh/m}^2\text{a}$ . Die blau gepunktete Linie visualisiert die positive bzw. negative Standardabweichung und bezieht sich bei den definierten Simulationsrandbedingungen auf  $15 \text{ kWh/m}^2\text{a}$ . Daraus ergibt sich eine Modellunsicherheit von  $\pm 13 \%$ , die durch die Division von Standardabweichung bzw. Median berechnet und als Maß für die Robustheit herangezogen wird. Im unteren Box-Plot ist zu erkennen, dass der Primärenergiebedarf der Parametergruppe A mit einer Wahrscheinlichkeit von 50 % im Bereich von  $99 \text{ kWh/m}^2\text{a}$  und  $123 \text{ kWh/m}^2\text{a}$  liegt. Es gibt auch einen Ausreißer, der den Maximalwert der Simulationen mit  $158 \text{ kWh/m}^2\text{a}$  darstellt. Im unteren Bereich beträgt der Minimalwert  $87 \text{ kWh/m}^2\text{a}$ . Das bedeutet, dass der Primärenergiebedarf einen Wertebereich von über  $71 \text{ kWh/m}^2\text{a}$  (Maximalwert – Minimalwert) hat und je nach Parameterkonfiguration innerhalb dieser Bandbreite liegt. Die Auswirkungen der Parametergruppen B und C haben nur geringfügige Auswirkungen auf den PEB und spielen somit im Vergleich zu den Betriebs-, Bedien- und Nutzerinnen- und Nutzerfehlern (Parametergruppe A) eine untergeordnete Rolle. Das Histogramm der Parametergruppe B zeigt eine linksschiefe Verteilung. Die Ergebniswerte befinden sich mit hoher Wahrscheinlichkeit im niedrigen Wertebereich. Lediglich vereinzelt sind Ausreißer in Richtung des Maximalwerts zu erkennen, die aus ungünstigen Parameterkombinationen resultieren. Der glockenförmige Verlauf von Parametergruppe C verursacht die geringste Ausprägung und Variation der Zielgröße Primärenergiebedarf.



**Abbildung 5:** Histogramme und Box-Plots für Zielgröße „Primärenergiebedarf“ in Abhängigkeit der Parametergruppe A/B/C

### **Sensitivitätsanalysen Parametergruppen A/B/C**

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse der relativen Sensitivitätsanalysen für die Parametergruppen A, B und C diskutiert. Die Sensitivitätsanalysen wurden im Rahmen dieses Forschungsprojekts sowohl grafisch durch die Auswertung von Streudiagrammen und der anschließenden Berechnung der Varianzen mittels des Algorithmus „Conditional Variances Second Path“ nach Saltelli als auch durch den Standardisierten Rang-Regressionskoeffizienten (SRRC) durchgeführt. Durch die Streudiagramme und Korrelationskoeffizienten konnte eine schnelle und umfassende Untersuchung des Gebäude- und Anlagenmodells mit einer großen Anzahl an Eingangsparametern durchgeführt werden. Dabei wurden die einflussreichsten und sensitivsten Input-Parameter eindeutig identifiziert. Die Ergebnisse der Streudiagramme zeigen, dass bei allen drei Zielgrößen die Fehler error 8.3 „Fensteröffnungszeit“ und error 5.19 „Raumlufttemperatursensor (Offset)“ die relevantesten Eingangsgrößen der Parametergruppe A sind. Bei der Auswertung der Untertemperaturgradstunden (UTGS) belegt der Fehler 8.1 „Anzahl Personen“ den zweiten Rang in Bezug auf die Korrelationskoeffizienten. Die Resultate der Streudiagramme und Korrelationskoeffizienten unterscheiden sich geringfügig und belegen den dritten Rang. Der Vergleich der beiden Sensitivitätsindizes zeigt, dass beide Indikatoren das gleiche Ergebnis liefern und sich insbesondere bei den relevantesten Inputs eine deckungsgleiche Reihenfolge abzeichnet. Die folgenden Eingangsgrößen sind aufgrund ihrer hohen Signifikanz besonders wichtig für die Streuung der Zielgrößen. Basierend auf den Ergebnissen der relativen MCS werden für die Durchführung der spezifischen MCS die folgenden Eingangsgrößen aus den Parametergruppen berücksichtigt:

#### **Parametergruppe A**

- error 1.1 „RLT-Volumenstrom Zonenebene“
- error 2.1 „Differenzdruck Zuluftventilator“
- error 2.5 „Betriebsende RLT-Anlage“
- error 5.8 „Temperaturspreizung Nachheizregister“
- error 5.19 „Raumlufttemperatursensor (Offset)“
- error 8.1 „Anzahl Personen“
- error 8.2 „Regelung Sonnenschutz“
- error 8.3 „Fensteröffnungszeit“

#### **Parametergruppe B**

- Minimaler Raumlufttemperatur-Sollwert
- Maximaler Raumlufttemperatur-Sollwert
- Parametergruppe C
- Betriebsbeginn Anlagentechnik
- Betriebsende Anlagentechnik
- Wirkungsgrad Wärmeerzeuger
- Vorlauftemperatur-Sollwert Kühlregister

### **Spezifische Monte-Carlo-Simulationen Parametergruppe A**

#### **Pre-Processing spezifische Monte-Carlo-Simulationen Parametergruppe A**

Im zweiten Schritt der Simulation und Untersuchung werden spezifische Monte-Carlo-Simulationen mit den auf Basis der relativen MCS selektierten Input-Parametern

durchgeführt. Zunächst wird die Parametergruppe A der Betriebs-, Bedien- und Nutzerfehler analysiert, um die Anzahl der Eingangsgrößen zu reduzieren und den Simulationsumfang sowie die damit verbundenen Rechenzeiten möglichst effizient zu gestalten. In Tabelle 1 sind die Wahrscheinlichkeitsverteilungen und Wertebereiche für den ersten Schritt der spezifischen Monte-Carlo-Simulation (MCS) von Parametergruppe A aufgeführt. Es ist ersichtlich, dass alle Inputs außer error 5.19 „Raumlufttemperatursensor (Offset)“ und error 8.1 „Anzahl Personen“ durch eine Gleichverteilung beschrieben werden. Aufgrund der physikalischen Grenzwerte wäre diese Wahrscheinlichkeitsverteilung für die genannten Eingangsgrößen problematisch; daher wird sie mit einer Normalverteilung abgebildet.

## Post-Processing-spezifische Monte-Carlo-Simulationen Parametergruppe A

### Unsicherheitsanalysen Parametergruppe A

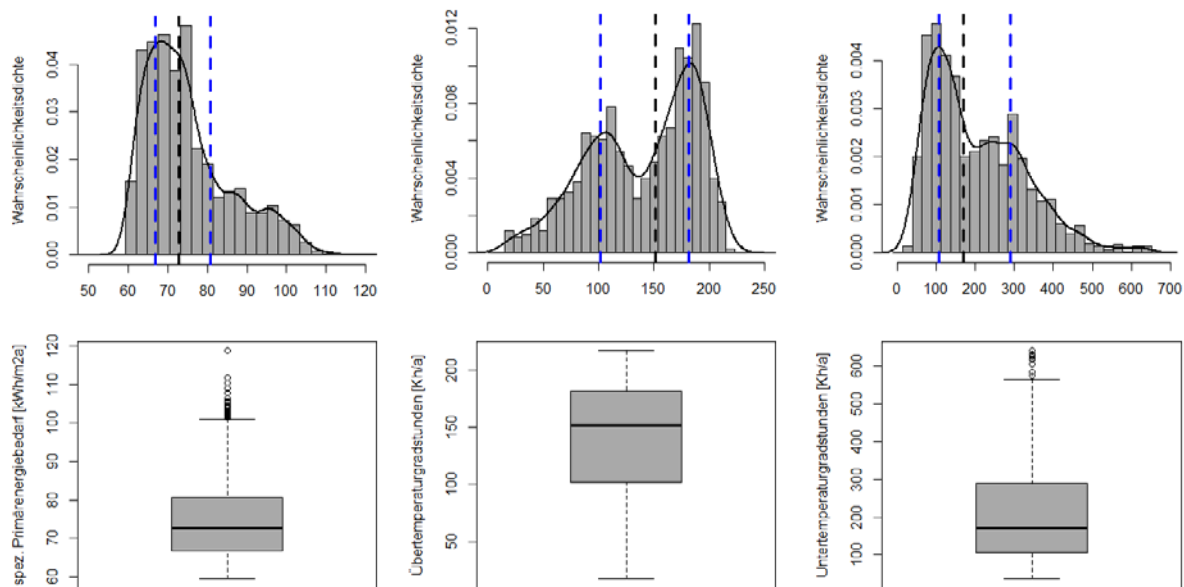
Wie bereits bei der relativen MCS dargestellt, werden auch bei den Unsicherheitsanalysen alle Zielgrößen durch Histogramme und Box-Plots beschrieben. Wie in Abbildung 6 zu sehen ist, zeigt das Histogramm für die Zielgröße Primärenergiebedarf eine linksschiefe Verteilung. Der Median (schwarz gepunktete Linie) beträgt 73 kWh/m<sup>2</sup>a, und die Standardabweichung (blau gepunktete Linien) beträgt 11 kWh/m<sup>2</sup>a, was zu einer Modellunsicherheit von  $\pm 15\%$  um den Erwartungswert führt. Die Übertempe-

| Input-Parameter |                                      |                       | Wahrscheinlichkeitsverteilung |                          |       |       |
|-----------------|--------------------------------------|-----------------------|-------------------------------|--------------------------|-------|-------|
| Code            | Beschreibung                         | Einheit               | Verteilung                    | Verteilung ( $\mu$ ; sd) | Min.  | Max.  |
| error 1.1       | Volumenstrom Zonenebene              | l/(s*m <sup>2</sup> ) | gleichverteilt                | $\sim U(0,00; 1,609)$    | 0     | 1,6   |
| error 2.1       | Differenzdruck Zuluftventilator      | Pa                    | gleichverteilt                | $\sim U(0,0; 700,0)$     | 0     | 700   |
| error 2.5       | Betriebsende RLT                     | hh:mm                 | gleichverteilt                | $\sim U(05:00; 24:00)$   | 05:00 | 24:00 |
| error 5.8       | Temperaturspreizung Nachheizregister | K                     | gleichverteilt                | $\sim U(0,1; 50,0)$      | 0,1   | 50,0  |
| error 5.19      | Raumlufttemperatursensor (Offset)    | °C                    | normalverteilt                | $\sim N(0,00; 0,97)$     | -2,09 | 2,35  |
| error 8.1       | Anzahl Personen                      | 1                     | normalverteilt                | $\sim N(2,0; 0,1)$       | 0     | 4     |
| error 8.2       | Regelung Sonnenschutz                | W/m <sup>2</sup>      | gleichverteilt                | $\sim U(0,0; 1000,0)$    | 0     | 1000  |
| error 8.3       | Fensteröffnungszeit                  | h/d                   | gleichverteilt                | $\sim U(0,0; 0,25)$      | 0     | 0,25  |

**Tabelle 1:** Input-Parameter und Wahrscheinlichkeitsverteilungen für Parametergruppe A

raturgradstunden (ÜTGS) liegen mit einem Maximalwert von 217 Kh/a unterhalb des kritischen Wertes zur sommerlichen Überhitzung bei Nichtwohngebäuden von 500 Kh/a nach DIN 4108-2. Es lässt sich festhalten, dass die untersuchten Eingangsgrößen der Parametergruppe A, nämlich Betriebs-, Bedien- und Nutzerinnen- und Nutzerfehler, generell nur ein geringes Gefahrenpotenzial für den sommerlichen Wärmeschutz darstellen. Im Gegensatz dazu hat Parametergruppe A erhebliche Auswirkungen auf die Zielgröße „Untertemperaturgradstunden“ und kann sich unter ungünstigen Umständen bzw. Parameterkombinationen von einem Median von 170 Kh/a bis auf 639 Kh/a erhöhen. Die große Modellunsicherheit von  $\pm 70\%$  spiegelt den starken Einfluss dieser Fehlergruppe wider. Die absoluten Werte für die Untertemperaturgradstunden von 3022 Kh/a (relative UA) reduzieren sich aufgrund der unterschiedlichen Wahrschein-

lichkeitsverteilungen des Inputs error 8.3 „Fensteröffnungszeit“ in den beiden Untersuchungsszenarien nun auf 639 Kh/a. Daher ist es schwierig und nicht zielführend, einen detaillierten Vergleich zwischen der theoretischen und der praxisbezogenen Vorgehensweise (relative/spezifische MCS) anzustellen. Es sollten daher nur Tendenzen abgeleitet werden und dabei immer die entsprechenden Wahrscheinlichkeitsverteilungen und Wertebereiche berücksichtigt werden.



**Abbildung 6:** Histogramme und Box-Plots der Parametergruppe A für alle drei Zielgrößen

### Sensitivitätsanalysen Parametergruppe A

In Tabelle 2 sind die Totaleffekte der spezifischen SAs von Parametergruppe A aufgeführt. Es hat sich gezeigt, dass es für jede Zielgröße eine dominierende Eingangsgröße gibt. Sowohl beim Primärenergiebedarf (71 % Totaleffekt) als auch bei den Übertemperaturgradstunden (77 % Totaleffekt) sind die Schwankungen im Output größtenteils auf den Bedien- bzw. Nutzerfehler error 8.2 „Regelung Sonnenschutz“ zurückzuführen. Die Unsicherheiten der Untertemperaturgradstunden werden zu 74 % durch error 8.3 „Fensteröffnungszeit“ bestimmt. Wenn man die relative und spezifische MCS vergleicht, lässt sich feststellen, dass sich error 8.2 „Regelung Sonnenschutz“ in der vorangegangenen relativen MCS als nicht sensitiv in Bezug auf Primärenergiebedarf und Übertemperaturgradstunden herausgestellt hat. Dies ist auf die unterschiedlichen Definitionen von Wahrscheinlichkeitsverteilungen und Wertebereichen der relativen und spezifischen MCS zurückzuführen. Dennoch lassen sich die wesentlichen Erkenntnisse daraus ableiten, dass ein funktionstüchtiger und korrekt betriebener Sonnenschutz nur geringe Auswirkungen auf die Zielgrößen hat. Im Gegensatz dazu verursacht ein fehlerhafter Sonnenschutz eine große Abweichung vom Erwartungswert. Dies kann zu einem stark erhöhten energetischen Mehrverbrauch sowie eingeschränkter thermischer Behaglichkeit führen. Bei error 8.3, der die Fensteröffnungszeit betrifft, wurde eine gegenläufige Bewegung beobachtet. Dieser Parameter wurde in der relativen MCS als einflussreich identifiziert, spielt jedoch aufgrund der reduzierten Fensteröffnungsdauer infolge der Wahrscheinlichkeitsverteilung nun eine untergeordnete Rolle. Zusammenfassend lässt sich sagen, dass Bedienungs- und Nutzerfehler auf-

grund der definierten Simulationsrandbedingungen die Hauptursache für Unsicherheiten in den Modelloutputs sind. Im Vergleich dazu spielen Betriebsfehler eine untergeordnete Rolle, mit Ausnahme von error 2.5 „Betriebsende RLT-Anlage“, der für die Zielgrößen PEB und UTGS an zweiter bzw. dritter Stelle steht. In Tabelle 2 sind die Variablen aufgeführt, die den größten Einfluss auf die Zielgrößen haben. Diese Input-Parameter erzeugen die größte Streuung in den dargestellten Verteilungen bzw. Zielgrößen und sind deshalb besonders sensitiv. Wenn man die Totaleffekte der beiden einflussreichsten Variablen jeder Zielgröße addiert, ergeben sich 0,71 (error 8.2 „Regelung Sonnenschutz“) + 0,11 (error 2.5 „Betriebsende RLT-Anlage“) = 0,82 für den PEB; 0,77 (error 8.2 „Regelung Sonnenschutz“) + 0,10 (error 2.5 „Betriebsende RLT-Anlage“) = 0,87 für die ÜTGS und 0,74 (error 8.3 „Fensteröffnungszeit“) + 0,08 (error 8.1 „Anzahl Personen“) = 0,82 für die UTGS. Dies bedeutet, dass 82/87/82 % der Modellunsicherheit der Zielgrößen allein durch diese Eingangsgrößen verursacht werden.

| Rang                                     | Input-Parameter                     | Totaleffekte |
|------------------------------------------|-------------------------------------|--------------|
| <b>Primärenergiebedarf [kWh/m²a]</b>     |                                     |              |
| #1                                       | error 8.2 „Regelung Sonnenschutz“   | 0,71         |
| #2                                       | error 2.5 „Betriebsende RLT-Anlage“ | 0,11         |
| #3                                       | error 1.1 „Volumenstrom Zonenebene“ | 0,08         |
| #4                                       | error 8.3 „Fensteröffnungszeit“     | 0,06         |
| <b>Übertemperaturgradstunden [Kh/a]</b>  |                                     |              |
| #1                                       | error 8.2 „Regelung Sonnenschutz“   | 0,77         |
| #2                                       | error 2.5 „Betriebsende RLT-Anlage“ | 0,10         |
| #3                                       | error 8.1 „Anzahl Personen“         | 0,08         |
| #4                                       | error 1.1 „Volumenstrom Zonenebene“ | 0,03         |
| <b>Untertemperaturgradstunden [Kh/a]</b> |                                     |              |
| #1                                       | error 8.3 „Fensteröffnungszeit“     | 0,74         |
| #2                                       | error 8.1 „Anzahl Personen“         | 0,08         |
| #3                                       | error 2.5 „Betriebsende RLT-Anlage“ | 0,06         |
| #4                                       | error 1.1 „Volumenstrom Zonenebene“ | 0,04         |

**Tabelle 2:** Zusammenfassung der einflussreichsten Inputs der spezifischen MCS von Parametergruppe A

Auf Basis der Ergebnisse und Auswertungen der spezifischen MCS für Parametergruppe A werden nun folgende Betriebs-, Bedien- und Nutzerfehler weiter untersucht und mit Parametergruppe B bzw. C verglichen. Die Auswahl der Parameter erfolgt anhand der erst- und zweitplatzierten Eingangsgrößen bei den Totaleffekten.

#### Parametergruppe A

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

## Spezifische Monte-Carlo-Simulationen Parametergruppen A und B und C

### Pre-Processing-spezifische Monte-Carlo-Simulationen Parametergruppen A und B und C

Wie im vorangegangenen Kapitel beschrieben, werden nun die einflussreichsten Betriebs-, Bedien- und Nutzerinnen- und Nutzerfehlerweiter untersucht, basierend auf den Ergebnissen der spezifischen MCS von Parametergruppe A, und in Kombination mit den Parametergruppen B und C analysiert. Die Wahrscheinlichkeitsverteilungen und Wertebereiche für den Vergleich der Parametergruppen sind in Tabelle 3 beschrieben.

| Input-Parameter                         |                      | Wahrscheinlichkeitsverteilung |                          |       |       |
|-----------------------------------------|----------------------|-------------------------------|--------------------------|-------|-------|
| Beschreibung                            | Einheit              | Verteilung                    | Verteilung ( $\mu$ ; sd) | Min.  | Max.  |
| error 2.5 „Betriebsende RLT“            | h                    | gleichverteilt                | $\sim U(05:00; 24:00)$   | 05:00 | 24:00 |
| error 8.1 „Anzahl Personen“             | 1                    | normalverteilt                | $\sim N(2,0; 1,0)$       | 0     | 4     |
| error 8.2 „Regelung Sonnenschutz“       | W/m <sup>2</sup>     | gleichverteilt                | $\sim U(0,0; 1000,0)$    | 0     | 1000  |
| error 8.3 „Fensteröffnungszeit“         | h/d                  | gleichverteilt                | $\sim U(0,0; 0,25)$      | 0     | 0,25  |
| Minimaler Raumlufthtemperatur-Sollwert  | °C                   | normalverteilt                | $\sim N(21,0; 0,97)$     | 18,9  | 23,4  |
| Maximaler Raumlufthtemperatur-Sollwert  | °C                   | normalverteilt                | $\sim N(24,0; 0,97)$     | 21,9  | 26,4  |
| Betriebsbeginn Anlagentechnik           | 1/h                  | gleichverteilt                | $\sim N(05:00; 0,65)$    | 03:00 | 05:00 |
| Betriebsende Anlagentechnik             | 1                    | gleichverteilt                | $\sim N(18:00; 0,65)$    | 18:00 | 21:00 |
| Wirkungsgrad Wärmeerzeuger              | W/(m <sup>2</sup> K) | gleichverteilt                | $\sim N(0,890; 0,045)$   | 0,88  | 0,99  |
| Vorlauftemperatur-Sollwert Kühlregister | °C                   | gleichverteilt                | $\sim N(6,0; 0,3)$       | 6,0   | 14,0  |

**Tabelle 3:** Zusammenstellung der Input-Parameter und Wahrscheinlichkeitsverteilungen für Parametergruppe A/B/C

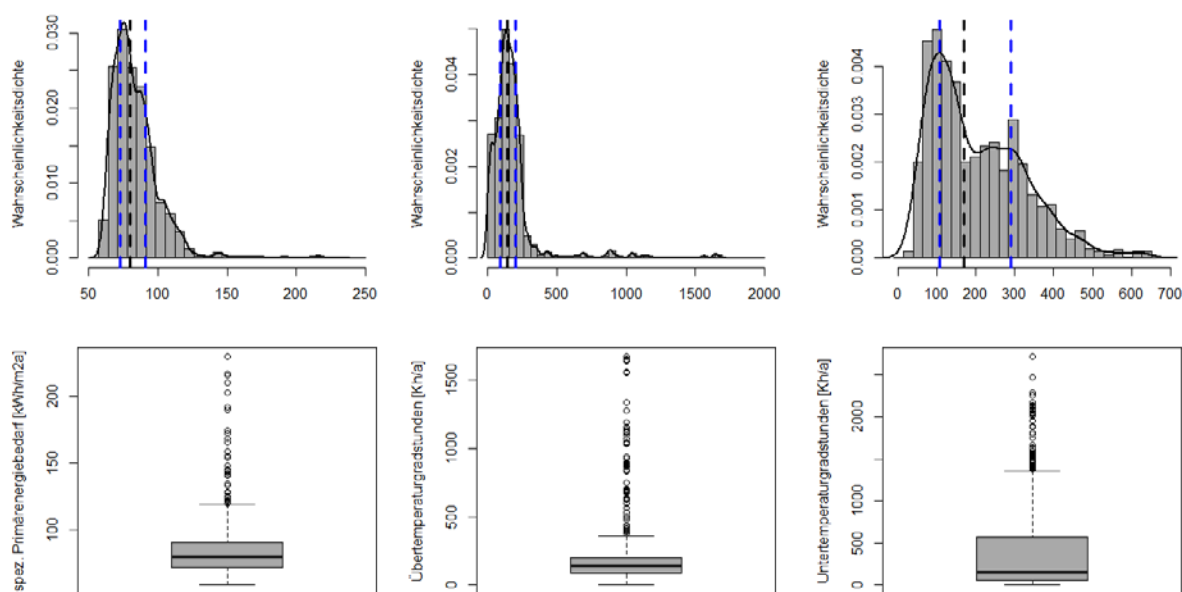
### Post-Processing-spezifische Monte-Carlo-Simulationen Parametergruppen A und B und C

#### Unsicherheitsanalysen Parametergruppen A und B und C

Abbildung 7 zeigt die statistische Auswertung der Monte-Carlo-Simulationen für alle drei Zielgrößen anhand von Histogrammen und Box-Plots. Die Kurvencharakteristik der Histogramme stellt eine logarithmische Normalverteilung dar, die sich durch den flachen Auslauf der Dichtefunktion auf einer Seite der Verteilung auszeichnet. Diese Eigenschaft wird durch die Vielzahl an Ausreißern bei den Box-Plots bestätigt. Es lässt sich ableiten, dass es einen Grenzbereich gibt, in dem durch kritische Parameterkombinationen extrem hohe Werte in den Zielgrößen auftreten können. Allerdings treten diese Extremfälle nur mit geringer Wahrscheinlichkeit auf.

Bei allen drei Zielgrößen weichen die Standardabweichungen nur geringfügig von den Medianen ab. Ein Beispiel hierfür sind die Werte des Primärenergiebedarfs mit den statistischen Kenngrößen Median (80 kWh/m<sup>2</sup>a), Standardabweichung (18 kWh/m<sup>2</sup>a) und Modellunsicherheit ( $\pm 23\%$ ). Die Werte für die ÜTGS liegen größtenteils auf einem

unkritischen Niveau zwischen 88 Kh/a (1. Quartil) und 200 Kh/a (3. Quartil) und können aufgrund ungünstiger Parameterkombinationen auf bis zu 1669 Kh/a ansteigen. Die Ausprägung der UTGS zeigt ein ähnliches Bild, jedoch ist der Abstand zwischen den Quartilen deutlich größer (Interquartilsabstand: ÜTGS 112 Kh/a, UTGS 518 Kh/a), was auch zu einer erhöhten Modellunsicherheit führt. Im Vergleich zur vorangegangenen spezifischen MCS mit Parametergruppe A ( $PEB \pm 15\%$ ,  $ÜTGS \pm 32\%$ ,  $UTGS \pm 70\%$ ) wird nun eine erhöhte Modellunsicherheit bei allen Zielgrößen festgestellt. Insbesondere ist eine große Zunahme bei den Über- und Untertemperaturgradstunden zu verzeichnen. Es lässt sich schlussfolgern, dass der Anstieg hauptsächlich von den Eingangsgrößen der Parametergruppe B bzw. C beeinflusst wird und nur in geringerem Maße von Betriebs-, Bedien- und Nutzerfehlern.



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

### Sensitivitätsanalysen Parametergruppen A und B und C

In Tabelle 4 sind die Totaleffekte der spezifischen MCS von Parametergruppe A/B/C dargestellt. Der größte Einfluss auf die Zielgröße „Primärenergiebedarf“ geht von den Input-Parametern „Minimaler Raumlufthtemperatur-Sollwert“ (37% Totaleffekt) und „Maximaler Raumlufthtemperatur-Sollwert“ (33%) sowie von „Regelung Sonnenschutz“ (17%, error 8.2) aus. Die erheblichen Anteile der Sollwerte für das Heizen und Kühlen lassen sich durch die Wahl der Wahrscheinlichkeitsverteilungen erklären. Beide Eingangsgrößen wurden mit einer Standardabweichung von 0,97 belegt, um den gesamten relevanten Wertebereich für Heiz- und Kühlzwecke abzudecken. Dadurch können Parameterkombinationen entstehen, bei denen der Sollwert für die Kühlung den Sollwert für die Heizung unterschreitet und es somit zu gleichzeitigem Heizen und Kühlen auf Raumebene kommt. Außerdem ist der Fehler 2.5 „Betriebsende RLT-Anlage“ aufgrund eines Totaleffekts von 11% keinesfalls zu vernachlässigen und stellt somit den einflussreichsten Betriebsfehler dar.

Die Unsicherheit bei den Übertemperaturgradstunden wird hauptsächlich durch den Parameter „max. Sollwert Raumtemperatur“ verursacht, was zu einem Totaleffekt von 89 % führt. Der Grund für diesen hohen Wert und die starke Dominanz liegt darin, dass es aufgrund des Erwartungswerts von 24 °C und einer Standardabweichung von 0,97 vereinzelt Stichproben mit Werten größer als 26 °C für den „max. Sollwert Raumtemperatur“ gibt (Maximalwert 26,4 °C; siehe Tabelle 3). Die Kühlung der Räume erfolgt erst ab dem Sollwert. Für die Berechnung der Übertemperaturgradstunden wird ein Grenzwert von 26 °C nach DIN 4108-2 verwendet. Die Signifikanz für die Totaleffekte ist eindeutig, und gemeinsam mit error 8.2 „Regelung Sonnenschutz“ (Totaleffekt 7 %) kann nahezu die gesamte Unsicherheit beschrieben werden. Die Unsicherheit in den Untertemperaturgradstunden wird zum Großteil durch den Parameter „min“ verursacht. Der Sollwert für die Raumtemperatur wurde mit einem Totaleffekt von 86 % bestimmt. Wie bereits zuvor beschrieben, ist die hohe Relevanz dieser Eingangsgröße darauf zurückzuführen, dass einzelne Stichproben den definierten Grenzwert für die Auswertung der Untertemperaturgradstunden nach DIN EN 16798-1 von 20 °C unterschreiten (Minimalwert 18,9 °C; siehe Tabelle 3). Die Input-Parameter mit dem größten Einfluss auf die Zielfunktionen sind der nachstehenden Tabelle 4 zu entnehmen. Um den gesamten Einfluss der sensitivsten Eingangsgrößen zu quantifizieren, wurden die Totaleffekte von Rang 1 bis 3 für jede Zielgröße addiert. Für den Primärenergiebedarf ergibt sich ein Wert von 87 %, für die Übertemperaturgradstunden ein Wert von 98 % und für die Untertemperaturgradstunden ein Wert von 95 %. Somit kann nahezu die gesamte Unsicherheit in den Modelloutputs der einzelnen Zielgrößen durch die drei einflussreichsten Parameter beschrieben werden.

| Rang                                     | Input-Parameter                        | Totaleffekte |
|------------------------------------------|----------------------------------------|--------------|
| <b>Primärenergiebedarf [kWh/m²a]</b>     |                                        |              |
| #1                                       | Minimaler Raumlufthtemperatur-Sollwert | 0,37         |
| #2                                       | Maximaler Raumlufthtemperatur-Sollwert | 0,33         |
| #3                                       | error 8.2 „Sonnenschutz“               | 0,17         |
| <b>Übertemperaturgradstunden [Kh/a]</b>  |                                        |              |
| #1                                       | Maximaler Raumlufthtemperatur-Sollwert | 0,89         |
| #2                                       | error 8.2 „Sonnenschutz“               | 0,07         |
| #3                                       | error 8.1 „Anzahl Personen“            | 0,02         |
| <b>Untertemperaturgradstunden [Kh/a]</b> |                                        |              |
| #1                                       | Minimaler Raumlufthtemperatur-Sollwert | 0,86         |
| #2                                       | error 8.2 „Sonnenschutz“               | 0,05         |
| #3                                       | error 8.3 „Fensteröffnungszeit“        | 0,04         |

**Tabelle 4:** Einflussreichste Inputs der spezifischen MCS von Parametergruppe A und B und C

Diese Ergebnisse und Erkenntnisse bilden die Grundlage für weitere simulationstechnische Untersuchungen im Kontext realer Untersuchungsgebäude. In der Folge werden Betriebs-, Bedien- und Nutzerfehler untersucht, die aufgrund ihrer Totaleffekte die ersten drei Plätze für die jeweilige Zielgröße belegen.

→ Min. Raumlufthtemperatur-Sollwert

→ Max. Raumlufthtemperatur-Sollwert

- Regelung Sonnenschutz
- Anzahl Personen
- Fensteröffnungszeit

## Reale Untersuchungsgebäude

### Definition und Aufbau Gebäudesimulationsmodelle

Im nächsten Arbeitsschritt erfolgt die Analyse und Untersuchung realer Gebäude. Es wird ein Gebäude mit Hightech-Ansatz und ein weiteres mit Lowtech-Aspekten ausgewählt. Die TGA-Bewertungsmatrix im Partnerprojekt „Nutzerkomfort durch Lowtech Konzepte in Gebäuden“ gibt hierbei Aufschluss. Dabei werden die Performance Gaps und deren Wechselwirkungen zwischen Energiebedarf und thermischem Komfort untersucht. Die beiden Untersuchungsobjekte, das Gebäude vom BMI in der Krausenstraße (KRA) als Lowtech-Ansatz und das Gebäude vom BBSR am Reichpietschufer (RPU) als Hightech Ansatz, werden simulationstechnisch verglichen.

In diesem Forschungsprojekt werden Betriebsfehler in der Gebäudetechnik (Technical Gap) und das Nutzerverhalten (User/Usage Gap) untersucht. Außerdem werden die Auswirkungen des Klimawandels auf den Gebäudebetrieb berücksichtigt. Hierfür werden zukünftige Wetterdatensätze auf Basis der Testreferenzjahre des Deutschen Wetterdienstes verwendet und in die Simulationen implementiert. Die Auswirkungen und Folgen des anthropogenen Klimawandels sollen anhand der zukünftigen Wetterdatensätze von DWD-TRY 2045 dargestellt werden. Dabei wird der Betrachtungszeitraum zwischen den Jahren 2030 und 2060 liegen und mit dem Referenzjahr 2045 beschrieben. Im Gegensatz dazu repräsentiert DWD-TRY 2015 das gegenwärtige Klima.

### Spezifische Monte-Carlo-Simulationen Reale Untersuchungsgebäude

#### Pre-Processing-spezifische Monte-Carlo-Simulationen

Eine wesentliche Schnittstelle zwischen den beiden Forschungsprojekten „Robuste, nutzerfreundliche und kostengünstige TGA in Gebäuden“ und „Nutzerkomfort durch Lowtech-Konzepte in Gebäuden“ sind Umfragen zum Nutzerverhalten. Auf Basis der ausgewerteten Fragebögen und statistischen Kenngrößen können Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen abgeleitet werden, die als Input für Monte-Carlo-Simulationen dienen. Für die Fragebögen wurden die fünf Parameter integriert, die sich in den Untersuchungen mit dem generischen Gebäudemodell als besonders sensitiv herausgestellt haben. Im Folgenden werden diese Parameter beschrieben:

**Input-Parameter „Minimaler Raumlufthtemperatur-Sollwert“ (Index 111):** Für die Definition der Wahrscheinlichkeitsverteilung des Input-Parameters „Min. Raumlufthtemperatur-Sollwert“ wurden Messdaten aus verschiedenen Räumen in den beiden Bürogebäuden während der Heizperiode untersucht. Es wurde festgestellt, dass die Raumlufthtemperaturen während der Heizsaison in einem Bereich von circa 21 bis 24 °C liegen. Das Komfortband nach DIN EN 16798-1 liefert den normativen Bezug für diese Messergebnisse. Es gibt einen Wertebereich für die operative Raumtemperatur an, der

von der Außenlufttemperatur abhängt. Bis zu einer Außenlufttemperatur von 16 °C, die als Heizgrenztemperatur für beide Gebäude angesehen werden kann und folglich die Heizperiode abbildet, erstreckt sich der Wertebereich für die operative Raumtemperatur von 20 bis 24 °C. Aus diesem Grund wird für den Input-Parameter „Min. Raumlufttemperatur-Sollwert“ eine Gleichverteilung zwischen diesen beiden Werten angenommen. Für die deterministischen Punkt- bzw. Einzelsimulationen wird der „Min. Raumlufttemperatur-Sollwert“ mit 21 °C nach DIN V 18599-10 definiert.

**Input-Parameter „Maximaler Raumlufttemperatur-Sollwert“ (Index 114):** Der Eingangsparameter „Sollwert maximale Raumlufttemperatur“ stellt analog zum „Sollwert minimale Raumlufttemperatur“ den Sollwert für die Kühlung in den Sommermonaten dar. Da nur am „Reichpietschufer“ eine Kühlung über dezentrale Umluftkühlgeräte möglich ist, wird diese Eingangsgröße nur in den Simulationen für dieses Untersuchungsgebäude implementiert. Wie bereits beschrieben, wurde auch hier eine Auswertung und Analyse der Raumlufttemperaturen im Sommer anhand von Messungen durchgeführt. Dabei konnte festgestellt werden, dass die Messergebnisse sehr gut mit den operativen Raumtemperaturen der EN 16798-1 übereinstimmen. In der Norm wird der operative Temperaturbereich ab einer Außenlufttemperatur von 32 °C mit 24 – 28 °C angegeben. Dementsprechend wird dieser Wertebereich für die Wahrscheinlichkeitsverteilungen gewählt und durch eine Gleichverteilung abgebildet. Der „maximale Raumlufttemperatur-Sollwert“ wird für die deterministischen Punkt- bzw. Einzelsimulationen nach DIN V 18599-10 mit 24 °C festgelegt.

**Input-Parameter „Regelung Sonnenschutz“ (Index 611):** Für die simulationstechnische Abbildung von Sonnenschutzsystemen sind hier drei Faktoren zu nennen, die in der Gebäudemodellierung implementiert bzw. berücksichtigt werden. Erstens die Lage der Verschattungselemente: Ob diese innen oder außen angeordnet sind, dient im Wesentlichen der Kontrolle der Gebäudedaten und der Dokumentation. Zweitens die Bedienbarkeit des Sonnenschutzes: Hier wurde abgefragt, ob dieser manuell bedienbar ist oder automatisch über die Gebäudeleittechnik (GLT) gesteuert wird. Bei beiden untersuchten Gebäuden ist der Sonnenschutz für die Nutzerinnen und Nutzer manuell bedienbar, und der einzige Unterschied besteht lediglich darin, dass dies beim „Reichpietschufer“ elektrisch bzw. motorbetrieben und in der „Krausenstraße“ mechanisch bzw. händisch geschieht. Um dieses Ergebnis der Nutzerbefragungen in die Gebäudemodelle zu übertragen, wird die Eingangsgröße „Regelung Sonnenschutz“ über den Simulationsparameter „Grenzbestrahlungsstärke“ definiert. Die Grenzbestrahlungsstärke gibt an, ab welcher solaren Einstrahlung auf das Außenfenster der Sonnenschutz geschlossen bzw. geöffnet wird. Die normativen Grundlagen sind in der DIN 4108-2 verankert, die für Nord-, Nordost- und Nordwestfenster einen Wert von 150 W/m<sup>2</sup> und für alle anderen Orientierungen einen Wert von 200 W/m<sup>2</sup> vorgibt (Referenzwerte für Punkt- bzw. Einzelsimulationen). Bei diesem Eingangsparameter wird das Ziel verfolgt, die gesamte Bandbreite möglicher Nutzungsszenarien bzw. möglichen Nutzerverhaltens abzubilden. Dementsprechend werden an dieser Stelle die zwei Extremvarianten, also Nutzerinnen und Nutzer, die den Sonnenschutz dauerhaft geschlossen bzw. dauerhaft geöffnet haben, betrachtet. Dementsprechend wird der Wertebereich für diese Eingangsgröße, abhängig von den Einstrahlungsdaten für den jeweiligen Standort, zwischen 0 (Sonnenschutz dauerhaft geschlossen) und 1009 W/m<sup>2</sup> (Sonnenschutz dauerhaft geöffnet) gewählt. Abgerundet wurde die Information über das Nutzerverhalten für diesen Eingangsparameter mit der Frage nach

dem Temperaturverlauf sowohl im Winter als auch im Sommer: Inwieweit wird der Sonnenschutz hier akzeptiert bzw. genutzt, um die Relevanz dieser Maßnahme zu belegen?

**Input-Parameter „Anzahl Personen“ (Index 811):** Diese Eingangsgröße wurde aufgrund des angestrebten hohen Detaillierungsgrades der Modellierung ebenfalls in die Fragebögen integriert, um hier einen Mehrwert für die Simulationen zu generieren. Es wird also abgefragt, wie viele Einzel- bzw. Mehrpersonenbüros in den jeweiligen Gebäuden vorhanden sind und wie sich damit die Konstellation der Mehrpersonenbüros zusammensetzt (Zweier-, Dreier-, Vierer-, Fünferbüros). Dies ermöglicht eine realitätsnahe Modellierung der internen Wärmegewinne durch Personen einerseits und durch elektrische Geräte bzw. Arbeitsmittel andererseits. Im Vergleich dazu werden in der entsprechenden Norm DIN V 18599-10 für diese beiden Energieströme durch Wärmegewinne drei Kategorien „niedrig/mittel/hoch“ mit Pauschalwerten angegeben. Die abschließende Auswertung und Bewertung der Untersuchungsergebnisse hat jedoch gezeigt, dass die gesamte Bandbreite der DIN V 18599-10 in diesem Zusammenhang gute Übereinstimmungen liefert. Dementsprechend wird für diese Eingangsgröße eine Normalverteilung mit einem Erwartungswert von 100 W („mittel“) pro Arbeitsplatz (AP) gewählt, woraus sich ein Minimal- und Maximalwert von 50 W/AP („gering“) bzw. 150 W/AP („hoch“) ergibt. Für die Punkt- bzw. Einzelsimulationen wurde die elektrische Anschlussleistung für die Arbeitsmittel gemäß DIN V 18599-10 auf 100 W/AP („mittel“) festgelegt, und hinsichtlich der Raumaufteilung bzw. -belegung wurden für die Referenzvarianten in Abstimmung mit dem Auftraggeber folgende Ausgangsszenarien (vgl. Erwartungswerte) definiert: Das Gebäude „Krausenstraße“ wird in den deterministischen Simulationen durch Einzelbüros und das Gebäude „Reichpietschufer“ durch Zweipersonenbüros abgebildet. Für die probabilistischen Monte-Carlo-Simulationen wird für die KRA ein Wertebereich für die Personenanzahl von 1 bis 3 und für das RPU von 1 bis 5 zugrunde gelegt.

**Input-Parameter „Fensteröffnungszeit“ (Index 823):** Die Dauer der Fensteröffnung ist in der Realität äußerst schwierig allgemeingültig zu beschreiben bzw. nicht generell quantifizierbar und stellt daher eine äußerst kritische und sensible Eingangsgröße für die Gebäudesimulation dar. Im Planungsprozess für zukünftige Gebäude bzw. in der dynamisch-thermischen Simulation können hier nur Annahmen über das spätere Nutzerverhalten getroffen werden. Aus diesem Grund wurde im Rahmen dieses Projektes besonderes Augenmerk auf die Abfrage dieser Eingangsgröße gelegt. Dementsprechend wurde im Fragebogen sowohl für den Sommer- als auch für den Winterfall das detaillierte Lüftungsverhalten abgefragt. Dies erfolgte einerseits über die Dauer bzw. Zeitspanne der Fensteröffnung pro Tag in der jeweiligen Jahreszeit und andererseits über die Relevanz der Fensteröffnung für die Veränderung der Temperatur im Raum. Die abschließenden Auswertungen im Partnerforschungsprojekt haben bestätigt, dass allgemeingültige Aussagen hier nur schwer zu treffen sind und das Lüftungsverhalten sehr unterschiedlich praktiziert wird. Beispielsweise erstreckt sich in der „Krausenstraße“ die Fensteröffnungsdauer pro Tag im Winter von weniger als 1 h (circa 10 % der Nutzerinnen und Nutzer) bis hin zu mehr als 5 h (circa 20 % der Nutzerinnen und Nutzer). Der Großteil aller Befragten (circa 50 %) gab an, im Winter insgesamt zwischen 1 und 3 h pro Tag zu lüften [„Nutzerkomfort durch Lowtech-Konzepte in Gebäuden“]. Diese langen Fensteröffnungszeiten im Gebäude „Krausenstraße“ während der Heizperiode konnten nach Rücksprache mit dem Fördergeber bzw. den

Nutzerinnen und Nutzern einerseits auf Schadstoffe, die aus Baustoffen bzw. Bodenbelägen austreten, und andererseits auf das regelmäßige Lüften als Coronaschutzmaßnahme zurückgeführt werden. Hinsichtlich des manuellen Lüftungsverhaltens wird in den Monte-Carlo-Simulationen das gesamte Spektrum von dauerhaft geschlossenen bis zu dauerhaft geöffneten Fenstern abgebildet. Aufgrund fehlender Informationen über die Art der Fensteröffnung (z. B. gekippt, ganz geöffnet, angelehnt etc.) werden in den Simulationen aufgrund der in den Nutzerbefragungen angegebenen sehr langen Öffnungsintervalle gekippte Fenster modelliert. Im Gegensatz dazu wird in den Referenzsimulationen in Form von deterministischen Punkt- bzw. Einzelsimulationen für das Lüftungsverhalten ein ideales Nutzerverhalten als Funktion des Komfortbandes nach DIN EN 16798-1 zugrunde gelegt.

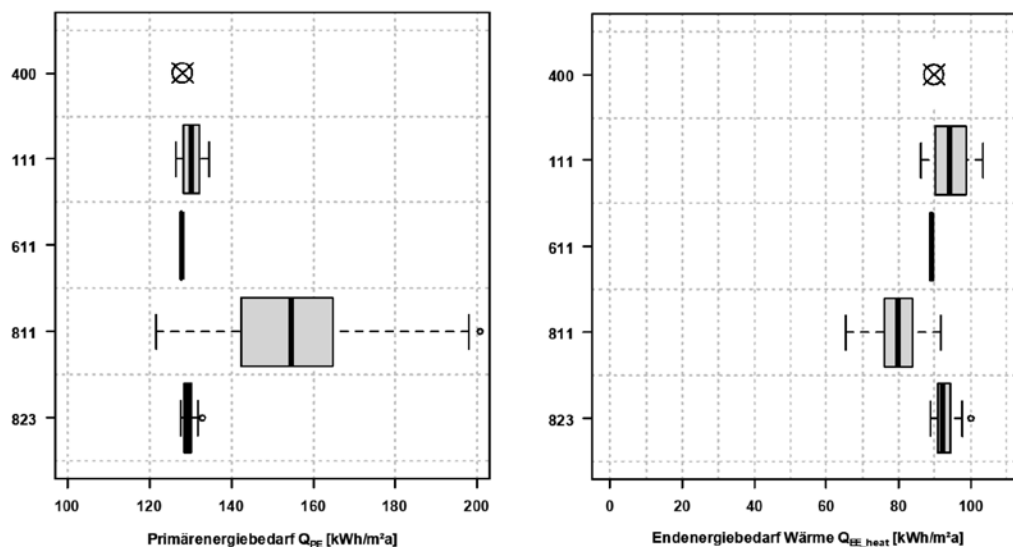
### **Post-Processing-spezifische Monte-Carlo-Simulationen Untersuchungsgebäude 1 „Lowtech-Ansatz“**

#### **Krausenstraße (DWD TRY 2015)**

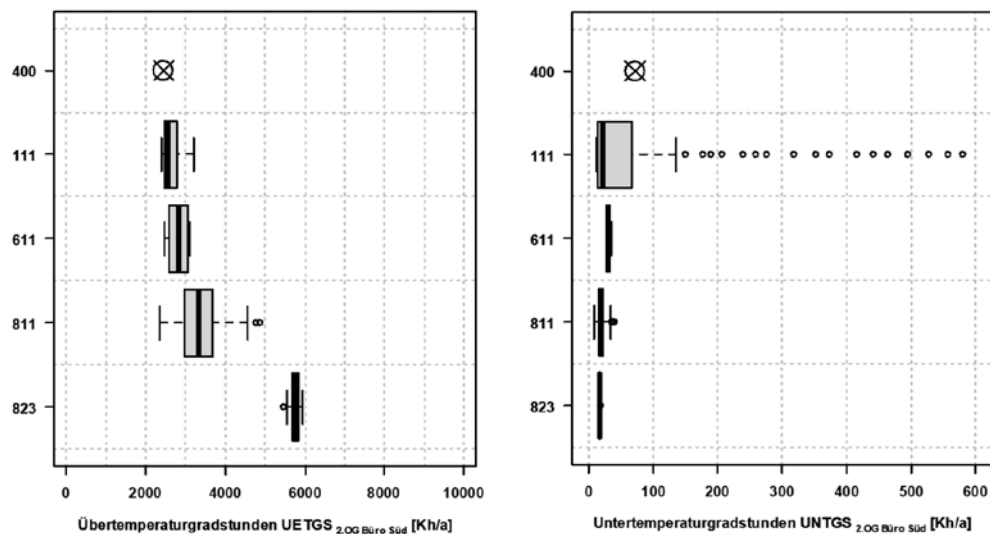
Die Auswertungen für die „Krausenstraße“ erfolgen anhand der Energieströme für die Bereiche Raumwärmebereitstellung, Trinkwassererwärmung, Betriebsstrom für gebäudetechnische Anlagen und Beleuchtung sowie Nutzerstrom für Arbeitsgeräte. Der erste bzw. obere Ergebniseintrag in Abbildung 8 und Abbildung 9 zeigt die Punkt- bzw. Einzelsimulation für die jeweiligen Zielgrößen. Darunter sind die resultierenden Werteverteilungen der Monte-Carlo-Simulationen mittels Box-Plots dargestellt.

Wie in Abbildung 8 ersichtlich, ergibt die Punktsimulation einen Primärenergiebedarf von 110 kWh/m<sup>2</sup>a und einen Endenergiebedarf für Wärme (EEB\_W) von 90 kWh/m<sup>2</sup>a sowie für die thermische Behaglichkeit 2500 h/a Übertemperatur- und 90 h/a Untertemperaturgradstunden. Die Variation des Heizsollwertes (Index 111) mittels der Eingangsgröße „Min. Raumlufthtemperatur-Sollwert“ (20–24 °C) bewirkt beim PEB kaum Veränderungen. Im Gegensatz dazu sind beim EEB\_W die Auswirkungen der erhöhten/reduzierten Solltemperaturen sehr gut erkennbar. So kann nachgewiesen werden, dass pro Kelvin Temperaturabsenkung/-anhebung ein Energiemehrbedarf bzw. eine Energieeinsparung von circa 5 % entsteht. Im Bereich der Übertemperaturgradstunden (UETGS), siehe Abbildung 9, steigen die Werte durch den erhöhten Heizsollwert auf bis zu 3200 Kh/a weiter an und verstärken die grundsätzliche Überhitzungsproblematik in den Zonen (Referenzwert Punktsimulation 2500 Kh/a). Diese Problematik der thermischen Behaglichkeit in Verbindung mit der Überhitzungsproblematik wurde auch in den Ergebnissen der Nutzerbefragungen [„Nutzerkomfort durch Lowtech-Konzepte in Gebäuden“] festgestellt und konnte somit simulationstechnisch nachgewiesen bzw. bestätigt werden. Für die Zielgröße Untertemperaturgradstunden (UNTGS) ergeben sich hier als einzige Eingangsgröße kritische Parameterkonstellationen; wenn der Heizsollwert im Bereich von 20° C liegt, führt dies zu einem starken Anstieg der UNTGS. Dies liegt daran, dass sich der Heizsollwert auf die Raumlufthtemperatur bezieht und die Bewertungen der thermischen Behaglichkeit nach DIN EN 16798-1 auf die operative Raumtemperatur. Der Einfluss der Eingangsgröße „Regelung Sonnenschutz“ (Index 611) hat de facto keinen Einfluss auf die beiden Energiebedarfe (PEB, EEB\_W) und führt somit zu keinem Energy Performance Gap. Im Bereich der UETGS sind sehr wohl Veränderungen feststellbar, und sowohl ein nicht funktionierender, dauerhaft geöffneter Sonnenschutz als auch das Nutzerverhalten in Form von hohen Grenzbestrahlungsstärken verstärken

in diesem Zusammenhang die Überhitzungsproblematik in den Zonen. Die Personenanzahl (Index 811) führt beim PEB zu einer großen Energy Performance Gap und im Extremfall (Belegung mit 3 Personen und 150 W Anschlussleistung pro Arbeitsplatz) sogar zu einer Erhöhung von circa 90% gegenüber dem Ausgangsszenario der Einzelsimulation. Dies ist auf den erhöhten elektrischen Energiebedarf für den Nutzerstrom durch die Arbeitsmittel zurückzuführen. Im Gegensatz dazu sinkt der Endenergiebedarf für Wärme, je mehr Personen bzw. Arbeitsgeräte sich in der Zone befinden und je höher die internen Wärmegewinne sind. Diese Thematik zeigt deutlich die Notwendigkeit einer wechselseitigen Betrachtung von Energy Performance Gap und Comfort Performance Gap in diesem Zusammenhang. Die internen Wärmegewinne durch Personen und Geräte führen im ungünstigsten Fall sogar zu einer Erhöhung der UETGS um den Faktor 2 (Referenz 2500 Kh/a; max. Wert 5000 Kh/a). Die letzte variable Eingangsgröße „Fensteröffnungszeit“ (Index 823) führt aufgrund der ganzjährigen Abbildung des Fehlerfalls (definierte Fensteröffnung auch im Winter) zu einem geringen Anstieg des Primär- und Endenergiebedarfs Wärme. Die größte Auswirkung für diesen Input ist bei der Zielgröße UETGS aufgrund des Lüftungsverhaltens zu erkennen. Im Sommer wird das bereits stark überhitzte Gebäude durch die über die gekippten Fenster einströmende warme Außenluft zusätzlich aufgeheizt, was zu einem extremen Anstieg der UETGS auf bis zu 6000 kWh/a führt.



**Abbildung 8:** Box-Plots für Zielgrößen Energy Performance Gap und Gebäude „KRA“ (DWD TRY 2015)

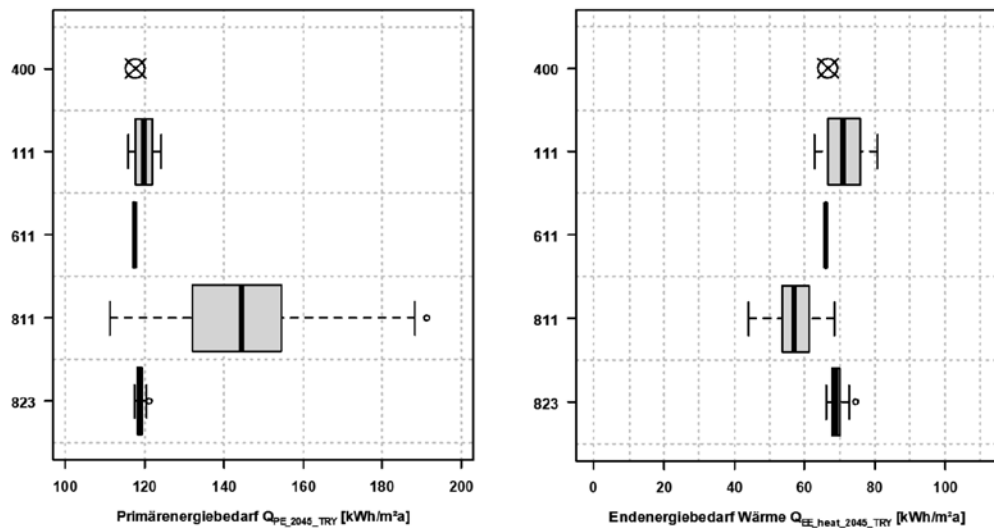


**Abbildung 9:** Box-Plots für Zielgrößen Comfort Performance Gap und Gebäude „KRA“ (DWD TRY 2015)

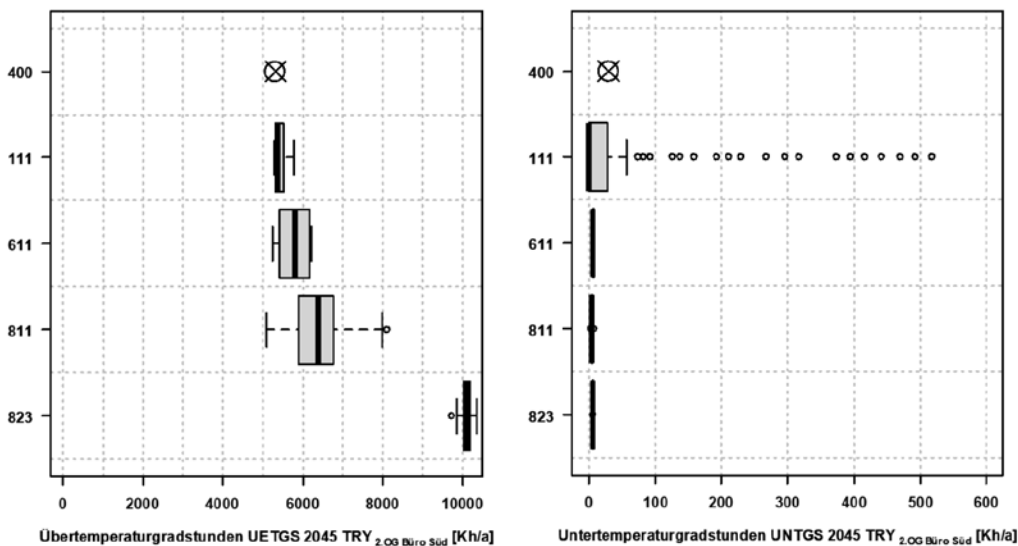
#### Krausenstraße (DWD TRY 2045)

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse der Monte-Carlo-Simulationen für die „Krausenstraße“ unter Berücksichtigung des anthropogenen Klimawandels durch die resultierende Erhöhung der Außenlufttemperaturen analysiert. Dazu wird der Wetterdatensatz des DWD für das repräsentative Testreferenzjahr 2045 (Zeitraum 2030 bis 2060) am definierten Gebäudestandort verwendet.

Die nachfolgenden Abbildungen 10 und 11 zeigen eine sehr ähnliche Charakteristik der Ergebnisse im Vergleich zu den vorangegangenen Untersuchungen ohne zukünftige Klimaänderungen. Im Wesentlichen bestehen die Hauptunterschiede darin, dass sich in allen Simulationsszenarien die Überhitzungsproblematik durch die Zunahme der Übertemperaturgradstunden weiter verschärft und sowohl der PEB als auch die EEB-Wärme durch die Reduktion der Transmissions- und Lüftungswärmeverluste infolge der steigenden Außenlufttemperaturen abnehmen. Unter diesen definierten Simulationsrandbedingungen sinkt der PEB im Bereich der Punktsimulationen um circa 10 % von zuvor 110 kWh/m<sup>2</sup>a (DWD TRY 2015) auf nun 100 kWh/m<sup>2</sup>a und die EEB-Wärme um circa 30 % von 90 kWh/m<sup>2</sup>a (DWD TRY 2015) auf 65 kWh/m<sup>2</sup>a. Ein ähnliches Bild zeigt sich bei der Variation aller Eingangsgrößen und kann analog zu den oben beschriebenen Auswertungen betrachtet werden. In diesem Fall führen die variierten Sollwerte für die Heizung (20–24 °C) bei der Zielgröße Endenergiebedarf Wärme zu einer Differenz von circa 7 % pro Kelvin Temperaturabweichung vom Referenzwert mit 21 °C. Der Grund für den um 2 Prozentpunkte höheren prozentualen Einfluss der Heizraumtemperatur gegenüber der oben genannten Variante „DWD TRY 2015“ (circa 5 % je Kelvin Temperaturabweichung) liegt darin, dass der Endenergiebedarf Wärme (EEB<sub>W</sub>) durch den zukünftigen Wetterdatensatz reduziert wird und somit der relative Einfluss stochastischer Schwankungen zunimmt. Die größten absoluten Änderungen ergeben sich bei den Übertemperaturgradstunden: Hier verdoppelt sich der Wert der Punktsimulation gegenüber dem Szenario ohne Klimaanpassung (DWD TRY 2015: 2500 Kh/a; DWD TRY 2045: 5000 Kh/a). Die Variation aller Eingangsgrößen führt ebenfalls zu einer Vergrößerung der Komfortleistungslücke durch die Klimaänderungseffekte.



**Abbildung 10:** Box-Plots für Zielgrößen Energy Performance Gap und Gebäude „KRA“ (DWD TRY 2045)



**Abbildung 11:** Box-Plots für Zielgrößen Comfort Performance Gap und Gebäude „KRA“ (DWD TRY 2045)

## Post-Processing-spezifische Monte-Carlo-Simulationen

### Untersuchungsgebäude 2 „Hightech-Ansatz“

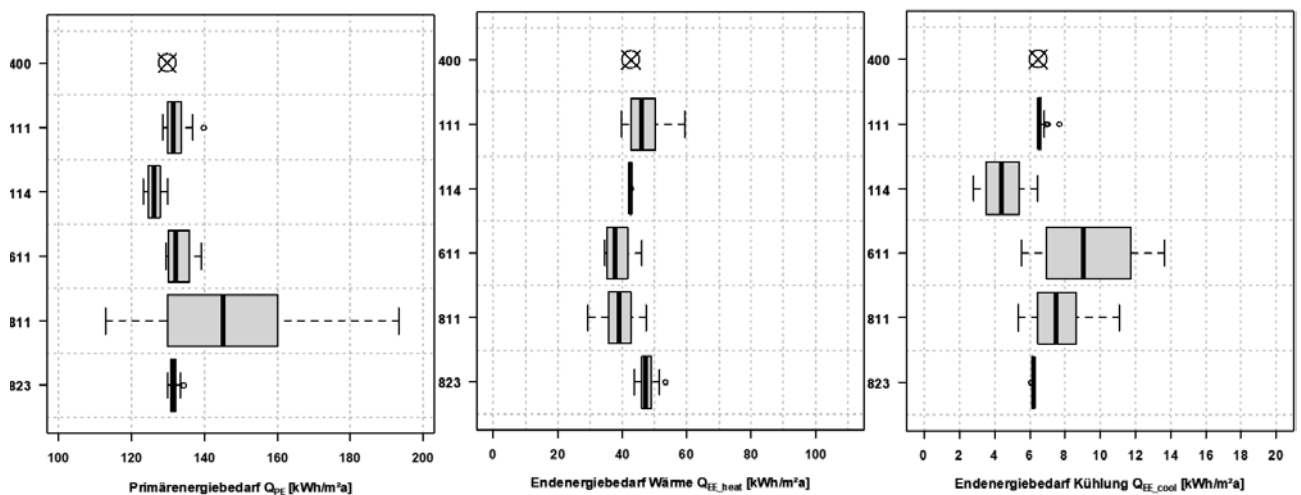
#### Reichpietschufer (DWD TRY 2015)

Die Energieströme für das untersuchte Gebäude „Reichpietschufer“ werden aufgrund der vorhandenen und umfangreicheren Gebäudetechnik um den Kühlbedarf (KB) durch die dezentralen Umluftkühlgeräte in den Räumen bzw. Kühlregister in der RLT-Anlage, den Betriebsstrom für die RLT-Anlage sowie die beiden Lufterhitzer (Vor- und Nachheizregister) für Heizzwecke erweitert. Aus diesem Grund wird für diese Untersuchungen eine zusätzliche Zielgröße „Endenergiebedarf Kühlen“ (EEB\_K) für den Energy Performance Gap eingeführt. Darüber hinaus besteht ein weiterer Unterschied zu den bisherigen Untersuchungen der „Krausenstraße“ in der Anzahl der zu variieren-

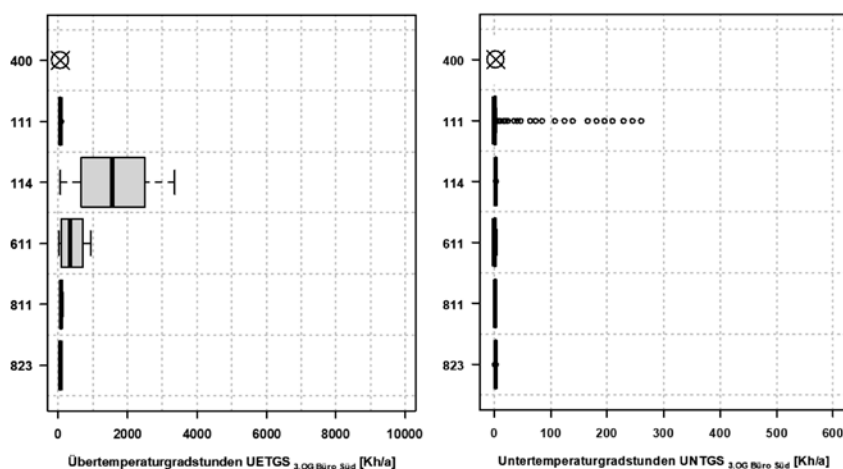
den Eingangsparameter, da hier der Einfluss der Eingangsgröße „maximaler Raumlufttemperatur-Sollwert“ (Index 114) in Bezug auf die dezentralen Umluftkühlgeräte untersucht werden kann.

Abbildung 12 und Abbildung 13 zeigen die Referenzwerte der Punktsimulationen und ergeben für die einzelnen Zielgrößen folgende Werte: PEB 120 kWh/m<sup>2</sup>a, EEB\_W 42 kWh/m<sup>2</sup>a, EEB\_K 6 kWh/m<sup>2</sup>a, UETGS 100 Kh/a und UNTGS 5 Kh/a. Die Auswertungen der Monte-Carlo-Simulationen für die Variation der einzelnen Eingabeparameter ergaben folgendes Ergebnis: Die Veränderung des Heizsollwertes durch die Eingabe „Min. Raumlufttemperatur-Sollwert“ (Index 111) beeinflusst den PEB, EEB\_K und UETGS nur minimal. Die größten Änderungen sind bei den Zielgrößen EEB\_W und UNTGS zu beobachten. Je nach eingestelltem Heizsollwert ergibt sich ausgehend vom Referenzwert 21 °C ein reduzierter (20–21 °C) bzw. erhöhter (21–24 °C) Endenergiebedarf Heizen, der im Mittel mit circa 13 % pro Kelvin Temperaturabweichung quantifiziert werden kann. In diesem Zusammenhang ist jedoch zu beachten, dass der energetische Mehrverbrauch des Heizwärmebedarfs keinen linearen Verlauf aufweist. Das heißt, je höher der Ausgangswert des Heizwärme-Sollwertes ist, desto stärker steigt der Heizwärmebedarf (und damit die prozentuale Einsparung) mit jedem zusätzlichen Grad (siehe Abbildung 12: „Endenergiebedarf Wärme“ Box-Plot Index 111 linkssteil bzw. rechtsschiefe Verteilung). Bei niedrigen Werten für diesen Input können sich im Bereich von 20 °C ungünstige Parameterkombinationen für die Zielgröße Untertemperaturgradstunden ergeben (siehe Abbildung 13 Index 111), die durch die Differenz zwischen Raumlufttemperatur und operativer Raumtemperatur zu erklären sind. Der Input „Sollwert maximale Raumlufttemperatur“, der den Sollwert für die Kühlung beschreibt, hat Einfluss auf den EEB\_K und die UETGS. Durch einen reduzierten bzw. höher eingestellten Sollwert (24–28 °C; ausgehend vom Referenzwert 24 °C) kann energetisch eine durchschnittliche Kühlenergieeinsparung von circa 14 % pro Kelvin erzielt werden. Die Verteilung zeigt hier die umgekehrte Charakteristik zu Index 111 (Variation Sollwert Heizen), und das energetische Einsparpotenzial des Kühlbedarfs entspricht ebenfalls keinem linearen Verlauf. Das heißt, je niedriger der Anfangswert des Kühlsollwertes ist, desto stärker steigt der Kühlbedarf (und damit die prozentuale Einsparung) mit jedem zusätzlichen Grad an (siehe Abbildung 12: „Endenergiebedarf Kühlung“ Box-Plot Index 114, linkssteil bzw. rechtsschiefe Verteilung). Für die Zielgröße UETGS ergeben sich bei höheren Eingangswerten thermisch unbehagliche Zustände, die auf die Charakteristik des Komfortbandes nach DIN EN 16798-1 zurückzuführen sind. Während in den Simulationen der Sollwert für die Kühlung von z. B. 28 °C ganzjährig als konstant angenommen wird, bildet dieser Wert in der Norm erst bei hohen Außenlufttemperaturen ab 32 °C die obere Grenze. Dementsprechend können in diesen Fällen die UETGS auf bis zu 3500 Kh/a ansteigen und zu Überhitzungsproblemen führen. Die Regelung des Sonnenschutzes (Index 611) führt zu einer Veränderung aller Zielgrößen mit Ausnahme der UNTGS. Der geringe Anstieg beim PEB ist vor allem auf den erhöhten Kühlbedarf bei geöffnetem Sonnenschutz zurückzuführen. Während ein dauerhaft geschlossener Sonnenschutz nur zu einer minimalen Reduktion des KB, dafür aber zu einem erhöhten Beleuchtungsenergiebedarf führen würde, steigt der KB bei dauerhaft geöffnetem Sonnenschutz dramatisch um mehr als den Faktor 2 an. Die Reduzierung der EEB\_W durch längere Öffnungszeiten des Sonnenschutzes und die damit verbundenen erhöhten solaren Wärmegewinne wirken sich aufgrund des relativ niedrigen Primärenergiefaktors (PEF) für Fernwärme (Berlin: 0,45 [Vattenfall, 2022]) kaum auf die Betrachtung der EEB aus. Der Aspekt des über längere Zeit geöffneten

Sonnenschutzes hat ebenfalls einen Einfluss auf die Zielgröße UETGS, und durch die erhöhten solaren Einträge können bis zu 1000 Kh/a erreicht werden. Die beiden weiteren Inputs „Personenanzahl“ (Index 811) und „Fensteröffnungszeit“ (Index 823) verursachen ausschließlich einen Energy Performance Gap, haben aber aufgrund der funktionierenden Heiz- bzw. Kühlsysteme keinen Einfluss auf den Comfort Performance Gap. Bei erhöhter Personenanzahl wird die überschüssige Wärmemenge durch die dezentralen Umluftkühlgeräte „weggekühlt“ und die einströmende Kaltluft im Winter durch das Heizsystem für den Input „Fensteröffnungszeit“ kompensiert (Erhöhung Zielgröße EEB\_W) bzw. im Sommer der zusätzliche Wärmeeintrag durch das Kühlsystem (Erhöhung Zielgröße EEB\_K). Im Bereich des Energy Performance Gap ergibt sich für die Personenanzahl folgendes Bild: Der stark ansteigende EEB ist sowohl auf den erhöhten Kühlbedarf als auch auf den erhöhten Betriebsstrom für die Arbeitsmittel infolge der steigenden Personenanzahl zurückzuführen. Der reduzierte EEB\_W ist aufgrund des niedrigen PEF von 0,45 kaum ausschlaggebend.



**Abbildung 12:** Box-Plots für Zielgrößen Energy Performance Gap und Gebäude „RPU“ (DWD TRY 2015)



**Abbildung 13:** Box-Plots für Zielgrößen Comfort Performance Gap und Gebäude „RPU“ (DWD TRY 2015)

### Reichpietschufer (DWD TRY 2045)

In diesem Abschnitt werden die Auswirkungen der Klimaänderungsszenarien auf das „Reichpietschufer“ unter Verwendung des DWD-Wetterdatensatzes TRY 2045 untersucht. Wie aus Abbildung 14 und Abbildung 15 ersichtlich ist, bleiben die grundsätzlichen Eigenschaften und Ausprägungen aller Ergebnisse der Monte-Carlo-Simulationen auch in diesem Zusammenhang im Vergleich zu den vorangegangenen Untersuchungen gleich.

Für den PEB lässt sich festhalten, dass die eingesparte Heizenergie aufgrund der reduzierten Transmissions- und Lüftungswärmeverluste durch den erhöhten Kühlbedarf infolge steigender Außenlufttemperaturen und solarer Einstrahlung kompensiert wird und somit ein „Nullsummenspiel“ entsteht. Die abnehmende Bedeutung des Heizwärmebedarfs wird durch die Eingabe „minimaler Raumlufttemperatur-Sollwert“ deutlich. Allerdings steigt das prozentuale Energieeinsparpotenzial für die Zielgröße Endenergiebedarf Wärme pro Kelvin Temperaturabsenkung/-erhöhung um zwei Prozentpunkte von circa 12 % (DWD TRY 2015) auf durchschnittlich circa 14 % für diesen Wetterdatensatz DWD TRY 2045. Dieser Sachverhalt lässt sich auf den sinkenden Referenzwert für den Heizwärmebedarf zurückführen und führt somit zu einer erhöhten Relevanz von stochastischen Schwankungen im Gebäudebetrieb. Dieser Sachverhalt führt beim Endenergiebedarf Kühlen zu einem gegenläufigen Effekt, und im Vergleich zur Variante mit dem Wetterdatensatz DWD TRY 2015 verringert sich in diesem Fall der relative Einfluss der Eingangsgröße „Sollwert Kühlen“ um zwei Prozentpunkte auf durchschnittlich circa 12 % pro Kelvin Temperaturabsenkung. Der EEB\_W sinkt bei dieser Variante mit der Klimaerwärmung deutlich ab, und die Sollwerte für die Kühlung spielen nun eine übergeordnete Rolle. Der Maximalwert (Sollwert Kühlen 24 °C) für den EEB\_K verdoppelt sich nahezu bei der Eingabe „Min. Sollwert Raumlufttemperatur“. Hinsichtlich der thermischen Behaglichkeit ergeben sich nur geringe Änderungen, was auf die implementierte Kühlfunktion der dezentralen Geräte zurückzuführen ist.

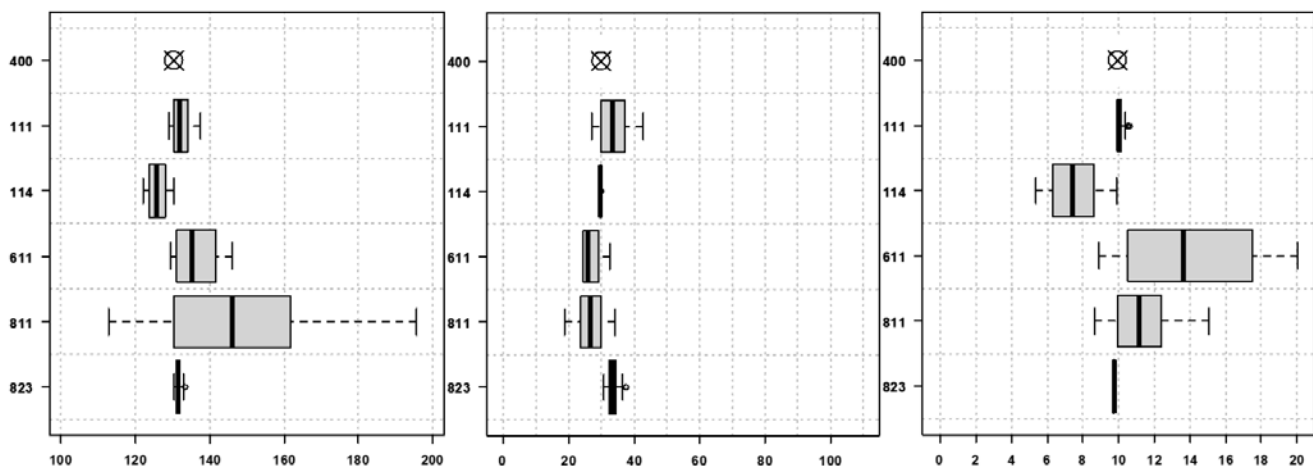
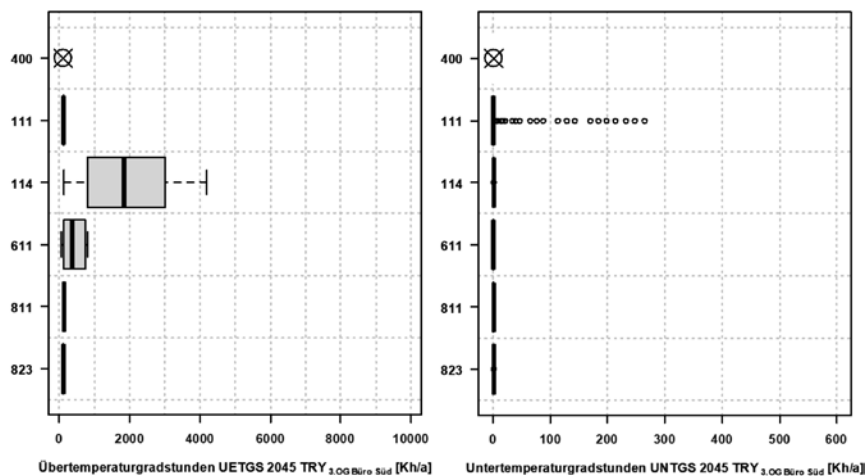


Abbildung 14: Box-Plots für Zielgrößen Energy Performance Gap und Gebäude„RPU“ (DWD TRY 2045)



**Abbildung 15:** Box-Plots für Zielgrößen Comfort Performance Gap und Gebäude „RPU“ (DWD TRY 2045)

### Vergleich Untersuchungsgebäude „Lowtech-Ansatz“ und „Hightech-Ansatz“

In diesem Kapitel werden die Simulationsergebnisse der beiden untersuchten Gebäude gegenübergestellt und analysiert. Ziel ist es, erste Erkenntnisse über die Auswirkungen von Performance Gaps abzuleiten. Darüber hinaus werden die Wechselwirkungen zwischen Energiebedarf und thermischer Behaglichkeit im Kontext von Low- und Hightech-Gebäuden verglichen.

Die folgende Tabelle 5 zeigt die Simulationsergebnisse der Zielgrößen für den korrekten bzw. fehlerfreien Betriebszustand (Index 400/Punktsimulation) der beiden untersuchten Gebäude. Es wird deutlich, dass für die Zielgröße „Primärenergiebedarf“ sowohl zwischen den beiden Gebäuden als auch für die Klimaänderung nur geringe Unterschiede auftreten. Das Gebäude mit dem Lowtech-Ansatz in der Krausenstraße (ohne Kühlung) weist aufgrund der zukünftigen Klimaerwärmung einen um circa 8% reduzierten Primärenergiebedarf auf. Diese „Energieeinsparung“ wirkt sich jedoch negativ auf die thermische Behaglichkeit aus. Die Übertemperaturgradstunden, die sich von 2445 Kh/a auf 5314 Kh/a mehr als verdoppeln, weisen auf eine bereits bestehende und sich zukünftig noch verschärfende Übertemperaturproblematik hin. Die Wirkung des reduzierten Energiebedarfs durch klimatische Veränderungen in Form des Prognose-Wetterdatensatzes DWD TRY 2045 wird für beide Gebäude insbesondere anhand der Zielgröße „Endenergiebedarf Wärme“ deutlich. Sowohl beim Lowtech-Gebäude (circa 25 %) als auch beim Hightech-Gebäude (circa 30 %) reduziert sich dieser Wert deutlich und zeigt damit, dass Heizkonzepte zukünftig eine untergeordnete Rolle spielen werden. Demgegenüber unterstreicht die Zielgröße „Endenergiebedarf Kühlen“, die beim RPU klimabedingt um circa ein Drittel ansteigt, die Notwendigkeit innovativer und energieeffizienter Kühlkonzepte bzw. passiver Kühlmaßnahmen für zukünftige Gebäude. Insgesamt wird beim Gebäude mit Hightech-Ansatz der reduzierte Heizwärmebedarf durch den erhöhten Kühlbedarf kompensiert, der thermische Komfort erweist sich für das RPU aufgrund der umfangreichen Gebäudetechnik (u. a. Umluftkühlgeräte) in beiden Klimaszenarien als unkritisch. Als Ergebnis kann an dieser Stelle also festgehalten werden, dass sich unter der Voraussetzung korrekter Betriebszustände für das Objekt mit dem Hightech-Ansatz eine bessere Gebäudeperformance

hinsichtlich Energiebedarf und thermischem Komfort darstellt. Diese Grundvoraussetzung dauerhaft korrekter und fehlerfreier Betriebszustände stellt jedoch hohe Anforderungen an die energetischen Qualitätssicherungsmaßnahmen im Gebäudebetrieb und ist mit höherem Aufwand verbunden. In der Praxis hat sich gezeigt, dass ein vollständig korrekter Gebäudebetrieb nur selten erreicht wird und daher wiederum Lowtech-Konzepte mit erhöhter Robustheit angestrebt werden sollten. Dementsprechend könnte man diese unterschiedlichen Anforderungen und Wechselwirkungen mit den einfachen Worten zusammenfassen: So viel Technik wie nötig und so wenig wie möglich.

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

**Tabelle 5:** Übersicht der Simulationsergebnisse für korrekte Betriebszustände (Index 400/Punktsimulation) beider Untersuchungsgebäude

Bei den Simulationsergebnissen mit fehlerhaften Betriebszuständen bzw. unerwartetem Nutzerverhalten haben sich für beide Gebäude die internen Wärmegewinne (Anzahl Personen/Arbeitsmittel) als Eingangsgröße mit dem größten Potenzial für einen erhöhten Energiebedarf bzw. Performance Gap herausgestellt. An zweiter Stelle ist hier der „Heizsollwert“ zu nennen, und für das Gebäude mit Hightech-Ansatz zeigt sich auch die gleiche Sensitivität mit der Eingangsgröße „Sonnenschutzregelung“. Der wesentliche Unterschied zwischen dem Gebäude mit Lowtech (KRA) und dem mit Hightech-Ansatz (RPU) liegt in den unterschiedlichen Ursachen für den Comfort Performance Gap. Während beim KRA die Fensteröffnungszeiten und die internen Wärmegewinne die einflussreichsten Stellgrößen darstellen, sind es beim RPU der Sollwert für die Kühlung und die Regelung des Sonnenschutzes. Die Simulationsergebnisse mit dem veränderten Klima zeigen eine ähnliche Charakteristik bzw. Ausprägung und führen zu keiner Veränderung dieser Reihenfolgen.

## Lebenszykluskosten reale Untersuchungsgebäude

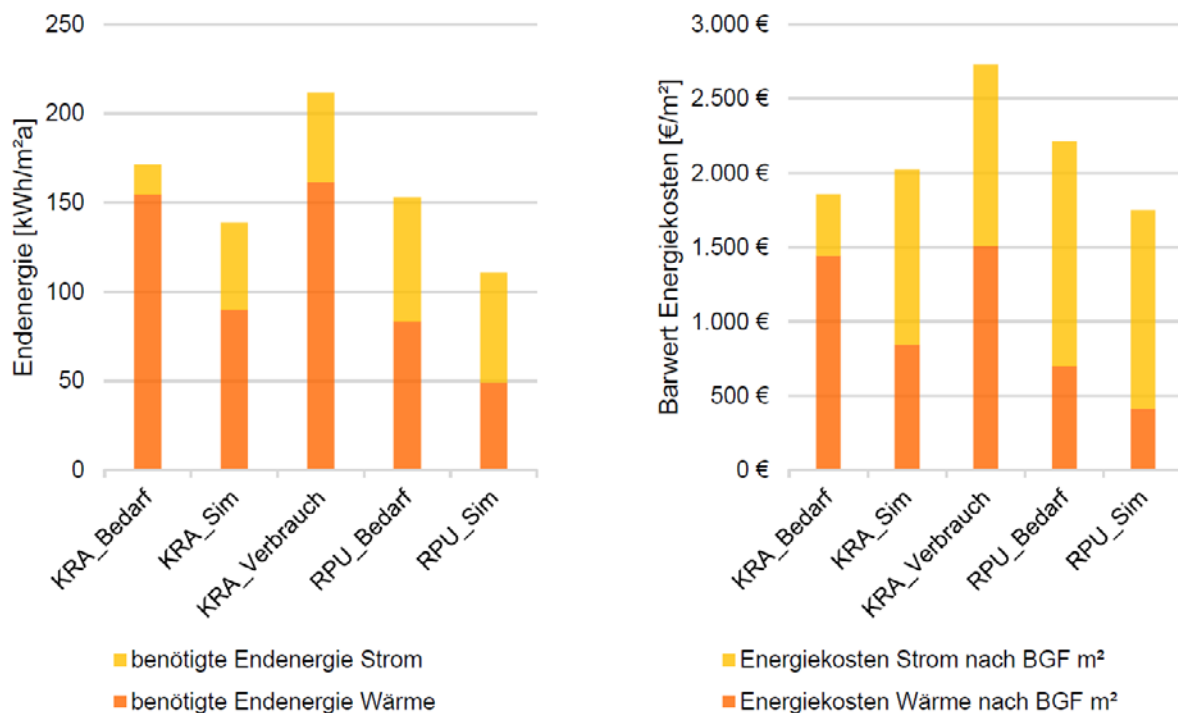
Neben dynamisch-thermischen Gebäude- und Anlagensimulationen zur Quantifizierung des Energiebedarfs während der Betriebsphase der beiden Gebäude werden auch die Lebenszykluskosten (LCC) der beiden Untersuchungsobjekte untersucht.

Vor der Betrachtung der Ergebnisse ist zu erwähnen, dass sich die zu untersuchenden Gebäude in Geometrie, Größe und Baualterklasse und damit in der vorhandenen thermischen Gebäudehülle unterscheiden. Das Gebäude RPU hat im Vergleich zu KRA einen nur halb so großen mittleren Wärmedurchgangskoeffizienten und damit um ein Vielfaches geringere Transmissionswärmeverluste über die thermische Gebäudehülle. Außerdem ist die zu beheizende Fläche bei KRA etwa 1,75-mal größer als bei RPU.

Abbildung 16 zeigt den Endenergiebedarf und die berechneten Energiekosten über den Betrachtungszeitraum von 50 Jahren.

Betrachtet man zunächst den Energiebedarf aus den vom BBSR vorgelegten Energieausweisen, so wird deutlich, dass der Heizenergiebedarf in der KRA höher ist als in der RPU. Dies liegt an den höheren Transmissionswärmeverlusten durch die schlechte thermische Gebäudehülle und den zusätzlichen Wärmeverlusten durch die natürliche Lüftung. Daher sind die Energiekosten für Wärme in RPU nur halb so hoch wie in KRA. Dagegen ist der Strombedarf bei RPU etwa viermal so hoch wie bei KRA. Dies ist zum einen auf die zusätzliche TGA (elektrische Durchlauferhitzer für Warmwasser, RLT-Anlage, Kühlung) und zum anderen auf den höheren Energiebedarf für die Beleuchtung zurückzuführen. Da Strom und Wärme bei der Berechnung unterschiedlich bepreist werden (Verhältnis Strom : Fernwärme = 2,5 : 1), ergeben sich erhebliche Unterschiede bei den Energiekosten. So liegen die zu erwartenden Kosten für den Energiebedarf aus den Energieausweisen für den Hightech-Ansatz circa 350 €/m<sup>2</sup> höher als für den Lowtech-Ansatz, obwohl das Lowtech-Gebäude einen deutlich höheren Heizwärmebedarf hat.

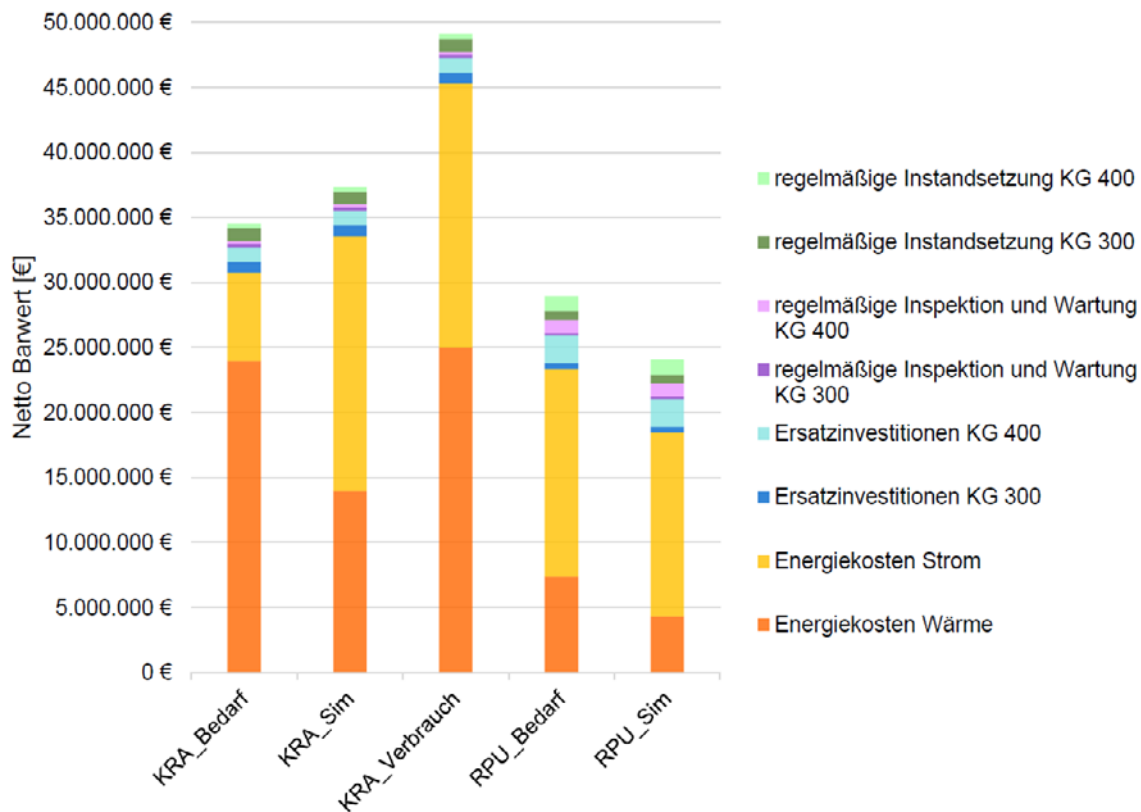
Die simulierten Energiebedarfe liefern dagegen weitergehende Ergebnisse. Für beide Gebäude reduziert sich der Heizenergiebedarf um circa 40 % gegenüber den Energiebedarfen aus den Energieausweisen. Der Strombedarf hingegen verdreifacht sich bei KRA, während er bei RPU nur leicht ansteigt. Dies hat zur Folge, dass die Energiekosten für den Lowtech-Ansatz um circa 250 €/m<sup>2</sup> höher sind als für den Hightech-Ansatz. Dieser Unterschied zu den bisherigen Ergebnissen ist auf die unterschiedlichen Berechnungsmethoden des Energiebedarfs zurückzuführen. Während die EnEV ein statisches Berechnungsmodell verwendet, wird in der Simulation eine dynamische Berechnung durchgeführt. Um Gewissheit über diese Problematik zu erlangen, müssten im Folgenden die tatsächlichen Verbräuche untersucht werden. Da nur die Energieverbräuche der KRA vorliegen, kann hier kein abschließender Vergleich durchgeführt werden. Aus Abbildung 17 kann jedoch geschlossen werden, dass KRA mit den tatsächlichen Energieverbräuchen die höchsten Energiekosten aller Varianten aufweist. Es zeigt sich, dass der Energiebedarf für die Beleuchtung deutlich über dem berechneten Wert des Energieausweises liegt.



**Abbildung 16:** Endenergie und Energiekosten für beide Untersuchungsgebäude in Abhängigkeit unterschiedlicher Berechnungsgrundlagen

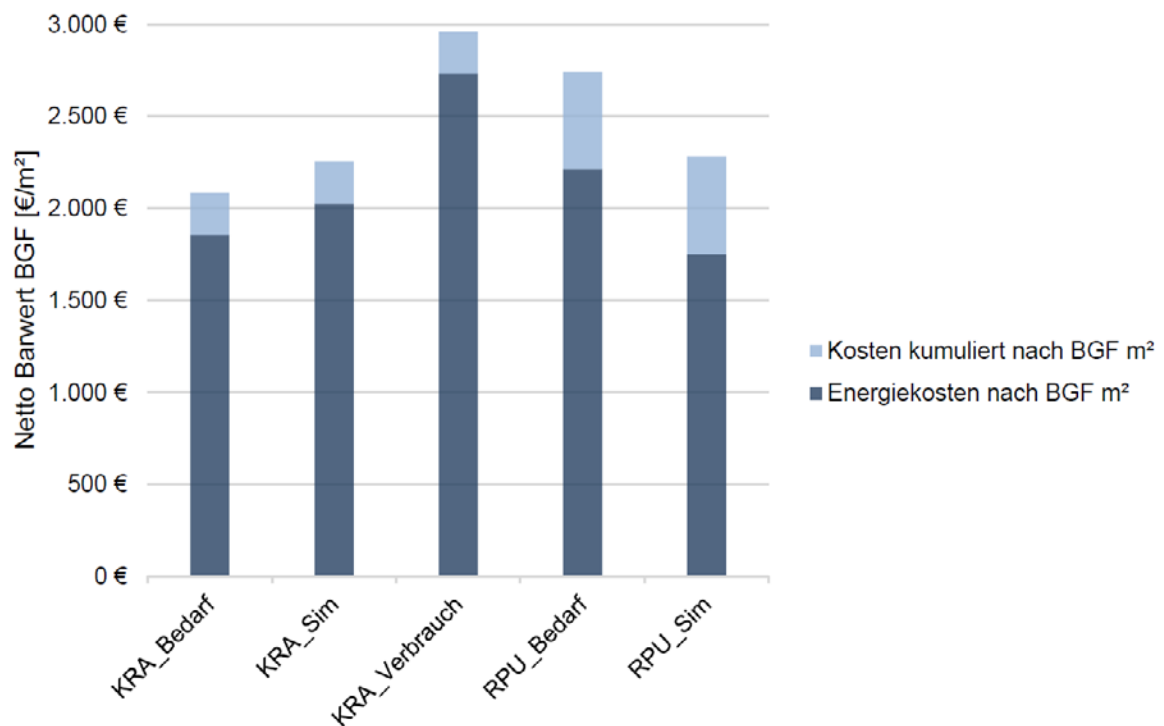
Die Energiekosten eines Gebäudes sind ein wesentlicher Bestandteil der Lebenszykluskosten, aber auch die Herstellungskosten, Ersatzinvestitionen, regelmäßige Instandsetzungs-, Inspektions- und Wartungskosten dürfen nicht vernachlässigt werden. Daraus ergeben sich für die Gebäude KRA und RPU die folgenden kumulierten Betriebskosten über einen Zeitraum von 50 Jahren.

Abbildung 17 zeigt, dass die zu erwartenden laufenden Kosten und Ersatzinvestitionen für das Hightech-Gebäude um ein Vielfaches höher sind als für das Lowtech-Gebäude. Dies liegt an den zusätzlichen TGA-Modulen, die nach Ablauf der Nutzungsdauer zusätzlich ersetzt werden müssen. Gleiches gilt für die Fenster, weshalb im KRA ein höherer Betrag berechnet wird, da mehr Fenster ersetzt werden müssen als im RPU. Aufgrund der unterschiedlichen Gebäudeflächen sind die Gesamtkosten nicht vergleichbar. Aus diesem Grund wurden die Gesamtkosten auf die Bruttogeschossfläche pro m² normiert, wodurch sich folgende Werte in der folgenden Abbildung 18 ergeben.



**Abbildung 17:** Gesamte Betriebskosten für beide Untersuchungsgebäude in Abhängigkeit unterschiedlicher Berechnungsgrundlagen

Zunächst werden wieder die Ergebnisse der Energiebedarfsberechnungen betrachtet. Hier ist das Lowtech-Gebäude um circa 650 €/m<sup>2</sup> günstiger als das Hightech-Gebäude. Bei den Ergebnissen des simulierten Energiebedarfs ist der Lowtech-Ansatz nur um 30 €/m<sup>2</sup> günstiger. Trotz der höheren Energiekosten des Lowtech-Gebäudes (siehe Abbildung 16) sind die Gesamtkosten günstiger als beim Hightech-Gebäude. Der Grund dafür sind die höheren kumulierten Kosten aus Ersatzinvestitionen, regelmäßigen Instandsetzungs-, Inspektions- und Wartungskosten der komplexeren und umfangreicheren TGA des Hightech-Gebäudes. Die Betriebskosten des KRA mit dem tatsächlichen Energieverbrauch sind am höchsten. Da es keine Vergleichsvariante (HLK mit Verbrauchswerten) gibt, kann in diesem Zusammenhang aus den untersuchten Varianten keine abschließende Vorzugsvariante bzw. kein Gebäudetechnikstandard abgeleitet werden.



**Abbildung 18:** Betriebskosten pro m² BGF für beide Untersuchungsgebäude in Abhängigkeit unterschiedlicher Berechnungsgrundlagen

## Zusammenfassung und Fazit

Der anthropogene Klimawandel in Verbindung mit zunehmender Ressourcenknappheit stellt Mensch und Umwelt vor große Herausforderungen. Der Gebäudesektor soll nach dem Willen der Bundesregierung bis 2045 zu einem klimaneutralen Gebäudebestand umgestaltet werden. Um dieses Klimaziel zu erreichen, müssen wirksame Strategien und Maßnahmen entwickelt und umgesetzt werden. Die Energieeffizienz im Gebäudebestand spielt dabei aufgrund der großen Energieeinsparpotenziale eine zentrale Rolle. In diesem Zusammenhang muss ein besonderes Augenmerk auf die Reduzierung von Performance Gaps und die Optimierung der Gebäudeperformance gelegt werden. Dazu ist der Grundsatz erforderlich, dass ein ordnungsgemäßer und störungsfreier Gebäudebetrieb durch eine robuste Anlagentechnik sichergestellt wird. Dies bedeutet, dass Gebäude in der Betriebsphase robust (vgl. stabil, fehlertolerant, widerstandsfähig) gegenüber Betriebsfehlern, Nutzerverhalten und Klimawandel sein müssen. Dadurch können Mehrverbräuche an Energie und damit erhöhte CO<sub>2</sub>-Emissionen sowie negative Auswirkungen auf den Nutzerkomfort vermieden werden.

Unsicherheits- und Sensitivitätsanalysen auf Basis von Monte-Carlo-Simulationen mit einem generischen Gebäudemodell haben gezeigt, dass Betriebs-, Bedienungs- und Nutzungsfehler zu einem hohen energetischen Mehrverbrauch führen und die Zielgrößen (Energiebedarf, Über- und Untertemperaturgradstunden) stark erhöhen. Bei ungünstigen Parameterkombinationen erhöht sich der Primärenergiebedarf um den Faktor 2,5 gegenüber dem Median. Durch die Sensitivitätsanalysen konnte festgestellt werden, dass der energetische Mehrverbrauch vor allem durch Nutzerfehler (minima-

ler Raumtemperatursollwert, maximaler Raumtemperatursollwert, Sonnenschutzsteuerung, Anzahl Personen inklusive Arbeitsmittel, Fensteröffnungszeit) verursacht wird, wobei der Heizsollwert einen etwas größeren Einfluss hat als der Raumtemperatursollwert für die Kühlung (siehe Tabelle 4). Anhand der Simulationsergebnisse des generischen Gebäudemodells lässt sich somit festhalten, dass das Nutzerverhalten grundsätzlich einen größeren Einfluss auf alle drei Zielgrößen hat als die abgebildeten Betriebsfehler der Gebäudetechnik.

Aufbauend auf den Untersuchungen mit dem generischen Gebäudemodell wurde im nächsten Schritt die simulationstechnische Analyse der Performance Gaps zweier realer Untersuchungsgebäude im Kontext von Hightech- und Lowtech-Ansätzen durchgeführt. Durch diesen mehrstufigen Simulationsprozess können nun die Parameter mit dem größten Einfluss auf den Gebäudebetrieb detailliert weiter untersucht werden. Die unsicheren Randbedingungen für das Nutzerinnen- und Nutzerverhalten werden in diesem Abschnitt auf Basis der Auswertungen des Partnerforschungsprojektes „Nutzerkomfort durch Lowtech-Konzepte in Gebäuden“ in das Simulationsmodell implementiert. Darüber hinaus werden neben den Betriebsfehlern der Gebäudetechnik (Technical Gap) und dem unerwarteten Nutzerinnen- und Nutzerverhalten (User/Usage Gap) auch die Aspekte zukünftiger klimatischer Veränderungen (Ambient Gap) durch prognostizierte Wetterdatensätze in die simulationstechnischen Untersuchungen einbezogen.

In diesen Untersuchungen hat sich auch gezeigt, dass unabhängig vom Gebäudetyp die Variation des Energiebedarfs (Primär- und Endenergiebedarf) am stärksten vom Nutzerinnen- und Nutzerverhalten in Bezug auf die Personenzahl und die damit verbundenen Arbeitsmittel abhängt (User/Usage Gap). Diese unsicheren Randbedingungen können zu einer Erhöhung des Primärenergiebedarfs um circa 50 % gegenüber der Punktsimulation führen. Als Abhilfe und Vorsichtsmaßnahme ist in diesem Zusammenhang zum einen der Einsatz energieeffizienter Arbeitsmittel und die damit verbundene Reduzierung des Nutzerstroms zu nennen. Als Folge der Variation des Heizwärme-Sollwertes zeigt sich, dass der Endenergiebedarf für Heizwärme im Lowtech-Gebäude im Vergleich zur Punktsimulation um circa 15 % und im Mittel pro Kelvin Temperaturerhöhung um 5 % (DWD TRY 2015) bzw. 7 % (DWD TRY 2045) ansteigt. Dagegen wirken sich die Änderungen des Sollwertes für die Heizung im Hightech-Gebäude deutlich stärker aus und führen zu einer Vergrößerung der Energieleistungslücke. Hier wurde ein durchschnittlicher Mehrverbrauch an Endenergie von 13 % (DWD TRY 2015) bzw. 14 % (DWD TRY 2045) pro Kelvin Temperaturerhöhung berechnet; im Vergleich zur Punktsimulation ergibt sich damit im Extremfall ein bis zu 40 % höherer Endenergiebedarf für die Heizung. Durch Variation des Sollwertes für die Kühlung konnte für das Hightech-Gebäude ein erhöhter Endenergiebedarf für die Kühlung von durchschnittlich 14 % (DWD TRY 2015) bzw. 12 % (DWD TRY 2045) pro Kelvin Temperaturabsenkung quantifiziert werden.

Aus der Berechnung dieser spezifischen Kennzahlen könnte abgeleitet werden, dass sich im Rahmen dieses Projektes Lowtech-Gebäude als robuster gegenüber Temperaturanpassungen für Heizzwecke durch die Nutzerinnen und Nutzer erweisen als Hightech-Gebäude. In diesem Zusammenhang muss jedoch auf die unterschiedlichen Referenzwerte der Energiebedarfe hingewiesen werden: Der geringere Heizendenenergiebedarf des RPU aufgrund des verbesserten Energiestandards führt zu einem er-

höhten relativen Einfluss von stochastischen Schwankungen bzw. Unsicherheiten. Dennoch ist dieser Befund in erster Linie auf die Wechselwirkung zwischen den statischen Heizflächen (Heizkörper) und der RLT-Anlage zurückzuführen. Durch die ablufttemperaturabhängige Zulufttemperaturregelung steigt bei erhöhten Heizsollwerten auch der Wärmebedarf für die RLT-Anlage durch die Konditionierung des Zuluftvolumenstroms. Das Öffnen der Fenster kann mit einem erhöhten Endenergiebedarf für Wärme von bis zu 10 % für das Lowtech-Gebäude und bis zu 25 % für das Hightech-Gebäude beziffert werden. Dies unterstreicht, dass das Lowtech-Gebäude im Hinblick auf die Robustheit gegenüber dem Energy Performance Gap besser abschneidet als das Hightech-Gebäude.

Im Bereich des thermischen Komforts ist unabhängig vom Gebäudetyp das Hauptaugenmerk auf die Übertemperaturgradstunden zu legen, während die Untertemperaturgradstunden eine untergeordnete Rolle spielen. Beim Gebäude mit Hightech-Ansatz wird der Comfort Performance Gap in Bezug auf die Übertemperaturgradstunden am stärksten durch die Fensteröffnungszeiten verursacht, gefolgt von den internen Wärmegewinnen (Anzahl Personen/Arbeitsmittel) und der Regelung des Sonnenschutzes. Dementsprechend wurde auf Basis der durchgeführten Simulationen für das Lowtech-Gebäude ein erhöhtes Überhitzungspotenzial identifiziert. Diese Problematik konnte durch die im Rahmen des Partnerprojektes durchgeführten Nutzerbefragungen bestätigt werden, wobei ein Großteil der Befragten auf unbehagliche (zu warme) Raumlufttemperaturen hinwies [„Nutzerkomfort durch Lowtech-Konzepte in Gebäuden“]. Durch die Simulationen mit den Prognosewetterdatensätzen konnte gezeigt werden, dass sich diese Problematik aufgrund des Klimawandels weiter verschärfen und somit zu einer Zunahme der Übertemperaturgradstunden führen wird. Aus diesem Grund kommt der Regelung des Sonnenschutzes eine Schlüsselrolle für den thermischen Komfort im Hightech-Gebäude zu. Ein dauerhaft geöffneter bzw. manuell verriegelter Sonnenschutz, unabhängig davon, ob er durch die Nutzerinnen und Nutzer oder durch einen Betriebsfehler verursacht wird, wirkt sich drastisch auf den Kühlenergiebedarf und die Übertemperaturgradstunden aus. Als Abhilfe und Maßnahme sollte in diesem Zusammenhang bei zukünftigen Bauprojekten besonderes Augenmerk auf die Planung, den Einbau und den Betrieb bzw. die Überwachung des Sonnenschutzes gelegt werden. Im Zusammenhang mit der Bewertung der thermischen Behaglichkeit ist jedoch darauf hinzuweisen, dass auch die normativ zugrunde gelegten Temperaturbänder bzw. Grenztemperaturen in Bezug auf die Gebäudetypen (Lowtech/Hightech) kritisch hinterfragt bzw. weiter untersucht werden sollten; im Falle einer Erweiterung bzw. Anpassung der Wertebereiche für Lowtech-Gebäude würden diese in weiterer Folge (noch) besser abschneiden bzw. geringere Über- und Untertemperaturgradstunden aufweisen.

Auf Basis von Lebenszyklusberechnungen konnte gezeigt werden, dass Lowtech-Gebäude bei richtiger Ausführung im Betrieb kostengünstiger sein können als Hightech-Gebäude. Damit haben Lowtech-Gebäude das Potenzial, den Bausektor durch ressourcenschonendes und energiesparendes Bauen umfassend zu verändern, und stellen einen wichtigen Baustein zur Dekarbonisierung des Gebäudesektors dar.

# Sommerlicher thermischer Komfort – Neuformulierung der „Klimarichtlinie“ für Bauprojekte des Bundes

---

**Thomas Auer, Daniel Bell, David Briels, Ernst Gruber,  
Margarete Huber, Lukas Lauss, Bernhard Lipp,  
Ute Muñoz-Czerny, Lisa Schmitteckert, Thomas Zelger**

Der Kontinent, der sich durch den Klimawandel am schnellsten erhitzt, ist Europa. Seit den 1980er-Jahren erfolgte die Erwärmung auf dem europäischen Festland etwa doppelt so schnell wie im globalen Durchschnitt (EUA, 2024). In Deutschland liegt die durchschnittliche Jahrestemperatur bereits um 1,7 °C höher als noch im Jahr 1881, und zukünftig wird ein weiterer Temperaturanstieg prognostiziert [UBA 2023]. Wie hoch dieser Temperaturanstieg ausfallen wird und wie dessen zeitlicher Verlauf aussieht, ist im Wesentlichen von den zukünftig emittierten Treibhausgasemissionen abhängig. Mit der steigenden Jahresmitteltemperatur haben auch Hitzeextreme an Häufigkeit und Intensität zugenommen. Die Anzahl der Sommertage mit einer Tageshöchsttemperatur von mindestens 25 °C hat sich seit den 1950er-Jahren mehr als verdoppelt, und die Anzahl der heißen Tage mit einer Tageshöchsttemperatur von mindestens 30 °C hat sich beinahe sogar verdreifacht [DWD 2024]. Der Klimawandel mit steigenden Außenlufttemperaturen hat auch einen großen Einfluss auf Gebäude. Infolge der klimatischen Veränderungen kann die zunehmende Überhitzung von Innenräumen beobachtet werden. Die hohen Raumtemperaturen führen bei Menschen zu Stresssituationen und stellen sowohl bei körperlicher Aktivität als auch in Ruhe eine Belastung für Herz und Kreislauf dar. Darüber hinaus kann die Hitzebelastung auch zu Konzentrationsstörungen, Aggressionen, Depressionen, Herzinfarkt und Herzversagen führen. Resultierend können sich die negativen Auswirkungen sehr vielfältig darstellen und von Komforteinbußen über ernste gesundheitliche Folgen bis hin zu Hitzetoten reichen [Hutter 2023]. Um der Überhitzung von Innenräumen entgegenzuwirken, werden häufig Klimaanlage eingesetzt. Zumeist wird die Kälte zur Gebäudekühlung vorwiegend über energieintensive konventionelle Kompressionskältemaschinen erzeugt. Folglich ist der Betrieb von Klimaanlage mit einem steigenden Stromverbrauch verbunden und verursacht weitere CO<sub>2</sub>-Emissionen, welche wiederum zu einem verstärkten Rückkopplungseffekt auf den Klimawandel führen. In der Konsequenz muss ein Baustein zur Dekarbonisierung des Gebäudesektors sein, die mit der Gebäudeklimatisierung verbundenen CO<sub>2</sub>-Emissionen zu minimieren. Aus diesem Grund fordert das Gebäudeenergiegesetz (GEG) des Deutschen Bundestags den verstärkten Einsatz passiver Maßnahmen zum sommerlichen Wärmeschutz. In diesem Kontext müssen als gesetzliche Grundlage die Mindestanforderungen an den sommerlichen Wärmeschutz nach DIN 4108-2 verpflichtend eingehalten werden. Demzufolge sollen mittels passiver Maßnahmen der Kühlenergiebedarf für gekühlte Gebäude reduziert und bei Gebäuden ohne maschinelle Kühlung hohe sommerliche Raumtemperaturen vermieden werden.

Nach den vergangenen Sommern mit ungewöhnlich langen Hitzeperioden zeigen sich Gebäudenutzerinnen und -nutzer sowie Gebäudeplanerinnen und -planer in Hinblick auf den Einsatz von technischen Geräten zur Kühlung von Innenräumen in zunehmendem Maße sensibilisiert. Dies erschwert die argumentative Umsetzung der Klimarichtlinie für Bauprojekte des Bundes bisweilen sehr stark. Vor diesem Hintergrund und in Anbetracht der sich verändernden klimatischen Bedingungen in Mitteleuropa eruiert das hier zusammengefasste Forschungsprojekt den zukünftigen Handlungsspielraum für das Beibehalten eines weitgehenden Verzichts auf eine maschinelle Kühlung in Gebäuden, ohne die Gesundheit und die Leistungsfähigkeit der Gebäudenutzerinnen und -nutzer zu beeinträchtigen.

Hohe Temperaturen führen bei Menschen zu Stresssituationen und stellen bei körperlicher Aktivität, aber auch in Ruhe eine Belastung für Herz und Kreislauf dar [Hutter 2023]. Im Tagesverlauf besonders kritisch ist grundsätzlich der Spätnachmittag, wenn die Temperatur noch hoch ist und der Wind bereits abflaut. Wenn mehrere heiße Tage aufeinanderfolgen, ist das Hitzetrisiko besonders hoch. Neben der Analyse von Sommer- und Hitzetagen ist deshalb ein besonderes Augenmerk auf die Entwicklung der Hitzewellentage zu legen.

Eine Stellschraube zur Reduktion der Treibhausgasemissionen im Gebäudesektor stellt die Gebäudeklimatisierung dar. Bisher wird die Kälte zur Gebäudekühlung vorwiegend über energieintensive konventionelle Kompressionskältemaschinen erzeugt. Im Jahr 2005 betrugen die Treibhausgasemissionen für Gebäudekühlung in Deutschland damit je nach Studie 9 bis 15 Millionen Tonnen. Die sofortige Umstellung der Gebäudeklimatisierung auf passive oder umweltfreundliche Kühlung könnte den Endenergiebedarf für Gebäudekühlung um 64 % senken. Dies entspräche einer Senkung des Treibhauspotenzials innerhalb der Nutzungsphase um 4,7 Millionen Tonnen CO<sub>2</sub>-Äquiv. und damit um fast 4 % der heutigen direkten Treibhausgasemissionen des Gebäudesektors. Das größte Potenzial liegt dabei bei Bürogebäuden [Bettgenhäuser 2011].

Die 2010 verabschiedete EU-Gebäuderichtlinie – auf nationaler Ebene mit der Energieeinsparverordnung (EnEV) bzw. seit 2020 mit dem Gebäudeenergiegesetz (GEG) umgesetzt – sieht vor, dass alle neuen Gebäude in der EU ab 2021 nahezu auf dem Niveau von Null-Energie-Häusern errichtet werden müssen, Neubauten der öffentlichen Hand bereits ab 2019. Das GEG ist auf beheizte oder gekühlte Gebäude und die Anlagen, die zu diesem Zweck dienen sowie für Raumluftkonditionierung, Beleuchtung und Warmwasserbereitung installiert werden, anzuwenden. Es regelt Anforderungen an Bauphysik, technische Anlagen und den Einsatz regenerativer Energien und bietet Vorgaben zu entsprechenden Berechnungsverfahren (GEG, 2020). So sind in § 14 GEG auch die gesetzlichen Anforderungen zur Einhaltung des sommerlichen Wärmeschutzes verankert. Demnach muss der Sonneneintrag in Gebäuden so begrenzt werden, dass die Nutzerinnen und Nutzer vor Überhitzung des Gebäudeinnenraums geschützt werden. Außerdem gilt, dass für Nichtwohngebäude „die Höchstwerte der mittleren Wärmedurchgangskoeffizienten der wärmeübertragenden Umfassungsfläche [...] nicht überschritten werden“ dürfen.

Neue energieeffiziente Gebäudekonzepte und -technologien haben Auswirkungen auf den Komfort der Nutzerinnen und Nutzer und bedingen eine Überarbeitung der Komfortstandards. Dies hat zu einer intensiven Auseinandersetzung mit den bisheri-

gen Komfortstandards im Rahmen von Studien und Forschungsprojekten geführt, deren Ergebnisse teilweise in den gesetzlichen Regelungen Niederschlag finden.

In den Technischen Regeln für Arbeitsstätten, zuletzt geändert im März 2021, sind unter Punkt A3.5 die Anwendungsbereiche und Anforderungen der Raumtemperatur an Arbeitsplätzen geregelt [BAUA 2021]. Diese sehen vor, dass in Arbeitsräumen eine „gesundheitlich zuträgliche Temperatur herrschen muss und Fenster, Oberlichter und Glaswände unter Berücksichtigung der Arbeitsverfahren und der Art der Arbeitsstätte eine Abschirmung gegen übermäßige Sonneneinstrahlung ermöglichen müssen“.

Wärmebelastung zeigt einen wesentlichen Einfluss auf Gesundheit, Wohlbefinden und Leistungsfähigkeit des Menschen. Dies gilt sowohl für körperliche als auch geistige Tätigkeiten. Damit leiden oft die Arbeitsqualität und Arbeitsgeschwindigkeit – Fehlerhäufigkeit und Unfallrisiko steigen [Urlaub 2013 und 2015]. Um bereits in der Planung Überhitzung in Bürogebäuden hintanzuhalten, können unter Zuhilfenahme von Simulationsprogrammen raumbezogenen Energie- und Komfortkennzahlen unter Einfluss passiver und aktiver Maßnahmen auf Stundenbasis berechnet werden.

Als Ergebnisgrößen werden daraus die maximal auftretende operative Temperatur, die Übertemperaturgradstunden (über 26 °C) sowie eine Klassifizierung der operativen Temperatur über dem gleitenden Mittel der Außenlufttemperatur durchgeführt. Die betrachteten Varianten werden für die Außenklimadaten für die festgelegten TRY-Zonen berechnet – sowohl die aktuellen als auch die für die kommenden Dekaden prognostizierten.

## **Behaglichkeit und Komfort**

Gerade in der letzten Dekade wurden in den Definitionen von thermischem Komfort verstärkt die Wechselwirkung des Menschen mit der thermischen Umgebung sowie seine Reaktion darauf betont. Statt statischer Konzepte, die vor allem aus der technischen Machbarkeit und der Dimensionierung von Klimaanlage ausgingen, traten verstärkt interdependente Betrachtungsweisen in den Vordergrund, die nicht nur physikalische und physiologische, sondern auch psychologische und kulturelle Aspekte (wie z. B. Erwartungshaltungen) berücksichtigen. Empirische Studien konnten bereits zeigen, dass subjektive Empfindungen einen signifikanten Einfluss auf den thermischen Komfort haben und individuelle Bewertungen eine teils bessere Einschätzung der allgemeinen Nutzungszufriedenheit liefern als objektive Messungen basierend auf herkömmlichen Komfortmodellen [Gossauer 2008b].

Die Wirkung von kurzzeitigen Änderungen der Komfortparameter (z. B. empfundene Temperatur) und die Dynamik der Reaktion der Nutzerinnen und Nutzer durch Anpassung daran (z. B. Bekleidungsgrad oder Fensteröffnen) im Zeitmaßstab von Stunden sind noch nicht ausreichend erforscht und Gegenstand von laufenden Projekten.

### **Komfortmodelle**

Derzeit existieren unterschiedliche Modelle zur Bewertung von thermischem Komfort, die teilweise auch in die aktuelle europäische Normung Eingang gefunden haben:

- Bewertung auf Basis der Untersuchungen von Fanger [1972], die sowohl in der ISO 7730 als auch in den Ashrae 55-2017 Codes ihren Niederschlag gefunden

haben. Es handelt sich dabei um ein Wärmebilanzmodell, der Ansatz wird auch als „rational approach“ bezeichnet. Die wesentlichen Zusammenhänge wurden in Klimakammerexperimenten in Dänemark und den USA ermittelt.

- Adaptive Modelle, welche die menschliche Fähigkeit zur Anpassung an die Umgebung betonen. Diese Modelle wurden von Humphreys und Nicol einerseits und De Dear und Brager andererseits entwickelt [u. a. Humphreys 2004 und De Dear 2002]. Die Grundlagen dieses Ansatzes („adaptive approach“) wurden vor allem aus Felduntersuchungen und breit angelegten statistischen Untersuchungen ermittelt. Eine Implementierung normativer Art findet sich in Ashrae 55-2017 (fußend vor allem auf einer umfangreichen Arbeit von De Dear 2002) und EN 16798-1 (ehemals EN 15251).
- Adaptives Wärmebilanzmodell (ATHB – adaptive thermal heat balance) [Schweiker 2022]. Die Integration in eine Norm befindet sich aktuell in Arbeit.

Die Modelle koexistieren, wobei für konditionierte Gebäude in der derzeitigen europäischen Normung (Heizlastauslegung, näherungsweise auch Kühllastauslegung) ISO 7730 herangezogen wird. Adaptive Modelle werden vor allem für nicht konditionierte Gebäude diskutiert („Free Running“, in Europa in der Übergangszeit und im Sommer).

Am **Modell von Fanger** in der ISO 7730 wird vor allem die folgende Kritik angebracht:

- Adaption des menschlichen Körpers an Umgebung ist nicht berücksichtigt
- Kennwerte wurden im Labor ermittelt, diese Situation kann man nicht auf reale Situationen übertragen
- Schwüle ist nicht ausreichend berücksichtigt

Die folgenden Voraussetzungen sind für die Anwendung des **adaptiven Modells** laut EN 16798-1 erforderlich:

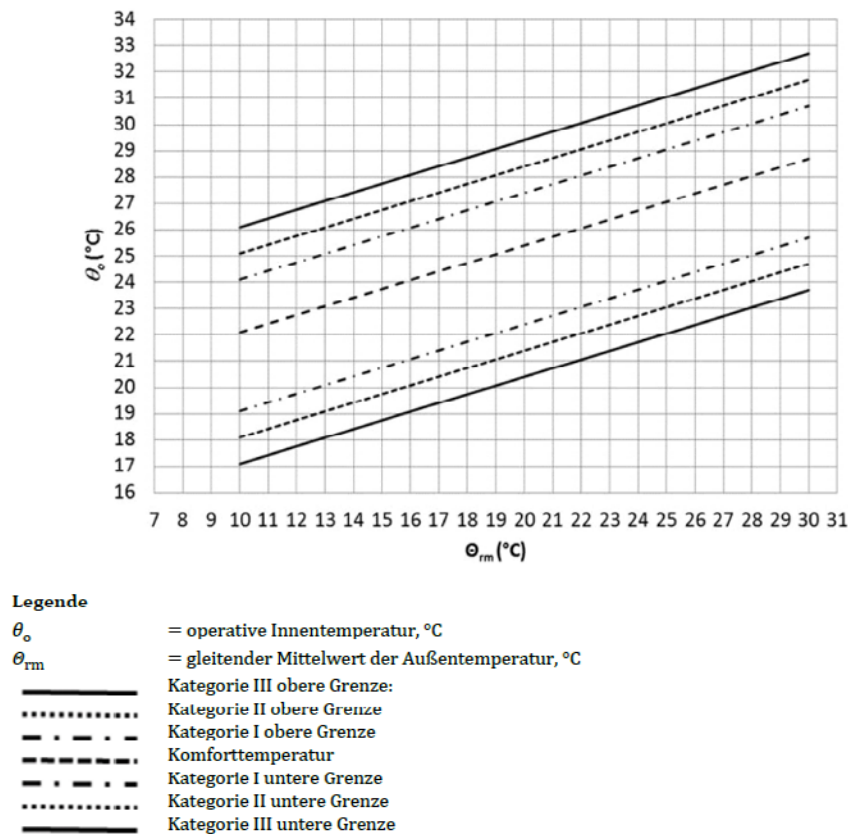
- Gebäude ohne aktive Kühlung
- Nutzerinnen und Nutzer können Bekleidung an eigene Anforderungen anpassen
- Fenster sind offenbar und können von den Nutzerinnen und Nutzern nach eigenem Wunsch geöffnet werden

Daraus folgt für empfundene Temperaturen:

- akzeptable Temperaturen hängen vom gleitenden Mittelwert der Außenlufttemperatur ab
- Einteilung in 3 Klassen (Klasse I: empfindliche Personen wie Kinder und ältere Personen; Klasse II: durchschnittliche Personen; Klasse III: akzeptabel für Altbauten; darüber nicht behaglich)
- Feuchte: Klasse I: 60 %, Klasse II: 65 %, Klasse III 70 %

Nachteil: Temperatur und Feuchte müssen getrennt beurteilt werden.

Der Zusammenhang zwischen gleitender Außenlufttemperatur und empfundener Raumtemperatur ist in der folgenden Abbildung dargestellt.



**Abbildung 19:** Zusammenhang gleitende Außenlufttemperatur und empfundene Raumtemperatur (EN 16798-1)

Für Gebäude ohne aktive Kühlanlage sind in einigen europäischen Ländern vereinfachte Verfahren entwickelt worden, die sich ebenfalls am Behaglichkeitskonzept gemäß ISO 7730 orientieren (z. B. DIN 4108, ÖNORM B 8110-3). Durch die Normierung der Wetterbedingungen sind diesen Verfahren allerdings auch adaptive Überlegungen inhärent.

#### Adaptives Wärmebilanzmodell (ATHB) nach Schweiker

Das adaptive Wärmebilanzmodell (ATHB) kombiniert den adaptiven Komfortansatz mit bestehenden Wärmebilanzmodellen [Schweiker 2022]. Auch für Schweiker sind, wie für den adaptiven Ansatz, die folgenden Ursachen für eine verstärkte Anpassungsfähigkeit von Menschen verantwortlich:

- Verhaltensanpassung
- physiologische Anpassung
- psychologische Anpassung

Im ATHB-Modell wurden individuelle Gleichungen für verhaltensbedingte, physiologische und psychologische Anpassung erstellt. Diese bilden die Eingangswerte *Isolati-*

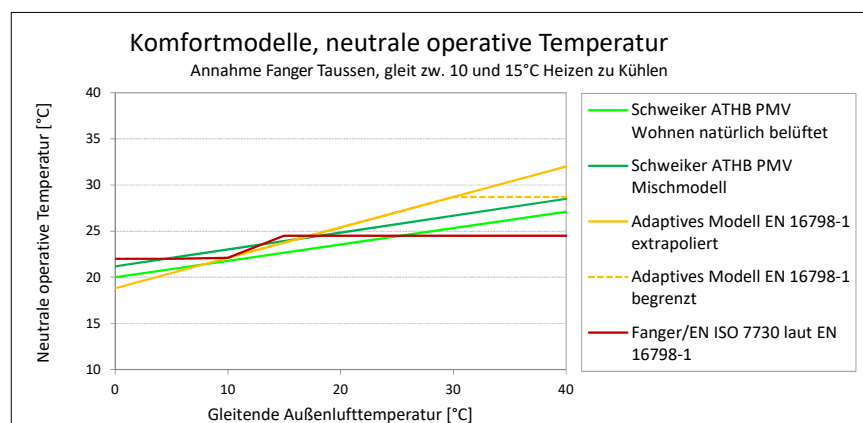
onsgrad der Kleidung (Clothing-Faktor) und Stoffwechselrate (MET), welche entsprechend diesen Gleichungen angepasst werden. Untersuchungen zeigten, dass das ATHB-Modell für natürlich belüftete und klimatisierte Gebäude unter Berücksichtigung der thermischen Wahrnehmung – abhängig von physiologischen und psychologischen Faktoren wie Stoffwechselrate und wahrgenommener Kontrolle – validere Daten liefert als das Fanger- und das adaptive Modell (Schweiker & Wagner, 2015).

Die Ergebnisse mit dem ATHB-Modell zeigen eine erhöhte Vorhersagegenauigkeit bei einer Vielzahl von Außenklimata, Gebäudetypen und Kühlungsstrategien von Gebäuden.

## Fazit Komfortmodelle

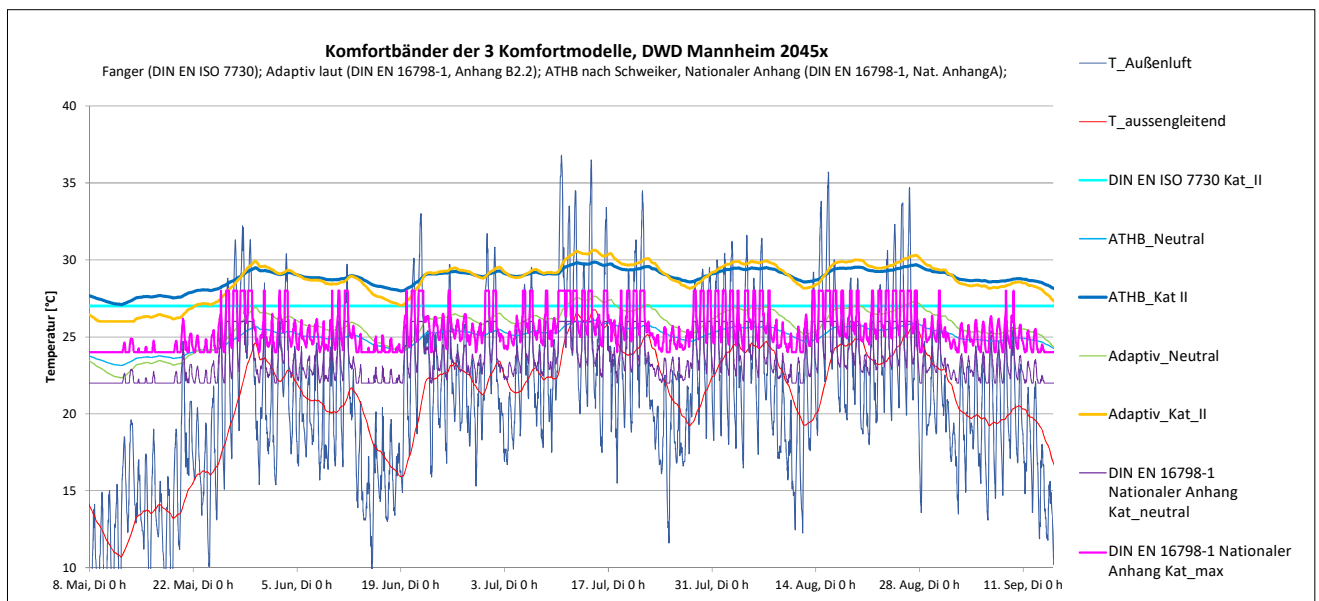
Die drei angeführten Modelle koexistieren, wobei Fangers Modell auf einem mechanistischen thermodynamischen Ansatz basiert und festgelegte Standards verwendet, während die adaptiven Modelle die Anpassungsfähigkeit und Individualität der Menschen betonen. Nach EN 16798-1 wird für klimatisierte Gebäude aktuell EN ISO 7730 herangezogen. Für Gebäude ohne aktive Kühlanlage wird in einigen europäischen Ländern das adaptive Behaglichkeitsmodell verwendet.

Der Ansatz von Schweiker hat den Vorteil, beide Modelle zu vereinen und eine höhere Prognosegenauigkeit zu erzielen.



**Abbildung 20:** Neutrale operative Temperatur für drei wesentliche Komfortmodelle: Wärmebilanzmodell („Fanger“), adaptives Modell und adaptives Wärmebilanzmodell ATHB („Schweiker“). Das Wärmebilanzmodell berücksichtigt nicht explizit die Außenkonditionen, allerdings ergeben sich durch die hier gewählten typischen Bekleidungsstärken von 0,75 clo im Winter und 0,5 clo im Sommer und typischen Raumluftfeuchten und Luftgeschwindigkeiten nicht klimatisierter Räume entsprechend unterschiedliche neutrale Temperaturen

Für die detaillierte Komfortbewertung in den Gebäuden wird das Modell nach Schweiker wegen der besten Korrelation in den Messungen empfohlen. Für Mannheim Innenstadt, Sommerklima 2045, ist in Abbildung 21 jeweils Kategorie II für den Sommer dargestellt (PMV innerhalb  $\pm 0,5$ ), zusätzlich ist die maximale Temperatur nach BRD-nationalem Anhang DIN EN 16798-1 angegeben.



**Abbildung 21:** Grenzwerte für Kategorie II ( $PMV \leq +0,5$ ) für die vier diskutierten Komfortmodelle. Das angesetzte Klima ist das wärmste aus dem Forschungsprojekt.

Die empirische Evidenz spricht für das adaptive Modell, bzw. das ATHB-Modell. Die gleitende Außenlufttemperatur steigt auf über 26 °C an, für das adaptive Modell werden Maximaltemperaturen von über 30 °C erreicht, im ATHB-Modell liegen diese knapp unter 30 °C.

## Expertenworkshop Berlin im Mai 2022

Unter der Einbindung unterschiedlicher Akteurinnen und Akteure aus Ministerien, Bauverwaltung, Arbeitsschutz und Forschung wurde eine Arbeitsgruppe zusammengestellt, um gemeinsam Fragestellungen zur Neuformulierung der Klimarichtlinie für Bundesgebäude zu erörtern. Ein Treffen dieser Arbeitsgruppe fand am 17. Mai 2022 in Berlin statt. Ziel war es, Ergebnisse aus bereits durchgeführten Expertinnen- und Experteninterviews zu thematisieren und die zentralen Erkenntnisse zu Handlungsvorschlägen zu verdichten.

### Methode

Grundlage der Inhalte des Workshops bildeten die strukturierten Fragen aus den vorangegangenen Expertinnen- und Experteninterviews. Die Interviews wurden wörtlich transkribiert, mittels qualitativer Software codiert und analysiert. Nach thematischer Clusterung wurden die Ergebnisse mit anonymisierten Zitaten aus den Interviews untermauert. Die Ergebnisse dieses Arbeitsschrittes stellten die Grundlage für den Workshop dar, bei dem diese in einer Art Feedbackschleife mit allen Teilnehmerinnen und Teilnehmern gemeinsam diskutiert und weiterbearbeitet wurden. Die Mitschrift und Fotodokumentation wurden in einem ersten Durchgang gesichtet, strukturiert und inhaltlich vier Themenbereichen so zugeordnet, dass Doppelungen möglichst vermieden werden konnten.

## Ergebnisse

Die Ergebnisse konnten vier Themenbereichen zugeordnet werden, diese sind:

- Zusammenspiel mit Normen und Modellen
- Förderung von Maßnahmen für sommerlichen thermischen Komfort
- Simulation und Nachweisführung
- Prozesse im Bundesbau

**Im Themenbereich A „Zusammenspiel mit Normen und Modellen“** wird in der Klimarichtlinie NEU für Bundesbauten eine wegweisende Rolle anvisiert. Die Richtlinie zielt darauf ab, in einem kompakten Rahmen von maximal 10 bis 15 Seiten wesentliche Punkte für die Implementierung aufzuzeigen. Dabei liegt der Fokus auf einer differenzierten Anwendung, um zu verhindern, dass Auslegungsfälle zur Norm werden. Besonders wichtig ist die Eigenständigkeit der Richtlinie im Verhältnis zu bestehenden Normen, wobei Abweichungen von diesen Normen möglich sind, sofern die vorgegebenen Ziele erreicht werden.

Ein zentrales Element bildet die dynamische Nachweisführung, die durch eigenständige Definitionen und Mindestanforderungen geprägt sein soll. Es soll nicht von einem maximalen Kühllastbedarf ausgegangen werden, dieser soll optimiert werden. Bereits vor der Bedarfsanmeldung soll eine umfassende Potenzialerhebung vorgesehen werden, bei der Aspekte wie Eigenenergiegewinnung, Geräteausstattung und Gebäudenutzung im Vorfeld geklärt werden. Hierbei ist die frühzeitige Einbindung der Nutzerinnen und Nutzer vorgesehen, die in einem verbindlichen Benutzerhandbuch festgehalten wird.

Die Richtlinie soll auch Gewöhnungsprozesse und Anpassungsmöglichkeiten, beispielsweise in den Bereichen Arbeitsweise, Arbeitsbereiche und Kleiderordnung, berücksichtigen. Dies ermöglicht Nutzerinnen und Nutzern, Einfluss auf ihre Umgebung zu nehmen, beispielsweise durch das Öffnen von Fenstern. Einen besonderen Stellenwert nimmt dabei das adaptive Komfortmodell ein, welches in Bundesbauten, abgesehen von Spezialnutzungen, zum Standard werden soll.

Der Begriff „Homeoffice“ soll ebenfalls in der Klimarichtlinie berücksichtigt werden, wobei besondere Vorgaben für bestimmte Arbeitsbereiche und arbeitsrechtliche Aspekte integriert werden. Die Definition und der Einsatz maschineller Kühlung sollen eindeutig geregelt sein, ergänzt durch die Möglichkeit einer automatisierten Unterstützung bei Lüftungs- und Kühlprozessen, die mit passiven Maßnahmen kombiniert werden können, unter Berücksichtigung anderer Variablen (Außenlärm ab einer gewissen dB-Grenze).

Teilautomation bei Steuerungen wird als sinnvoll und notwendig erachtet, wobei der Nutzerfreundlichkeit und dem Komfort besondere Aufmerksamkeit geschenkt wird. Die Berücksichtigung interner Lasten im Gebäude dient der Ableitung spezifischer Anforderungen und Nachweise, die in einem Benutzerhandbuch festgehalten und im Wettbewerb konkret nachgewiesen werden müssen.

Abschließend wird auf die Verwendung von Klimaentwicklungsmodellen und Testreferenzjahren hingewiesen, um eine zukunftsfähige Planung zu ermöglichen und

Nachrüstungen zu vermeiden. Die Haustechnik sollte so konzipiert sein, dass sie auch in 20 Jahren noch anpassungsfähig und umnutzbar ist, um langfristige Nachhaltigkeit und Effizienz sicherzustellen.

Im **Themenbereich B „Förderung von Maßnahmen für sommerlichen thermischen Komfort“** steht die Priorisierung passiver Maßnahmen im Vordergrund. Diese sollten grundsätzlich bevorzugt werden, wobei ein Abweichen von dieser Norm durch gut begründete Nachweise möglich ist. Die Kombination dieser Maßnahmen mit natürlicher Kühlung ist essenziell, um eine angenehme thermische Umgebung während der Sommermonate zu gewährleisten.

Bei der Umsetzung natürlicher Kühlungskonzepte ist eine differenzierte Herangehensweise erforderlich, die Standort, Exposition, Art des Projekts (Bestand oder Neubau) und Nutzung berücksichtigt. So können unterschiedlich exponierte oder genutzte Räume auch verschieden behandelt werden, beispielsweise durch zonenweise Kühlung als temporäre Lösung bei extremen Hitzewellen.

Es wird angestrebt, Konflikte zwischen dem Komfortanspruch und der Energieeffizienz innerhalb des Bewertungssystems für nachhaltiges Bauen des Bundes (BNB) zu lösen. Dies könnte durch Priorisierungen, Bezugnahme auf das Suffizienz-Prinzip, Anpassungen der Zielvereinbarungstabelle, das Arbeiten mit Überschneidungen im BNB oder durch alternative Bewertungssysteme geschehen. Ziel ist es, dass Maßnahmen, die den Komfort auf Kosten der Energieeffizienz erhöhen, nicht belohnt werden.

Darüber hinaus sollten Wettbewerbsvorgaben klar und praktikabel sein. Von Beginn an sollten die zu erreichenden Werte und Ziele feststehen und messbar sein. Ein einfaches Simulationstool, das Architektinnen und Architekten auch ohne die Hinzuziehung von TGA-Expertinnen und -Experten eine Wettbewerbsteilnahme ermöglicht, wäre dabei wünschenswert.

Ein stärkerer Fokus auf die Nutzung sowie die Nutzerinnen und Nutzer wird ebenfalls als wichtig erachtet. Da die späteren Nutzerinnen und Nutzer im Bundesbau oftmals bereits bekannt sind, sollte ihr frühzeitiger Einbezug in die Planung ermöglicht werden. Nutzerfreundlichkeit, einfache und direkte Eingriffsmöglichkeiten, Information, Begleitung der Nutzerinnen und Nutzer und eine Art „Betreuungsmanagement“ sind zentral, um Verständnis zu schaffen, Maßnahmen zu erläutern und Engagement zu fördern.

Zuletzt sollte ein Lernen und Begleiten in Bezug auf die Anpassung an unterschiedliche klimatische Bedingungen stattfinden. Ein Verlassen des Behaglichkeitsbereichs muss nicht gleich eine Gesundheitsgefährdung bedeuten. Im Rahmen eines Kommunikationskonzepts könnten Hinweise für angepasstes Verhalten in speziellen Gebäuden gegeben werden, eventuell in Kombination mit einer Flexibilisierung der Arbeitszeiten, um positive Effekte während Hitzeperioden zu erzielen.

Im **Themenbereich C „Simulation und Nachweisführung“** wurde die Integration und Anwendung von Simulationstechniken zur Überprüfung und Verbesserung des Gebäudedesigns und der Leistung thematisiert. Zunächst sollen praktikable Vorschläge für Simulationsverfahren bereitgestellt werden, mit einer klaren Definition ihrer

Anwendung. Besonders in der Wettbewerbsphase ist es wichtig, dass durch vereinfachte Simulationsmethoden überprüft werden kann, ob vorgeschlagene Maßnahmen funktionieren.

Ein weiteres wichtiges Element ist die Entscheidung, in welchen Fällen Simulationen zonenweise für das Gesamtgebäude oder speziell für kritische Räume angewendet werden sollten.

Die Maximaltemperaturen gemäß DIN 4108-2 Teil 2 erfordern die Anwendung des adaptiven Komfortmodells, um in der Simulation die thermische Behaglichkeit sicherzustellen. Das adaptive Modell des thermischen Komforts wird angewendet, um realitätsnahe Bedingungen zu schaffen und den Nutzerinnen und Nutzern Einflussmöglichkeiten zu bieten. Für Gebäudebereiche, in denen kein Einfluss möglich ist, kann als Alternative das Bilanzierungsmodell zum Einsatz kommen.

Die Verwendung aktueller Wetterdaten ist ebenfalls von Bedeutung. Es wird darauf hingewiesen, dass die aktuell genutzten Wetterdaten nicht den tatsächlichen Entwicklungsstand widerspiegeln. Daher wird vorgeschlagen, das Modell des adaptiven thermischen Komforts zu verwenden.

Für die Werte für die Auslastung im Rahmen der thermischen Simulation soll es keine Vorgabe konkreter Zahlen, sondern einen klareren Rahmen geben, um das Ergebnis der Simulation weniger beeinflussbar zu machen. Es könnten untere Kennwerte der inneren Lasten für die Simulation vorgegeben werden, von denen nur in Ausnahmefällen abgewichen werden kann.

Im **Themenbereich D „Prozesse im Bundesbau“** ist ein wesentliches Element die klare Definition dessen, was unter „passiven“ Maßnahmen verstanden wird. Case-Studies, die als Anlagen genannt werden, sollen Zielwerte, Maßnahmen oder Wege aufzeigen, um Orientierung zu bieten.

Die Nachweisführung sollte sich vor allem auf die Gebäudehülle und Fensterflächenanteile konzentrieren, unabhängig von komplexen Haustechnikkonzepten. Insbesondere hohe und große Öffnungen bieten hier großes Potenzial. Die Kontinuität vom Planungsprozess bis hin zum Betrieb des Gebäudes ist ein weiterer wichtiger Aspekt. Der Betrieb sollte so gestaltet sein, dass die Einhaltung der Planungsintentionen überwacht und sichergestellt wird. Eine enge Verknüpfung zwischen der technischen Gebäudesimulation, entsprechender Dokumentation und dem abgeleiteten Betrieb entlang vorgegebener Werte ist dafür essenziell.

Bereits in frühen Planungsphasen sollte die Anwendbarkeit von Konzepten gewährleistet sein. „Standard-Bauwerke“ mit standortunabhängigen Berechnungen könnten hier als Referenz dienen, die einfach auf ähnliche Bauwerke übertragen und bereits im Wettbewerbsstadium eingesetzt werden kann.

Eine umfassende und zuverlässige Dokumentation und Wissensweitergabe vom Entwurf bis zum Betrieb eines Gebäudes ist für das Lernen und die Verbesserung zukünftiger Projekte unerlässlich. Dies trägt zu einer transparenten und nachhaltigen Entwicklung im Bundesbau bei.

Einen Beitrag zur resilienten Planung soll die neue Klimarichtlinie leisten, mit konkreten Vorgaben zur Nachweisführung, die auch das Bewertungssystem für nachhaltiges Bauen bereichern können. Zudem wird angestrebt, radikalere Wege in der Umsetzung echter passiver Planung und entsprechendem Gebäudebetrieb zu ermöglichen und zu fördern. Dies umfasst die Planung von Anpassungsmöglichkeiten oder „adaptive opportunities“ mit entsprechender Dokumentation und verschiedenen Optionen zur Bewältigung unterschiedlicher Situationen.

## **Zusammenfassung der Parameterstudien und Simulationsergebnisse**

Um aussagekräftige Simulationen durchführen zu können, erfolgte eine Auswahl wesentlicher Parameter. Diese Parameter betreffen in erster Linie Klima, technische Ausstattung/Maßnahmen, Nutzerinnen- und Nutzerverhalten sowie gesetzliche Vorgaben. In vorliegender Studie erfolgt diese Auswahl in Anlehnung an die Vorgaben der Klimarichtlinie (KRL 2008, Kap. 5, S. 7 ff).

Die in der Gebäudeausstattung vorhandene Bandbreite von rein manuell zu bedienender Temperierung/Klimatisierung über hybride Systeme bis hin zu voll automatisierten Anlagen erfordert eine gezielte Auseinandersetzung mit jedem einzelnen Bauwerk bzw. jeder Bauaufgabe. Die Parametervielfalt wurde in zwei unterschiedliche Simulationscluster aufgeteilt:

**SC1: Der Gesamtgebäude-Parametervariation-Cluster** mit Fokus auf Kopplung von Räumen untereinander und mit Erschließung/Stiegenhäuser (TUM) zielte auf unterschiedliche Bauweisen und bildete auch das derzeit gültige Nachweisverfahren ab.

**SC2: Der Detail-Parametervariation-Cluster** mit einem vereinfachten Drei-Zonen-Modell über alle Parameter und deren Kombination (circa 4800 Fälle, FHTW) lotete die erreichbaren Behaglichkeitsparameter bei den unterschiedlichen Behaglichkeitsmodellen aus.

## **Randbedingungen für beide Parameterstudien**

### **Klima**

Für die Durchführung der Simulationen werden drei Standorte mit unterschiedlichen klimatischen Bedingungen herausgegriffen:

- (Zone 2) Rostock: kühl
- (Zone 4) Potsdam/Berlin: durchschnittlich
- (Zone 12) Mannheim: warm

Berücksichtigt werden soll der aktuelle Klimadatensatz mit integrierter typischer und künftig erwartbarer Hitzeperiode gemäß DWD.

### **Nutzung**

Die Ermittlung der internen Wärmelasten erfolgt mittels VDI 2078, DIN 4108, DIN 18599 bzw. gemäß Planungshandbüchern. Es erfolgt eine Differenzierung hinsichtlich Beleuchtungsbedarf (Raumtiefen, Neu-/Altbau, Dichte usw.).

### **Bauweise**

Abhängig von der Konstruktionsweise ist zwischen schwerer (Stahlbeton), mittlerer (Hochlochziegel) und leichter (Holzrahmen) Bauweise zu differenzieren. Ebenso findet der Baustandard Eingang in die Simulationsberechnungen (Bestand ungedämmt bis Plusenergiegebäude).

### **Gebäudegeometrie**

Zur Vereinfachung der Berechnungen wird von einem Drei-Zonen-Modell mit zwei einander gegenüberliegenden Büroräumen und dazwischenliegendem Gang ausgegangen. In der einzigen je Büroraum vorhandenen Außenwand liegen je drei Fenster à 1 x 1,5 m. Bei höherem Fensteranteil wird von einem effizienten außenliegenden Sonnenschutz ausgegangen. Es erfolgt keine Fremdverschattung durch benachbarte Gebäude.

### **Lüftung**

Lüftungsanlagen tragen im Sommer zur Kühlung des Gebäudes bei, bedürfen allerdings neben Energie auch einer Wartung und adäquaten Bedienung durch die Nutzerinnen und Nutzer. Dem gegenüber stehen Systeme für passive Nachtkühlung – mit oder ohne Steuerung durch die Nutzerinnen und Nutzer. Bei der Simulation ist besonders auf die Regelung (manuell, automatisch) sowie einen möglichen Variantenmix Rücksicht zu nehmen, um nicht die ungünstigste Variante abzubilden.

### **Sonnenschutz**

Die Qualität eines gegebenenfalls vorhandenen Sonnenschutzes hat großen Einfluss auf den Temperaturverlauf in den Büroräumen. Bei den Simulationen muss vorab geklärt werden, inwieweit bei den unterschiedlichen Bedienarten (manuell, automatisch) auf den Sonnenschutz und dessen Wirksamkeit eingegangen wird.

## **Fragestellungen der Parameterstudien**

Mögliche Fragestellungen und erwartbare Ergebnisse im Rahmen der Parameterstudie sind:

- Unter welchen Randbedingungen könnten Nutzerinnen und Nutzer bei optimalem Verhalten mit natürlichen Kühlmaßnahmen auskommen?
- Welche Ergebnisse sind bei ungünstigem Verhalten zu erwarten?
- Kann in ungünstigen Fällen durch leichte aktive Kühlung (z. B. Freecooling über Grundwasser) und adaptiertes Nutzerinnen- und Nutzerverhalten ein ausreichender thermischer Komfort erzielt werden?
- Wie können einfache, aber zielkonforme Nachweise aussehen? Welche vorhandenen Tools können diese liefern?

## **Parameterstudie und Nutzerinnen- und Nutzerzufriedenheit**

Gebäude sind in jeder Hinsicht so zu planen und zu errichten, dass sie für die Menschen darin ein komfortables, behagliches Umgebungsklima schaffen. Aus durchgeführten Studien geht hervor, dass die Einflussnahmemöglichkeit seitens der Nutzerinnen und Nutzer Auswirkungen auf deren Zufriedenheit mit den thermischen

Bedingungen hat [Boerstra 2010 und Hellwig 2020]. Es gilt, die für Energiebedarf und Lebenszykluskosten essenziellen Maßnahmen ins Verhältnis zum Nutzerinnen- und Nutzerkomfort zu setzen und gegeneinander abzuwägen – wobei diese Maßnahmen einander nicht zwingend widersprechen müssen.

Es ist bei der Gebäudeplanung zu entscheiden, welche Komfortklasse angestrebt werden sollte, damit hohe Nutzerinnen- und Nutzerzufriedenheit erreicht wird. Dafür ist sowohl die Analyse des adaptiven Komfortmodells als auch in einem weiteren Schritt nach Gebäudefertigstellung die Betreuung der Nutzerinnen und Nutzer für die optimale Nutzung der natürlichen Kühlpotenziale erforderlich. Ein Gebäude kann und soll niemals alleine funktionieren – es funktioniert nur so gut, wie die Menschen bereit sind, es zu bedienen.

Architektur entwickelt sich, seit Menschen begonnen haben, Behausungen zu errichten. In den vergangenen Jahrzehnten hat diese Entwicklung aufgrund von Energiekrisen und technischen Errungenschaften große Fahrt aufgenommen und verlangt den Menschen ein geändertes Nutzungsverhalten ab. Die Vorstellung von „selbst denkenden“, mit großem technischen Aufwand errichteten Gebäuden ist der Tatsache gewichen, dass die unterschiedlichen (Komfort)Bedingungen optimalerweise von den Nutzenden selbst gesteuert und damit einerseits den klimatischen Bedingungen als auch unterschiedlichen Erwartungen gerecht werden sollen. Herausforderung ist dabei die Beantwortung der Fragen, wie Nutzerinnen und Nutzer bei optimalen technischen Bedingungen (z. B. guter Sonnenschutz, nächtliche Fensterlüftung bei vorhandenem Schlagregen- und Einbruchschutz möglich) handeln müssen bzw. inwiefern sich der thermische Komfort ändert, sollten Nutzerinnen und Nutzer nicht oder wenig aktiv bei passiven Maßnahmen agieren.

## Vorgangsweise Gesamtgebäude-Parametervariation SC1

### Methodik und Forschungsdesign

Im Rahmen dieser Forschungsarbeit wird die Wirksamkeit von passiven Maßnahmen in Bezug auf die thermische Behaglichkeit und den Energiebedarf untersucht. Zu diesem Zweck werden dynamisch-thermische Gebäudesimulationen in Form eines ganzheitlichen Modellierungsansatzes (*Whole Building Simulations*) durchgeführt, wodurch der gesamtheitliche Einfluss von passiven Maßnahmen in hochauflösender Granularität auf Raumebene analysiert werden kann. Die Effektivität der passiven Maßnahmen wird durch das Potenzial quantifiziert, die Anzahl der Übertemperaturstunden (ÜTS) bzw. Übertemperaturgradstunden (ÜTGS) im Vergleich zu einem definierten Referenz-Basisfall zu reduzieren. Zudem wird geprüft, ob durch die Maßnahmen die Überhitzung von Innenräumen auf eine zumutbare Anzahl von ÜTS bzw. ÜTGS anhand korrespondierender Überschreitungshäufigkeiten (ÜH) in Bezug auf das adaptive Komfortband nach DIN EN 16798-1 begrenzt werden kann. Durch die simulationstechnischen Untersuchungen zu den Grenzen der Wirksamkeit passiver Maßnahmen soll die übergeordnete Forschungsfrage beantwortet werden, ob und wie es in Zukunft noch möglich ist, Gebäude ohne maschinelle Kühlung zu bauen bzw. zu betreiben.

Die Auswertungen der thermischen Behaglichkeit erfolgen auf Grundlage des adaptiven Komfortbands nach DIN EN 16798-1. Demnach resultieren die Simulationsergebnisse der ÜTS in einer prozentuellen Überschreitungshäufigkeit während der Anwesenheits- bzw. Nutzungszeit. Des Weiteren wird in Bezug auf das adaptive Komfortband

die Differenzierung zwischen Kategorie II und Kategorie III vorgenommen. Als Begründung für die Anwendung der DIN EN 16798-1 ist anzuführen, dass im Gebäudesimulationsmodell keine maschinelle Kühlung zum Einsatz kommt. Aufgrund der Tatsache, dass sich die Effektivität von passiven Maßnahmen infolge des Klimawandels verändern kann, werden die Simulationen mit unterschiedlichen Klimadatensätzen durchgeführt. Das gegenwärtige Klima wird durch die ortsgenauen Testreferenzjahre des Deutschen Wetterdienstes TRY 2045 repräsentiert, und die zukünftigen klimatischen Veränderungen werden mit den ortsgenauen sommerfokussierten Testreferenzjahren des DWD als TRY 2045x abgebildet [Hutter 2023]. Darüber hinaus wird auch die Variation des Gebäudestandorts durchgeführt, um den Einfluss der Lage bzw. der unterschiedlichen Sommerklimaregionen nach DIN 4108-2 zu untersuchen. Zur Durchführung der ganzjährigen dynamisch-thermischen Gebäudesimulationen wird die Software IDA-ICE verwendet.

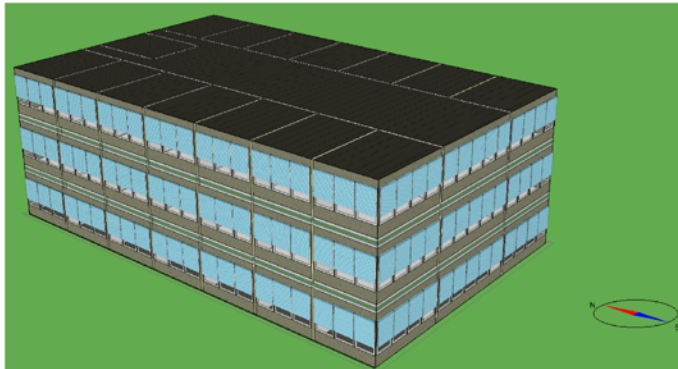
Zur Umsetzung der Arbeit wird ein iterativer Simulationsprozess aufgebaut, welcher aus drei verschiedenen Simulationsebenen besteht. Zu Beginn werden in der ersten Simulationsebene 30 unterschiedliche passive Maßnahmen als Einzeluntersuchungen zur Wirksamkeit auf die thermische Behaglichkeit und Auswirkungen auf den Energiebedarf simuliert. Darauf aufbauend werden in der zweiten Simulationsebene die wirksamsten passiven Maßnahmen unter Berücksichtigung der Auswirkungen auf den Energiebedarf zusammengeführt und in Form von diversen Maßnahmenkombinationen zur Untersuchung von Synergieeffekten abgebildet. In diesem Zusammenhang werden Sensitivitätsanalysen durchgeführt, um jene passiven Maßnahmen mit einem signifikanten Einfluss auf die Simulationsergebnisse zu identifizieren und jene, die eine untergeordnete Rolle spielen. Abschließend wird in der dritten Simulationsebene der normative Nachweis zum sommerlichen Wärmeschutz nach DIN 4108-2 geführt. Die Nachweisführung der Maßnahmenkombinationen erfolgt mit den in der Norm vorgegebenen Simulationsrandbedingungen und wird anhand der definierten Zielgröße „Übertemperaturgradstunden“ bewertet.

## Modellierung und Simulationen

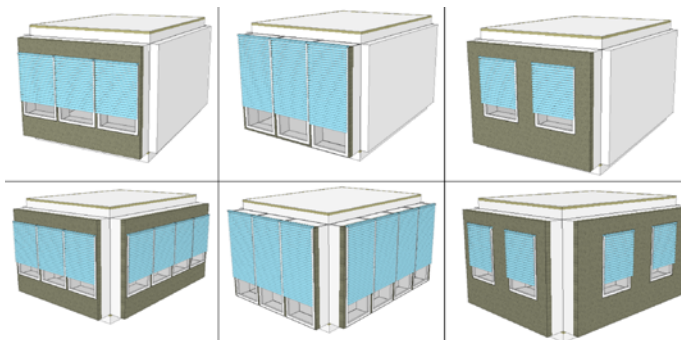
### Definition und Aufbau Gebäudesimulationsmodell

Das untersuchte Gebäudemodell orientiert sich am VDI-Mustergebäude der VDI 6009-1 und repräsentiert ein typisches Bürogebäude in Deutschland. Wie in Abbildung 22 dargestellt, wird mit dem generischen Gebäudemodell ein dreigeschossiges Bürogebäude abgebildet. Die Büroräume sind an der Ost- und Westfassade angeordnet, und für die Büroraumstrukturen wird das gängige Achsmaß von 1,35 m angewendet. Mit einer Raumbreite von drei Achsen bzw. einer Raumtiefe von vier Achsen ergibt sich eine Nettoraumfläche von 20,7 m<sup>2</sup>, was einem Zweipersonenbüro entspricht. In der Mittelzone befindet sich in jedem Geschoss ein innenliegender Kern mit Sanitärräumen, Aufzug, Abstell- und Lagerräumen. Außerdem sind an der Nordfassade der Mittelzone das Treppenhaus sowie an der Südfassade ein Pausenraum und Besprechungsraum pro Geschoss angeordnet. Die Simulationsrandbedingungen wie z. B. Nutzungszeiten, Personenbelegung, Raumkonditionen, Beleuchtung, interne Wärmequellen etc. werden nach DIN V 18599-10 für die jeweiligen Zonen definiert. Darüber hinaus werden die detaillierten Nutzungs- und Belegungsprofile nach den in der DIN V 18599-11 definierten Standardprofilen für Büroräume modelliert. Zusätzlich wird für

weitere Simulationsrandbedingungen die DIN 4108-2 wie z.B. Schwellenwert der Grenzbestrahlungsstärke zur Regelung des Sonnenschutzes herangezogen. Für die energetische Qualität der Gebäudehülle wird der im Gebäudeenergiegesetz definierte Energiestandard zugrunde gelegt. Das fiktive Gebäudesimulationsmodell befindet sich im Referenzszenario in Potsdam, und dieser Standort repräsentiert nach DIN 4108-2 die mittlere Sommerklima-Region B. Der Standort Potsdam ist auch als allgemeingültiges Referenzklima für Deutschland gültig (DIN V 18599-10, 2018).



**Abbildung 22:** Gebäudesimulationsmodell in IDA-ICE



**Abbildung 23:** Büro-Raumtypen in Abhängigkeit des Fassadentyps bzw. Fensterflächenanteils

Die Detailuntersuchungen zum thermischen Komfort auf Raumebene beziehen sich auf ein innenliegendes Büro mit West-Orientierung und auf das südwestorientierte Eckraumbüro jeweils im ersten Obergeschoss. Auf Grundlage dieser Worst-Case-Betrachtungen kann sichergestellt werden, dass bei Einhaltung der thermischen Behaglichkeit bei diesen beiden Raumtypen auch in allen anderen Räumen der thermische Komfort eingehalten wird. Die obige Abbildung 23 zeigt die sechs unterschiedlichen Ausführungen der untersuchten Büro-Raumtypen in Abhängigkeit des Fassadentyps bzw. Fensterflächenanteils.

#### **Auswahl passiver Maßnahmen und Erstellung von Parametergruppen**

Um aussagekräftige Simulationen durchführen zu können, erfolgt die umfangreiche Auswahl von passiven Maßnahmen zum sommerlichen Wärmeschutz. Resultierend ergibt sich, wie in Tabelle 6 dargestellt, eine Simulationsmatrix mit 30 Varianten, die sich in acht Parametergruppen unterteilen. Der Referenz-Basisfall charakterisiert sich durch die Varianten mit dem Index „0“ der jeweiligen Parametergruppen.

| Parametergruppe                     | Variante                                                                                                                                             |
|-------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Verglasungen<br>G                   | G0: Zwei-Scheiben-Wärmeschutzverglasung ( $U_g = 1,22 \text{ W/m}^2\text{K}$ ; $g = 0,63$ )                                                          |
|                                     | G1: Drei-Scheiben-Wärmeschutzverglasung ( $U_g = 0,61 \text{ W/m}^2\text{K}$ ; $g = 0,53$ )                                                          |
|                                     | G2: Drei-Scheiben-Sonnenschutzverglasung ( $U_g = 0,73 \text{ W/m}^2\text{K}$ ; $g = 0,29$ )                                                         |
|                                     | G3: Drei-Scheiben-Sonnenschutzverglasung+ ( $U_g = 0,71 \text{ W/m}^2\text{K}$ ; $g = 0,11$ )                                                        |
| Fensterflächenanteil<br>(FFA) F     | F0: Band-Fassade (60 % Fassaden-FFA/34 % Grundfläche Raum-FFA)                                                                                       |
|                                     | F1: Vollverglaste Fassade (93 % Fassaden-FFA/53 % Grundfläche Raum-FFA)                                                                              |
|                                     | F2: Loch-Fassade (35 % Fassaden-FFA/20 % Grundfläche Raum-FFA)                                                                                       |
| Sonnenschutz<br>S                   | S0: Außenliegender Sonnenschutz ( $F_c=0,25$ )                                                                                                       |
|                                     | S1: Innenliegender Sonnenschutz ( $F_c=0,75$ )                                                                                                       |
|                                     | S2: Fixe bauliche Verschattung (Tiefe 1,0 m)                                                                                                         |
|                                     | S3: Laibungstiefe (0,3 m)                                                                                                                            |
|                                     | S4: Ohne Sonnenschutz                                                                                                                                |
| Regelung Sonnenschutz<br>R          | R0: Grenzbestrahlungsstärke $200 \text{ W/m}^2$                                                                                                      |
|                                     | R1: Grenzbestrahlungsstärke $150 \text{ W/m}^2$                                                                                                      |
|                                     | R2: Grenzbestrahlungsstärke $100 \text{ W/m}^2$                                                                                                      |
|                                     | R3: Grenzbestrahlungsstärke $300 \text{ W/m}^2$                                                                                                      |
|                                     | R4: Sonnenschutz dauerhaft geschlossen                                                                                                               |
|                                     | R5: Sonnenschutz dauerhaft geöffnet                                                                                                                  |
| Raumhöhe<br>H                       | H0: Lichte Raumhöhe 3,00 m (Standardmaß)                                                                                                             |
|                                     | H1: Lichte Raumhöhe 3,50 m (in Anlehnung an Baumschlager-Eberle 2226)                                                                                |
|                                     | H2: Lichte Raumhöhe 2,50 m (Mindestmaß ASR 1.2)                                                                                                      |
| Bauweise<br>B                       | B0: Leichte Bauweise (mit Ausnahme Außenwand)                                                                                                        |
|                                     | B1: Schwere Bauweise                                                                                                                                 |
|                                     | B2: Doppelschaliges Mauerwerk (in Anlehnung an Baumschlager-Eberle 2226; jedoch mit außenliegendem Sonnenschutz)                                     |
|                                     | B2_S3: Doppelschaliges Mauerwerk (mit Laibungstiefe 70 cm wie bei Baumschlager-Eberle 2226 als bauliche Verschattung)                                |
| Elektrische Arbeitsgerä-<br>te<br>A | A0: $150 \text{ W/Arbeitsplatz}$ ( $15 \text{ W/m}^2$ DIN V 18599-10 „hoch“)                                                                         |
|                                     | A1: $100 \text{ W/Arbeitsplatz}$ ( $10 \text{ W/m}^2$ DIN V 18599-10 „mittel“)                                                                       |
|                                     | A2: $50 \text{ W/Arbeitsplatz}$ ( $5 \text{ W/m}^2$ DIN V 18599-10 „niedrig“)                                                                        |
|                                     | A3: $200 \text{ W/Arbeitsplatz}$ ( $20 \text{ W/m}^2$ worst-case „sehr hoch“)                                                                        |
| Lüftung<br>L                        | L0: Natürliche, manuelle Fensterlüftung (ohne Nachtlüftung)                                                                                          |
|                                     | L1: Freie manuelle Nachtlüftung mit gekippten Fenstern                                                                                               |
|                                     | L2: Freie manuelle Nachtlüftung mit Lüftungsflügeln                                                                                                  |
|                                     | L3: Freie Nachtlüftung mit automatischen Lüftungsflügeln (wie Baumschlager-Eberle 2226)                                                              |
|                                     | L4: Freie manuelle Nachtlüftung mit gekippten Fenstern als Querlüftung über Bürozonen und Flure bzw. Treppenhaus                                     |
|                                     | L5: Nutzerinnen- und Nutzerfehlverhalten „Dauer-Lüfter gekippt“: außerhalb Heizperiode dauerhaft gekippte Fenster (keine Nachtlüftung)               |
|                                     | L6: Nutzerinnen- und Nutzerfehlverhalten „Dauer-Lüfter geöffnet“: außerhalb Heizperiode dauerhaft vollständig geöffnete Fenster (keine Nachtlüftung) |
|                                     | L7: Nutzerinnen- und Nutzerfehlverhalten „Nicht-Lüfter“: außerhalb Heizperiode alle Fenster dauerhaft geschlossen (keine Nachtlüftung)               |

**Tabelle 6:** Untersuchte passive Maßnahmen

## Ergebnisse und Diskussion

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse der Gebäudesimulationen zur Wirksamkeit von passiven Maßnahmen für die drei unterschiedlichen Simulationsebenen Einzelmaßnahmen, Maßnahmenkombinationen, normativer Nachweis nach DIN 4108-2 dargestellt.

### Simulationsebene 1 „Individuelle passive Maßnahmen als Einzeluntersuchungen“

Die nachfolgende Abbildung 24 zeigt die prozentuellen Überschreitungen des adaptiven Komfortbands nach DIN EN 16798-1 in Bezug auf Kategorie II am Standort Potsdam Innenstadt. Die Prozentkriterien beziehen sich auf den Zeitraum, in dem die operative Raumtemperatur während der Anwesenheits- bzw. Nutzungszeit außerhalb der oberen Grenzwerte des adaptiven Komfortbands liegt. Bei den Simulationsergebnissen wird zwischen dem südwestorientierten Eckraumbüro (SW) und dem innenliegenden westorientierten Büro (W) unterschieden. Auf den ersten Blick wird ersichtlich, dass im Eckraumbüro mit keiner einzigen passiven Maßnahme das 1-Prozent-Kriterium eingehalten werden kann. Im Hinblick auf das innenliegende Büro erfüllt lediglich die Variante B1 (schwere Bauweise) das 1-Prozent-Kriterium. Der gleiche Sachverhalt stellt sich für das 3-Prozent-Kriterium dar, wobei hierbei mit der Variante B2 (doppelschaliges Mauerwerk) ebenfalls der Grenzwert beim Büro-West unterschritten werden kann und somit auch im Kontext der Speichermasse steht.

|       | < 1 % |   | < 3 % |   | < 5 % |   | < 10 % |   | ÜH [%] |     |
|-------|-------|---|-------|---|-------|---|--------|---|--------|-----|
|       | SW    | W | SW    | W | SW    | W | SW     | W | SW     | W   |
| Basis | x     | x | x     | x | x     | x | ✓      | ✓ | 8,3    | 7,7 |
| G1    | x     | x | x     | x | x     | x | ✓      | ✓ | 8,1    | 7,7 |
| G2    | x     | x | x     | x | x     | ✓ | ✓      | ✓ | 5,6    | 4,1 |
| G3    | x     | x | x     | x | ✓     | ✓ | ✓      | ✓ | 4,9    | 4,5 |
| F1    | x     | x | x     | x | x     | x | x      | ✓ | 10,9   | 7,7 |
| F2    | x     | x | x     | x | ✓     | ✓ | ✓      | ✓ | 4,7    | 4,7 |
| S1    | x     | x | x     | x | x     | x | x      | ✓ | 15,2   | 9,0 |
| S2    | x     | x | x     | x | x     | x | x      | ✓ | 16,7   | 9,2 |
| S3    | x     | x | x     | x | x     | x | x      | ✓ | 15,7   | 9,5 |
| S4    | x     | x | x     | x | x     | x | x      | ✓ | 17,4   | 9,7 |
| R1    | x     | x | x     | x | x     | x | ✓      | ✓ | 8,6    | 7,7 |
| R2    | x     | x | x     | x | x     | x | ✓      | ✓ | 8,7    | 7,6 |
| R3    | x     | x | x     | x | x     | x | ✓      | ✓ | 8,6    | 7,8 |
| R4    | x     | x | x     | x | x     | x | ✓      | ✓ | 8,3    | 7,7 |
| R5    | x     | x | x     | x | x     | x | x      | ✓ | 17,3   | 9,7 |

|       | < 1 % |   | < 3 % |   | < 5 % |   | < 10 % |   | ÜH [%] |      |
|-------|-------|---|-------|---|-------|---|--------|---|--------|------|
|       | SW    | W | SW    | W | SW    | W | SW     | W | SW     | W    |
| H1    | x     | x | x     | x | x     | x | ✓      | ✓ | 8,9    | 7,3  |
| H2    | x     | x | x     | x | x     | x | ✓      | ✓ | 8,2    | 7,8  |
| B1    | x     | ✓ | x     | ✓ | ✓     | ✓ | ✓      | ✓ | 4,5    | 0,9  |
| B2    | x     | x | x     | ✓ | x     | ✓ | ✓      | ✓ | 6,9    | 1,3  |
| B2_S3 | x     | x | x     | x | x     | x | ✓      | ✓ | 11,6   | 5,1  |
| A1    | x     | x | x     | x | x     | x | ✓      | ✓ | 8,4    | 7,4  |
| A2    | x     | x | x     | x | x     | x | ✓      | ✓ | 8,7    | 6,5  |
| A3    | x     | x | x     | x | x     | x | ✓      | ✓ | 8,5    | 7,9  |
| L1    | x     | x | x     | x | x     | x | ✓      | ✓ | 8,2    | 7,3  |
| L2    | x     | x | x     | x | x     | x | ✓      | ✓ | 8,3    | 7,5  |
| L3    | x     | x | x     | x | x     | x | ✓      | ✓ | 8,4    | 7,8  |
| L4    | x     | x | x     | x | x     | x | ✓      | ✓ | 7,9    | 7,4  |
| L5    | x     | x | x     | x | x     | x | x      | x | 24,0   | 15,8 |
| L6    | x     | x | x     | x | x     | x | x      | x | 16,7   | 18,7 |
| L7    | x     | x | x     | x | x     | x | x      | x | 44,7   | 45,1 |

Abbildung 24: Simulationsergebnisse für Kategorie II am Standort Potsdam Innenstadt mit TRY2045

Abbildung 25 zeigt die Simulationsergebnisse der passiven Maßnahmen in Bezug auf Kategorie III des adaptiven Komfortbands. In diesem Fall verfärbt sich die Ergebnismatrix im Vergleich zu Kategorie II erwartungsgemäß zu einem generell grüneren Bild, was bedeutet, dass die Grenzwerte von mehreren passiven Maßnahmen eingehalten werden können. Das 1-Prozent-Kriterium kann beim Eckraumbüro durch die drei passiven Maßnahmen G3 (Drei-Scheiben-Sonnenschutzverglasung+), F2 (Loch-Fassade) und B1 (Schwere Bauweise) unterschritten werden. Bei Betrachtung von Büro-West kann der Grenzwert zusätzlich von G2 (Drei-Scheiben-Sonnenschutzverglasung) und B2 erfüllt werden. Die Ergebnisse für das 3-Prozent-Kriterium im Eckraumbüro decken sich mit den gleichen fünf passiven Maßnahmen wie beim 1-Prozent-Kriterium im West-Büro. Für das Büro-West kann das 3-Prozent-Kriterium mit einer Vielzahl an Möglichkeiten realisiert und der Grenzwert mit 16 der 30 Varianten eingehalten werden.

|       | < 1 % |   | < 3 % |   | < 5 % |   | < 10 % |   | ÜH [%] |     |
|-------|-------|---|-------|---|-------|---|--------|---|--------|-----|
|       | SW    | W | SW    | W | SW    | W | SW     | W | SW     | W   |
| Basis | x     | x | x     | x | ✓     | ✓ | ✓      | ✓ | 4,2    | 3,1 |
| G1    | x     | x | x     | ✓ | ✓     | ✓ | ✓      | ✓ | 3,8    | 2,5 |
| G2    | x     | ✓ | ✓     | ✓ | ✓     | ✓ | ✓      | ✓ | 1,2    | 0,3 |
| G3    | ✓     | ✓ | ✓     | ✓ | ✓     | ✓ | ✓      | ✓ | 0,6    | 1,0 |
| F1    | x     | x | x     | x | x     | ✓ | ✓      | ✓ | 5,6    | 3,6 |
| F2    | ✓     | ✓ | ✓     | ✓ | ✓     | ✓ | ✓      | ✓ | 0,4    | 1,0 |
| S1    | x     | x | x     | x | x     | x | x      | ✓ | 11,0   | 5,4 |
| S2    | x     | x | x     | x | x     | x | x      | ✓ | 13,1   | 6,1 |
| S3    | x     | x | x     | x | x     | x | x      | ✓ | 11,7   | 5,8 |
| S4    | x     | x | x     | x | x     | x | x      | ✓ | 14,0   | 6,2 |
| R1    | x     | x | x     | ✓ | ✓     | ✓ | ✓      | ✓ | 4,0    | 2,8 |
| R2    | x     | x | x     | ✓ | ✓     | ✓ | ✓      | ✓ | 3,9    | 2,7 |
| R3    | x     | x | x     | x | ✓     | ✓ | ✓      | ✓ | 4,7    | 3,2 |
| R4    | x     | x | x     | x | ✓     | ✓ | ✓      | ✓ | 4,2    | 3,1 |
| R5    | x     | x | x     | x | x     | x | x      | ✓ | 14,0   | 6,0 |

|       | < 1 % |   | < 3 % |   | < 5 % |   | < 10 % |   | ÜH [%] |      |
|-------|-------|---|-------|---|-------|---|--------|---|--------|------|
|       | SW    | W | SW    | W | SW    | W | SW     | W | SW     | W    |
| H1    | x     | x | x     | ✓ | ✓     | ✓ | ✓      | ✓ | 4,4    | 2,6  |
| H2    | x     | x | x     | x | ✓     | ✓ | ✓      | ✓ | 4,2    | 3,3  |
| B1    | ✓     | ✓ | ✓     | ✓ | ✓     | ✓ | ✓      | ✓ | 0,2    | 0,0  |
| B2    | x     | ✓ | ✓     | ✓ | ✓     | ✓ | ✓      | ✓ | 1,3    | 0,0  |
| B2_S3 | x     | x | x     | ✓ | x     | ✓ | ✓      | ✓ | 6,7    | 1,7  |
| A1    | x     | x | x     | ✓ | ✓     | ✓ | ✓      | ✓ | 4,2    | 2,6  |
| A2    | x     | x | x     | ✓ | ✓     | ✓ | ✓      | ✓ | 4,2    | 1,8  |
| A3    | x     | x | x     | x | ✓     | ✓ | ✓      | ✓ | 4,3    | 3,3  |
| L1    | x     | x | x     | ✓ | ✓     | ✓ | ✓      | ✓ | 3,7    | 2,4  |
| L2    | x     | x | x     | ✓ | ✓     | ✓ | ✓      | ✓ | 3,8    | 2,4  |
| L3    | x     | x | x     | ✓ | ✓     | ✓ | ✓      | ✓ | 3,9    | 2,7  |
| L4    | x     | x | x     | ✓ | ✓     | ✓ | ✓      | ✓ | 3,5    | 2,1  |
| L5    | x     | x | x     | x | x     | x | x      | ✓ | 16,0   | 8,6  |
| L6    | x     | x | x     | x | x     | x | x      | x | 10,0   | 11,2 |
| L7    | x     | x | x     | x | x     | x | x      | x | 42,6   | 43,3 |

Abbildung 25: Simulationsergebnisse für Kategorie III am Standort Potsdam Innenstadt mit TRY2045

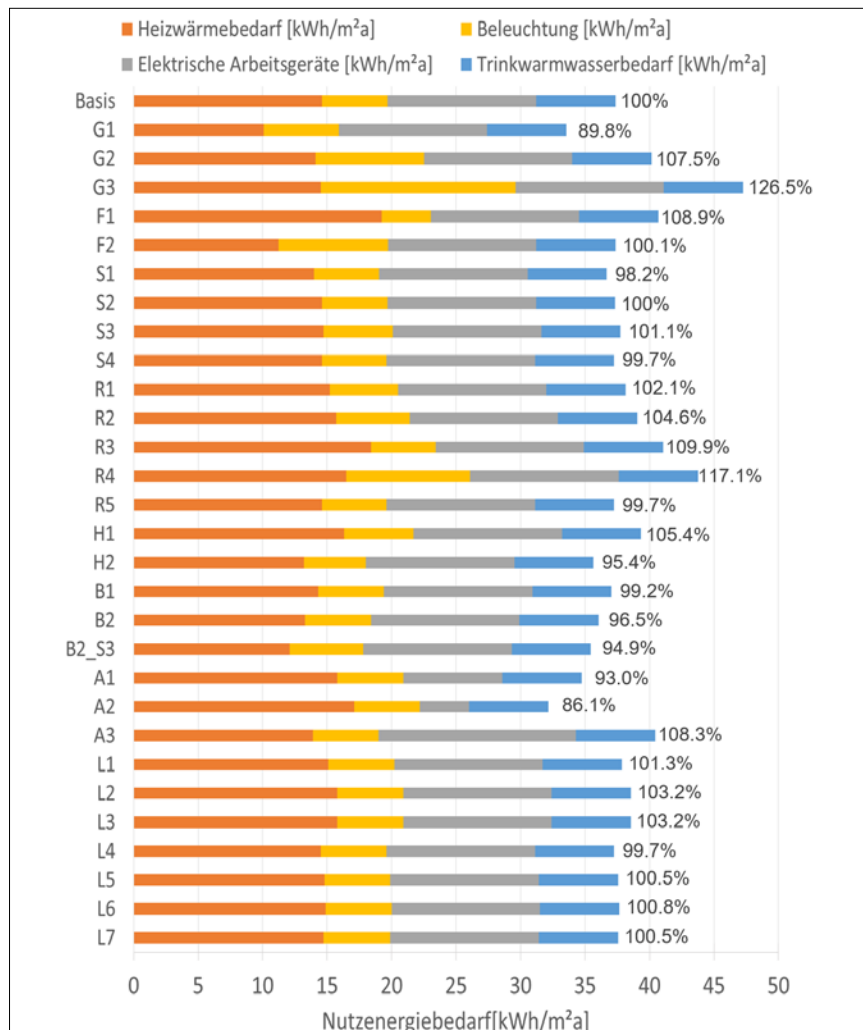
In der nachfolgenden Abbildung 26 werden die Auswirkungen der Standortveränderungen dargestellt. Abbildung 26 zeigt die Simulationsergebnisse der passiven Maßnahmen für die Sommerklimaregion C mit dem Standort Mannheim Innenstadt. Hierbei kann in Bezug auf die Kategorie III mit keiner Variante das 1-Prozent-Kriterium erreicht werden. Das 3-Prozent-Kriterium kann für das Eckraumbüro mit den vier passiven Maßnahmen G3, F2, B1 und B2 erfüllt werden. Bei Betrachtung des Büro-West erweitern sich die Möglichkeiten um die passiven Maßnahmen G2 und A2 (niedrige interne Lasten) sowie die unpraktikable Maßnahme R4 (Sonnenschutz dauerhaft geschlossen).

|       | < 1 % |   | < 3 % |   | < 5 % |   | < 10 % |   | ÜH [%] |     |
|-------|-------|---|-------|---|-------|---|--------|---|--------|-----|
|       | SW    | W | SW    | W | SW    | W | SW     | W | SW     | W   |
| Basis | x     | x | x     | x | x     | ✓ | ✓      | ✓ | 6,5    | 4,3 |
| G1    | x     | x | x     | x | x     | ✓ | ✓      | ✓ | 5,9    | 3,2 |
| G2    | x     | x | x     | ✓ | ✓     | ✓ | ✓      | ✓ | 3,2    | 1,5 |
| G3    | x     | x | ✓     | ✓ | ✓     | ✓ | ✓      | ✓ | 2,4    | 1,5 |
| F1    | x     | x | x     | x | x     | x | ✓      | ✓ | 9,4    | 5,7 |
| F2    | x     | x | ✓     | ✓ | ✓     | ✓ | ✓      | ✓ | 1,6    | 1,5 |
| S1    | x     | x | x     | x | x     | x | x      | ✓ | 15,0   | 7,7 |
| S2    | x     | x | x     | x | x     | x | x      | ✓ | 17,4   | 8,5 |
| S3    | x     | x | x     | x | x     | x | x      | ✓ | 15,5   | 8,1 |
| S4    | x     | x | x     | x | x     | x | x      | ✓ | 18,3   | 8,9 |
| R1    | x     | x | x     | x | x     | ✓ | ✓      | ✓ | 6,2    | 3,7 |
| R2    | x     | x | x     | x | x     | ✓ | ✓      | ✓ | 6,2    | 3,6 |
| R3    | x     | x | x     | x | x     | ✓ | ✓      | ✓ | 7,2    | 4,1 |
| R4    | x     | x | x     | ✓ | ✓     | ✓ | ✓      | ✓ | 4,9    | 2,5 |
| R5    | x     | x | x     | x | x     | x | x      | ✓ | 18,4   | 8,9 |

|       | < 1 % |   | < 3 % |   | < 5 % |   | < 10 % |   | ÜH [%] |      |
|-------|-------|---|-------|---|-------|---|--------|---|--------|------|
|       | SW    | W | SW    | W | SW    | W | SW     | W | SW     | W    |
| H1    | x     | x | x     | x | x     | ✓ | ✓      | ✓ | 6,1    | 3,3  |
| H2    | x     | x | x     | x | x     | ✓ | ✓      | ✓ | 6,8    | 4,6  |
| B1    | x     | x | ✓     | ✓ | ✓     | ✓ | ✓      | ✓ | 2,0    | 1,2  |
| B2    | x     | x | ✓     | ✓ | ✓     | ✓ | ✓      | ✓ | 3,0    | 1,2  |
| B2_S3 | x     | x | x     | x | x     | ✓ | x      | ✓ | 11,0   | 3,4  |
| A1    | x     | x | x     | x | x     | ✓ | ✓      | ✓ | 6,4    | 3,4  |
| A2    | x     | x | x     | ✓ | x     | ✓ | ✓      | ✓ | 6,1    | 2,6  |
| A3    | x     | x | x     | x | x     | ✓ | ✓      | ✓ | 6,4    | 4,3  |
| L1    | x     | x | x     | x | x     | ✓ | ✓      | ✓ | 5,4    | 3,1  |
| L2    | x     | x | x     | x | x     | ✓ | ✓      | ✓ | 5,6    | 3,9  |
| L3    | x     | x | x     | x | x     | ✓ | ✓      | ✓ | 5,8    | 5,8  |
| L4    | x     | x | x     | x | ✓     | ✓ | ✓      | ✓ | 4,9    | 4,9  |
| L5    | x     | x | x     | x | x     | x | x      | x | 26,7   | 26,7 |
| L6    | x     | x | x     | x | x     | x | ✓      | ✓ | 8,6    | 8,6  |
| L7    | x     | x | x     | x | x     | x | x      | x | 43,4   | 43,4 |

**Abbildung 26:** Simulationsergebnisse für Kategorie III am Standort Mannheim Innenstadt mit TRY2045

Mithilfe der Gebäudesimulationen wird neben der thermischen Behaglichkeit auch der Energiebedarf untersucht. Dadurch können die Wechselwirkungen zwischen thermischem Komfort und Energiebedarf evaluiert und analysiert werden. Als Zielgröße dient der Nutzenergiebedarf NEB; dieser wird durch die vier Energieströme Heizwärmebedarf, Beleuchtungsenergiebedarf, Nutzerstrom und Trinkwarmwasserbedarf dargestellt (siehe Abbildung 27). Der mit dezentralen Durchlauferhitzern bereitgestellte Trinkwarmwasserbedarf verändert sich in keiner Variante und wird lediglich aus Gründen der Vollständigkeit angeführt. Der Nutzerstrom wird ausschließlich von der Parametergruppe A „Elektrische Arbeitsgeräte“ beeinflusst und weist in den restlichen Varianten einen konstanten Wert auf. Für den Variantenvergleich entspricht der Basisfall mit 37,3 kWh/m<sup>2</sup>a der Referenz von 100%, und demzufolge resultieren die Veränderungen der passiven Maßnahmen in einem energetischen Mehrbedarf oder energetischen Minderbedarf.

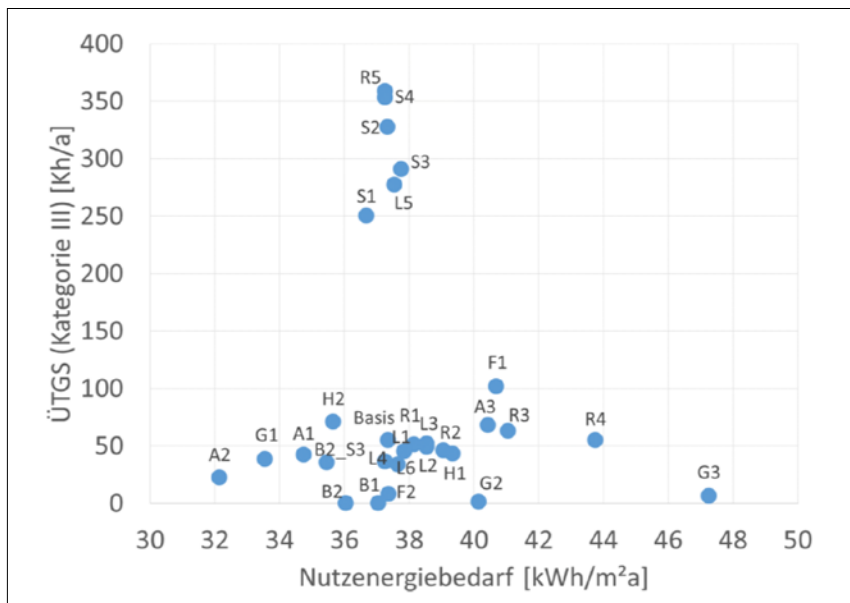


**Abbildung 27:** Nutzenergiebedarf in Abhängigkeit der einzelnen Energieströme (Standort Potsdam)

Der größte energetische Mehrbedarf wird durch die Variante G3 (Drei-Scheiben-Sonnenschutzverglasung+) verursacht. In diesem Fall übersteigt der Nutzenergiebedarf den Basisfall um 26,5 %, was auf den verdreifachten Beleuchtungsenergiebedarf infolge des niedrigen g-Werts zurückzuführen ist. Der zweitgrößte energetische Mehrbedarf wird durch den dauerhaft geschlossenen Sonnenschutz (R4) verursacht, wodurch der Beleuchtungsenergiebedarf ebenfalls stark ansteigt und sich in einem um circa 17 % erhöhten Nutzenergiebedarf niederschlägt. Durch den Austausch der Zwei-Scheiben-Wärmeschutzverglasung (Basis G0) durch eine Drei-Scheiben-Wärmeschutzverglasung (G1) verringert sich der Heizwärmebedarf deutlich, was in einem um circa 10 % geringeren Nutzenergiebedarf resultiert. Bei Betrachtung der unterschiedlichen Fensterflächenanteile wird die Wechselwirkung zwischen Heizwärmebedarf und Beleuchtungsenergiebedarf ersichtlich. Die Vollverglasung (F1) führt zu einem deutlich erhöhten Heizwärmebedarf bei geringerem Beleuchtungsenergiebedarf und folglich zu einem um circa 9 % erhöhten Nutzenergiebedarf. Die gegenläufige Entwicklung ist bei der Loch-Fassade (F2) feststellbar, hierbei reduziert sich der Heizwärmebedarf bei steigendem Beleuchtungsenergiebedarf, was letztendlich zu einem gleichbleibenden

Nutzenergiebedarf führt. Durch die minimierte elektrische Anschlussleistung der Büroarbeitsgeräte (A2) kann der Nutzerstrom deutlich reduziert werden, wodurch ein um circa 14% geringerer Nutzenergiebedarf erreicht wird. Im Gegensatz dazu führt die erhöhte elektrische Anschlussleistung (A3) der Büroarbeitsgeräte zu einem energetischen Mehrbedarf von circa 8%.

In der nachfolgenden Abbildung 28 werden die Simulationsergebnisse des thermischen Komforts bzw. des Energiebedarfs gegenübergestellt und mittels Streudiagramm zusammengefasst. Ausgehend vom Basisfall ergibt sich für jede passive Maßnahme eine Richtungsveränderung. Im Idealfall liegt der Zustandspunkt einer passiven Maßnahme im Diagramm links unten. Das würde bedeuten, dass mit der passiven Maßnahme ein deutlich geringerer Energiebedarf bei gleichzeitig verbessertem thermischen Komfort in Form von reduzierten Übertemperaturgradstunden erreicht wird.



**Abbildung 28:** Streudiagramm der Zielgrößen für thermischen Komfort und Energiebedarf (Büro-West, Standort Potsdam Innenstadt, TRY2045)

Auf Grundlage des Streudiagramms können folgende Varianten abgeleitet werden, die im Vergleich zum Basisfall zu einer Verbesserung der thermischen Behaglichkeit in Form von reduzierten Übertemperaturgradstunden führen. In diesem Zusammenhang sei darauf verwiesen, dass aufgrund des außenliegenden Sonnenschutzes (S0) bereits im Basisfall mit 55 Kh/a eine geringe Anzahl an Übertemperaturgradstunden erreicht wird. Darüber hinaus werden die Auswirkungen der passiven Maßnahmen auf den Energiebedarf in Form eines energetischen Mehr- (+) oder Minderbedarfs (-) in Tabelle 7 angeführt.

| Rang | Variante | Übertemperatur-<br>gradstunden [Kh/a] | Rang | Variante | Abweichung<br>Nutzenergiebedarf [%] |
|------|----------|---------------------------------------|------|----------|-------------------------------------|
| 1    | B1       | 0                                     | 1    | A2       | - 13,9                              |
| 2    | B2       | 0                                     | 2    | G1       | - 10,2                              |
| 3    | G3       | 3                                     | 3    | A1       | - 7,0                               |
| 4    | G2       | 5                                     | 4    | B2_S3    | - 5,1                               |
| 5    | F2       | 8                                     | 5    | H2       | - 4,6                               |
| 6    | A2       | 22                                    | 6    | B2       | - 3,5                               |
| 7    | L6       | 34                                    | 7    | S1       | - 1,8                               |
| 8    | B2_S3    | 35                                    | 8    | B1       | - 0,8                               |
| 9    | L4       | 36                                    | 9    | L4       | - 0,3                               |
| 10   | G1       | 38                                    | 10   | F2       | + 0,1                               |
| 11   | A1       | 42                                    | 11   | L6       | + 0,8                               |
| 12   | H1       | 43                                    | 12   | L1       | + 1,3                               |
| 13   | L1       | 45                                    | 13   | L2/L3    | + 3,2                               |
| 14   | R2       | 46                                    | 14   | R2       | + 4,6                               |
| 15   | L2       | 49                                    | 15   | H1       | + 5,4                               |
| 16   | R1       | 51                                    | 16   | G2       | + 7,5                               |
| 17   | L3       | 52                                    | 17   | G3       | + 26,5                              |

**Tabelle 7:** Passive Maßnahmen mit verbessertem thermischen Komfort im Vergleich zum Basisfall

### Simulationsebene 2 „Kombinationen passiver Maßnahmen“

Auf Grundlage von Simulationsebene 1 erfolgt die Zusammenstellung und Simulation der Maßnahmenkombination (MK). Die Auswahl der passiven Maßnahmen fokussiert sich sowohl auf die verbesserte thermische Behaglichkeit als auch auf einen reduzierten Energiebedarf. Darüber hinaus wird bei der Auswahl ebenso die praktikable Umsetzung und einfache Anwendbarkeit der jeweiligen Maßnahme berücksichtigt. Dementsprechend wird bei den unterschiedlichen Nachtlüftungsstrategien die Variante mit freier manueller Nachtlüftung durch gekippte Fenster (L1) ausgewählt. Aufgrund der Tatsache, dass die Sonnenschutzverglasungen (G2, G3) zu einem stark erhöhten Energiebedarf führen, werden diese in den Maßnahmenkombinationen nicht implementiert. Resultierend erfolgt die Untersuchung von vier verschiedenen Maßnahmenkombinationen in Abhängigkeit aller Fassadentypen (F0, F1, F2) und den beiden Raumtypen (W & SW). Die Simulation für die Maßnahmenkombinationen zweite am Standort Mannheim Innenstadt mit dem Wetterdatensatz TRY 2045x durchgeführt. Infolge der Kombination aus dem Standort für die Sommerklimaregion C mit dem Zukunftswetterdatensatz und der Berücksichtigung des innerstädtischen Wärmeinselleffekts entsprechen die klimatischen Randbedingungen einem Worst-Case-Szenario, und somit unterliegen die passiven Maßnahmen den härtesten Anforderungen.

Bei der ersten Maßnahmenkombination werden ein außenliegender Sonnenschutz (S0), Drei-Scheiben-Wärmeschutzverglasung (G1), schwere Bauweise (B1) und die freie manuelle Nachtlüftung mit gekipptem Fenster (L1) kombiniert. Wie in Abbildung 29 ersichtlich, können dadurch im Büro-West mit Band-Fassade (F0) sowohl für Kategorie II als auch Kategorie III alle Prozentkriterien eingehalten werden. Im Eckraumbüro können bis auf das 1-Prozent-Kriterium in Bezug auf die Kategorie II ebenfalls alle Grenz-

werte eingehalten werden. In Hinblick auf den Nutzenergiebedarf führt S0/G1/B1/L1 im Vergleich zum Basisfall zu einer Energieeinsparung von 20 % und reduziert sich auf 29,6 kWh/m<sup>2</sup>a. Bei Betrachtung der vollverglasten Fassade (F1) mit der Maßnahmenkombination stellt sich beim Büro-West das gleiche Bild wie im Eckraumbüro mit Band-Fassade dar. Demzufolge kann trotz der Kombination bei Vollverglasung das 1-Prozent-Kriterium für die Kategorie II nicht erfüllt werden. Das Eckraumbüro mit Vollverglasung stellt sich am kritischsten dar; in diesem Fall kann in Bezug auf die Kategorie II weder das 1-, noch das 3- oder das 5-Prozent-Kriterium unterschritten werden. Im Umkehrschluss kann bei einer vollverglasten Fassade trotz der Maßnahmenkombination erst das 10-Prozent-Kriterium für die Kategorie II erfüllt werden. Bei Betrachtung der Kategorie III können mit S0/G1/B1/L1 beim Eckraumbüro bis auf das 1-Prozent-Kriterium alle Grenzwerte eingehalten werden. Der Nutzenergiebedarf ist nahezu unverändert zur Band-Fassade, und die Energieeinsparung quantifiziert sich gegenüber dem Basisfall ebenfalls auf circa 20 %. Bei der Loch-Fassade (F2) können mithilfe der Kombination für beide Raumtypen alle Prozentkriterien eingehalten werden. Darüber hinaus wird bei der Loch-Fassade eine Energieeinsparung gegenüber der Referenzvariante von circa 12 % erreicht.

| S0+G1+B1+L1 | ÜH < 1 % |          | ÜH < 3 % |          | ÜH < 5 % |          | ÜH < 10 % |          | Simulationsergebnisse |                 |                            |
|-------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|-----------|----------|-----------------------|-----------------|----------------------------|
|             | Kat. II  | Kat. III | Kat. II  | Kat. III | Kat. II  | Kat. III | Kat. II   | Kat. III | ÜH Kat. II [%]        | ÜH Kat. III [%] | NEB [kWh/m <sup>2</sup> a] |
| F0_W        | ✓        | ✓        | ✓        | ✓        | ✓        | ✓        | ✓         | ✓        | 0,5                   | 0,0             | 29,6                       |
| F0_SW       | X        | ✓        | ✓        | ✓        | ✓        | ✓        | ✓         | ✓        | 3,0                   | 0,1             |                            |
| F1_W        | X        | ✓        | ✓        | ✓        | ✓        | ✓        | ✓         | ✓        | 2,0                   | 0,1             | 30,0                       |
| F1_SW       | X        | X        | X        | ✓        | X        | ✓        | ✓         | ✓        | 7,6                   | 3,0             |                            |
| F2_W        | ✓        | ✓        | ✓        | ✓        | ✓        | ✓        | ✓         | ✓        | 0,0                   | 0,0             | 33,0                       |
| F2_SW       | ✓        | ✓        | ✓        | ✓        | ✓        | ✓        | ✓         | ✓        | 0,3                   | 0,0             |                            |

**Abbildung 29:** Simulationsergebnisse Maßnahmenkombination 1 bzw. Maßnahmenkombination 2

Die zweite Maßnahmenkombination setzt sich ebenfalls aus S0/G1/B1/L1 zusammen und wird zusätzlich um A2 erweitert. Dadurch wird der Einfluss von reduzierten internen Lasten der elektrischen Arbeitsgeräte in Form von Sensitivitätsanalysen untersucht. Die Maßnahmenkombination S0/G1/B1/L1/A2 führt für die prozentuellen Überschreitungen des adaptiven Komfortbands nur zu geringfügigen Veränderungen in den Simulationsergebnissen und letztendlich zu dem gleichen Ergebnisbild wie bei Kombination 1 (siehe Abbildung 29). Der Nutzenergiebedarf verringert sich sowohl bei Band-Fassade als auch bei vollverglaster Fassade um circa 35 % gegenüber der Ausgangsvariante und liegt bei 23,9 kWh/m<sup>2</sup>a (F0) bzw. 24,2 kWh/m<sup>2</sup>a (F1). Bei der Loch-Fassade (F2) fällt die Energieeinsparung mit 25 % um 10 Prozentpunkte geringer aus, und der Nutzenergiebedarf beziffert sich hierbei auf 27,9 kWh/m<sup>2</sup>a.

Auf Grundlage der dritten Maßnahmenkombination wird anstelle einer schweren Bauweise (B1) der Einfluss bzw. die Sensitivität einer leichten Bauweise (B0) untersucht. Wie in Abbildung 30 dargestellt, führt die Veränderung von B1 zu B0 zu einer deutlichen Abweichung in den Simulationsergebnissen. Bei der Band-Fassade (F0) können beide Raumtypen in Bezug auf die Kategorie II ausschließlich das 10-Prozent-Kriterium einhalten. Hinsichtlich der Kategorie III kann im Büro-West das 3-Prozent-Kriterium und beim Eckraumbüro das 5-Prozent-Kriterium erreicht werden. Der Nutzenergiebedarf reduziert sich bei der Band-Fassade um 17 % gegenüber dem Basisfall und beziffert sich auf 31,0 kWh/m<sup>2</sup>a. Bei Betrachtung der vollverglasten Fassade (F1)

wird ersichtlich, dass ohne Speichermasse im Eckraumbüro nur das 10-Prozent-Kriterium für Kategorie III erreicht werden kann. Im Büro-West kann für Kategorie III das 5-Prozent-Kriterium und für Kategorie II das 10-Prozent-Kriterium erfüllt werden. Der Nutzenergiebedarf bei der Vollverglasung liegt bei 31,6 kWh/m<sup>2</sup>a und bedeutet eine Energieeinsparung von 15 %. Mit der Loch-Fassade (F2) kann für die Kategorie II trotz der reduzierten thermischen Speichermasse das 5-Prozent-Kriterium erreicht werden. In Bezug auf die Kategorie III kann mit der Loch-Fassade sogar das 1-Prozent-Kriterium realisiert werden, und mit 34,1 kWh/m<sup>2</sup>a unterschreitet der Nutzenergiebedarf den der Basisvariante um circa 9 %.

| S0+G1+B0+L1 | ÜH < 1 % |          | ÜH < 3 % |          | ÜH < 5 % |          | ÜH < 10 % |          | Simulationsergebnisse |                 |                            |
|-------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|-----------|----------|-----------------------|-----------------|----------------------------|
|             | Kat. II  | Kat. III | Kat. II  | Kat. III | Kat. II  | Kat. III | Kat. II   | Kat. III | ÜH Kat. II [%]        | ÜH Kat. III [%] | NEB [kWh/m <sup>2</sup> a] |
| F0_W        | X        | X        | X        | ✓        | X        | ✓        | ✓         | ✓        | 7,4                   | 1,8             | 31,0                       |
| F0_SW       | X        | X        | X        | X        | X        | ✓        | ✓         | ✓        | 8,7                   | 4,2             |                            |
| F1_W        | X        | X        | X        | X        | X        | ✓        | ✓         | ✓        | 7,6                   | 3,7             | 31,6                       |
| F1_SW       | X        | X        | X        | X        | X        | X        | X         | ✓        | 10,3                  | 6,1             |                            |
| F2_W        | X        | ✓        | X        | ✓        | ✓        | ✓        | ✓         | ✓        | 4,6                   | 0,6             | 34,1                       |
| F2_SW       | X        | ✓        | X        | ✓        | ✓        | ✓        | ✓         | ✓        | 3,7                   | 0,5             |                            |

**Abbildung 30:** Simulationsergebnisse Maßnahmenkombination 3 bzw. Maßnahmenkombination 4

Mit der vierten Maßnahmenkombination erfolgen Sensitivitätsanalysen von Bauweise und Verglasungsart. Im Unterschied zur ersten Kombination wird sowohl die leichte Bauweise (B0) als auch die Zwei-Scheiben-Wärmeschutzverglasung (G0) angewendet. Die Maßnahmenkombination S0/G0/B0/L1 führt für die prozentuellen Überschreitungen des adaptiven Komfortbands nur zu geringfügigen Veränderungen in den Simulationsergebnissen und letztendlich zu dem gleichen Bild wie bei Kombination 3 (siehe Abbildung 30). Demzufolge hat der Austausch von G1 durch G0 nur Auswirkungen auf den Nutzenergiebedarf. Bei der Band-Fassade (F0) beträgt der Nutzenergiebedarf 33,8 kWh/m<sup>2</sup>a und führt im Vergleich zur Referenz zu einem energetischen Minderbedarf von 9 %. Die vollverglaste Fassade (F1) bewirkt gegenüber der Referenz eine Energieeinsparung von 3 %, und der Nutzenergiebedarf beziffert sich hierbei auf 36,0 kWh/m<sup>2</sup>a. Die Energieeinsparung bei der Loch-Fassade (F2) quantifiziert sich mit 34,9 kWh/m<sup>2</sup>a auf circa 6 %.

### Simulationsebene 3 „Normativer Nachweis DIN 4108-2 für Maßnahmenkombinationen“

In der dritten Simulationsebene wird der normative Nachweis für den baurechtlichen Mindeststandard nach DIN 4108-2 geführt. Zur Einhaltung der DIN 4108-2 dürfen bei Nichtwohngebäuden die Übertemperaturgradstunden den Maximalwert von 500 Kh/a nicht überschreiten. Die Simulationen werden für den Standort Mannheim Innenstadt durchgeführt und entsprechen somit der Sommerklimaregion C, wodurch sich nach DIN 4108-2 der Bezugswert für die operative Temperatur auf 27,0 °C bezieht.

Mithilfe der ersten Maßnahmenkombination S0/G1/B1/L1 kann, wie in Abbildung 31 ersichtlich, der normative Grenzwert von 500 Kh/a bis auf das vollverglaste Eckraumbüro (F1\_SW) bei allen Fassaden- bzw. Raumtypen deutlich unterschritten werden. Aufgrund der Tatsache, dass in der Normberechnung nach DIN 4108-2 die internen Wärmelasten mit 144 Wh/m<sup>2</sup>d exakt definiert sind, ist die Nachweisführung für die zweite Maßnahmenkombination mit veränderten bzw. reduzierten internen Lasten

obsolet. Bei der dritten Maßnahmenkombination S0/G1/B0/L1 kann die normative Anforderung von 500 Kh/a nur bei drei Raumtypen eingehalten werden. Hierzu zählen das Büro-West mit Band-Fassade (F0\_W) und beide Raumtypen mit Loch-Fassade (F2\_W, F2\_SW). Weder für das Eckraumbüro mit Band-Fassade (F0\_SW) noch für die beiden Raumtypen mit Vollverglasung (F1\_W, F1\_SW) kann der Nachweis zum sommerlichen Wärmeschutz nach DIN 4108-2 erbracht werden. Durch den Vergleich zwischen der ersten und der dritten Kombination wird der Einfluss der Speichermasse deutlich ersichtlich. Während das Eckraumbüro mit Band-Fassade (F0\_SW) und das Büro-West mit Vollverglasung (F1\_W) den Norm-Grenzwert bei der ersten Maßnahmenkombination mit Speichermasse noch deutlich unterschritten, ist dies ohne die Speichermasse bei der dritten Kombination nicht mehr möglich und resultiert in einer signifikanten Erhöhung der Übertemperaturgradstunden um den Faktor 5. Außerdem wird ersichtlich, dass sich die Übertemperaturgradstunden beim vollverglasten Eckraumbüro (F1\_SW) um circa den Faktor 3 drastisch erhöhen. Die vierte Maßnahmenkombination führt bei den beiden Raumtypen mit Band-Fassade (F0\_W, F0\_SW) und Vollverglasung (F1\_W, F1\_SW) zu einer weiteren Erhöhung der Übertemperaturgradstunden. Nichtsdestotrotz kann bei Büro-West mit Band-Fassade (F0\_W) nach wie vor der Grenzwert zum sommerlichen Wärmeschutz auch ohne Speichermasse (B1) und Drei-Scheiben-Wärmeschutzverglasung (G1) eingehalten werden. In Hinblick auf die Loch-Fassade (F2\_W, F2\_SW) sind keine Veränderungen bei den Übertemperaturgradstunden feststellbar, und demzufolge kann hierfür der positive Nachweis zum sommerlichen Wärmeschutz problemlos erbracht werden.

|                      | ÜTGS [Kh/a] |       |      |       |      |       |
|----------------------|-------------|-------|------|-------|------|-------|
|                      | F0_W        | F0_SW | F1_W | F1_SW | F2_W | F2_SW |
| MK 1: S0+G1+B1+L1    | 1           | 140   | 103  | 644   | 0    | 1     |
| MK 2: S0+G1+B1+L1+A2 | -           | -     | -    | -     | -    | -     |
| MK 3: S0+G1+B0+L1    | 188         | 670   | 569  | 1885  | 60   | 159   |
| MK 4: S0+G0+B0+L1    | 278         | 839   | 742  | 2063  | 60   | 159   |

**Abbildung 31:** Simulationsergebnisse normativer Nachweis sommerlicher Wärmeschutz nach DIN 4108-2

## Zusammenfassung und Fazit

Die Folgen des Klimawandels mit steigenden Außenlufttemperaturen und zunehmenden Hitzeperioden haben auch zahlreiche negative Auswirkungen auf Gebäude. Im Gebäudebereich reichen die Auswirkungen der klimatischen Veränderungen von Komforteinbußen der Nutzerinnen und Nutzer über ernste gesundheitliche Beeinträchtigungen bis hin zu einem steigenden Energieverbrauch für die Kühlung von Gebäuden. In der Konsequenz gewinnt der sommerliche Wärmeschutz von Gebäuden aufgrund des Klimawandels immer mehr an Bedeutung und wird zukünftig eine noch größere Rolle einnehmen. Im Rahmen dieser Arbeit wurde die Wirksamkeit von passiven Maßnahmen zum sommerlichen Wärmeschutz untersucht. Durch die Vielzahl an umfangreichen simulationstechnischen Untersuchungen konnte die Evidenz erbracht werden, dass auch in Zukunft (TRY 2045x) mithilfe von passiven Maßnahmen der thermische Sommerkomfort in Gebäuden in Bezug auf das adaptive Komfortband nach DIN EN 16798-1 ohne maschinelle Kühlung realisiert werden kann. Nichtsdestotrotz hat sich auf Grundlage der zahlreichen Gebäudesimulationen jedoch auch der nega-

tive Aspekt herausgestellt, dass infolge des Klimawandels zukünftig der thermische Sommerkomfort nicht bei allen Raum- bzw. Fassadentypen zu 100 % über die gesamte Anwesenheits- bzw. Nutzungszeit eingehalten werden kann. In diesem Kontext bedarf es der Definition einer maximal zulässigen Überschreitungshäufigkeit, wie sie bereits in der Vorgängernorm DIN EN 15251 mit 3 % (bzw. 5 % ) enthalten war und auch von aktuellen Forschungsarbeiten [Maas 2024] gefordert bzw. ebenfalls mit 3 % vorgeschlagen wird. Zum Erreichen des thermischen Sommerkomforts über den gesamten Anwesenheitszeitraum ist die konsequente Umsetzung von passiven Maßnahmen bzw. Maßnahmenkombinationen zum sommerlichen Wärmeschutz erforderlich. Als wirksamste passive Maßnahmen – unter Berücksichtigung eines möglichst geringen Energiebedarfs – lassen sich folgende planerische bzw. architektonische Gestaltungsmerkmale anführen: reduzierte Fensterflächenanteile (Vollverglasung vermeiden!), außenliegender Sonnenschutz, Speichermasse und Nachtlüftung. Darüber hinaus ist der Einsatz von energieeffizienten Arbeitsgeräten zu erwähnen, welche durch die reduzierten internen Lasten einen doppelten Vorteil und Nutzen mit sich bringen. Einerseits kann dadurch der thermische Komfort positiv beeinflusst werden, und andererseits können erhebliche Energieeinsparungen realisiert werden. Der doppelte Nutzen lässt sich auch bei der Speichermasse feststellen, da hierbei neben dem verbesserten thermischen Komfort ebenfalls Energieeinsparungen erreicht werden können. In Hinblick auf Sonnenschutzverglasungen sei darauf hingewiesen, dass sich diese ebenfalls als eine wirksame passive Maßnahme für den sommerlichen Wärmeschutz darstellen, jedoch mit einem erheblichen energetischen Mehrbedarf durch den steigenden Beleuchtungsenergiebedarf verbunden sind und dementsprechend die anderen genannten passiven Maßnahmen bevorzugt zum Einsatz kommen sollten. Resultierend müssen zum Erreichen eines klimaneutralen Gebäudebestands bis 2045 primär bauliche statt technische Lösungen zur Einhaltung des sommerlichen Wärmeschutzes umgesetzt werden, um damit den Ressourcenverbrauch im Gebäudebetrieb zu minimieren sowie die CO<sub>2</sub>-Emissionen zu reduzieren und den thermischen Sommerkomfort zu maximieren.

## **Simulationen Detail-Parametervariation-Cluster SC2**

Für die Neuformulierung der Klimarichtlinie wird vorgeschlagen, Gebäude in

- Typ A: Gebäude mit Nutzerinnen- und Nutzereinfluss
- Typ B: Gebäude ohne Nutzerinnen- und Nutzereinfluss

einzuteilen. Damit wird der Gebäudetyp nicht über die technische Gebäudeausrüstung („maschinell gekühlt“ oder „natürlich belüftet“), sondern über die Erwartungshaltung und den Einfluss der Nutzerinnen und Nutzer (effektiver Nutzerinnen- und Nutzereinfluss und Möglichkeit zur thermischen Adaption) definiert. Aus der Definition des Nutzerinnen- und Nutzereinflusses ergibt sich dann das anzuwendende Behaglichkeitsmodell.

Bei den folgenden Vorschlägen wird zwischen unterschiedlichen Betriebsweisen differenziert:

**A.1 Free Running:**

Das Gebäude wird weder aktiv beheizt/befeuchtet noch gekühlt/entfeuchtet. Raumtemperaturen und -feuchten ergeben sich aus „natürlichen“ Wärmeflüssen und Speichermassen.

**A.2 Hybridsysteme:**

Aktive Heiz-/Befeuchtungs- und Kühl-/Entfeuchtungssysteme sind vorhanden, können allerdings die Sollwerte nicht einhalten (z. B. Zuluftkonditionierung ohne Sollwert-Dimensionierung).

**B.1 Aktiv konditioniert:**

Maximale und minimale Raumtemperaturen und -feuchten werden vorgegeben und aktive Heiz-/Befeuchtungs- und Kühl-/Entfeuchtungssysteme entsprechend den Sollwerten dimensioniert.

## **Gebäude Typ A**

### **Typ A.1 – Free Running**

In Gebäuden des Typs A können die Fenster geöffnet werden, Nutzerinnen und Nutzer können ihre Bekleidung anpassen, und bei größeren Eingriffen in die thermische Gebäudehülle bzw. -technik inklusive Regelung werden diese professionell an die Nutzerinnen und Nutzer kommuniziert.

**Nachweis:**

Adaptives Komfortmodell laut 16798-1, Anhang B2.2 (alternativ ATHB-Mischmodell für Grenzkurve):

- Kategorie II darf maximal zu 3 % der Betriebszeiten überschritten werden ( $\leq 3,49\%$ ). Zu addieren sind Unterschreitungen in der Kühlperiode, die unter  $20^\circ\text{C}$  liegen.
- Es muss jedenfalls das Mindestmaßpaket Paket „sommerliche Effizienz“ erfüllt sein (Sonnenschutz, solare Lasten, innere Lasten)!
- Nationaler Anhang DIN ist nicht anzuwenden, da keine wissenschaftliche Evidenz erkennbar bzw. dokumentiert!

Aus den Parametersimulationen ergeben sich bei Varianten mit circa 3 % Überschreitung der Klasse II unter ungünstigen Bedingungen bis zu 1,5 K Überschreitung (leichte Bauweise). Mit lokalen Ventilatoren, die von den Benutzerinnen und Benutzern gesteuert werden können, ist bei Berücksichtigung von maximal 0,8 m/s („Blätter auf dem Schreibtisch können wegfliegen“) eine Reduktion um 1,5 K der empfundenen Temperatur möglich (siehe Tabelle unten aus EN 16798-1). Bei massiveren Bauweisen liegen die Temperaturintervalle der Überschreitungen deutlich darunter.

Es sind ausschließlich Ventilatoren der Energieeffizienzklasse A zu verwenden. Der Energieaufwand ist bilanziell bei der Auslegung der PV-Anlage zu berücksichtigen.

Für die Modellierung wird von folgender Voraussetzung für Typ A.1 ausgegangen:

- Öffnungen müssen sicher und schlagregensicher ausgeführt sein
- Es müssen der tatsächliche freie Lüftungsquerschnitt und Höhe angesetzt werden
- Der Winddruck wird vernachlässigt
- Wenn über den Gang, Atrien, Stiegenhäuser eine Querlüftung bzw. Lüftung über mehrere Geschosse ausgeführt ist, können Zuschlagfaktoren aus Simulation TUM Gesamtgebäude herangezogen werden
- Für Nachweis: Typ A mit Nutzerinnen- und Nutzereinfluss werden die Fenster in der ersten Stunde der Nutzung (7 bis 8h) ganz geöffnet, wenn die Raumtemperatur über 23 °C liegt

Folgende Parameter müssen sowohl bei Gebäuden mit als auch ohne Nutzerinnen- und Nutzereinfluss erfüllt sein:

- Außenliegender Sonnenschutz von NO über Süd bis NW,  $F_c \leq 0,25$
- Randbedingungen: Die umliegende Verschattung kann dynamisch mitbetrachtet werden, die solaren Lasten in der Sommerperiode dürfen nicht schlechter werden als ohne bauliche Verschattungen mit „hypothetisch“ außenliegendem Sonnenschutz
- Denkmalgeschützte Fassaden, in denen kein außenliegender Sonnenschutz erlaubt ist, müssen mit zwischenliegendem oder innenliegendem, hocheffizientem Sonnenschutz ausgestattet werden,  $F_c \leq 0,6$
- Der Maximalwert der installierten wärmewirksamen Beleuchtungsleistung darf den Wert im Aufenthaltsbereich von 8,5 W/m<sup>2</sup> nicht überschreiten. Im Gang sind maximal 25 % dieses Kennwerts erlaubt. Eine Regelung ist aktiv einzuschalten und wird auf Grundlage einer Tageslichtsteuerung automatisch ausgeschaltet. Dimmen ist bei Fensterarbeitsplätzen empfohlen.
- Die Abgabe der inneren Wärme der Arbeitshilfen in Aufenthaltsräumen ist auf 5 W/m<sup>2</sup> in der Betriebszeit zu begrenzen. Außerhalb der Betriebszeit dürfen maximal 5 % dieser Leistung als Wärme freigesetzt werden.

### **Typ A.2 – Temperierung**

Temperierung (hybride Kühlung) von Gebäuden ist möglich, vor allem für den Fall, wenn kein (verstärkter) nächtlicher Luftwechsel möglich ist, z. B.:

- Verstärkte Nachtlüftung über mechanische Lüftungsanlage okay, wenn  $JAZ > 10$
- FreeCooling über Erdwärme, Grundwasser ohne Kältemaschine ( $JAZ > 10$ )
- Wenn Kühlung mit reversiblen Kältemaschinen im Sommer auch für die Beheizung im Winter fungiert und damit Fernwärme/fossil oder Biomassewärme ersetzt, ist diese auch für Gebäude Typ A mit Nutzerinnen- und Nutzereinfluss erlaubt. Nebenkriterium mit mindest-lokaler Deckung von 80 % PV nach Deckung Betriebs-/Allgemeinstrom (monatliche Bilanzierung)
- Kältemaschinen mit ausschließlicher Deckung lokal: 100 % PV nach Deckung Betriebs- bzw. Allgemeinstrom, Grundwasser, Erdwärme. Die Rückkühlung über Außenluft nur für maximal 25 % der Leistung möglich.

## Gebäude Typ B

Wenig bzw. kein Nutzerinnen- und Nutzereinfluss (nachfolgend „oder“-Kriterien)

- Bekleidung im Sommer fix und Bekleidungskennwert  $> 0,5$  clo.
- Fenster eingeschränkt offenbar (z. B. am Tag wegen Außenlärms nicht offenbar, in der Nacht aus Sicherheitsgründen)
- Entfeuchtung erforderlich

### Nachweis:

a) Ebenfalls über adaptives Komfortmodell laut 16798-1, Anhang B2.2 möglich, allerdings Kategorie I inklusive Feuchtwirkung auf thermischen Komfort (Modell Schnieders, bzw. Klimahaus). Die Deckung muss ausschließlich lokal erfolgen (Umweltsenke, Stromaufwand, Nachweis pro Stunde, PV für Konditionierung erst nach Deckung Arbeitshilfen etc. [Betriebsstrom]).

b) Klassisch nach DIN EN ISO 7730, Kategorie II (nur für die Räume des Gebäudes, die unter diesen Typ fallen! Das heißt, in einer Bank könnte im Kundenbereich eine Entfeuchtung notwendig sein, da keine freie Kleiderwahl und keine offenen Fenster, in den Büros wäre allerdings der Fall Gebäude mit Nutzerinnen- und Nutzereinfluss anzuwenden).

### Ergebnisse der Detailparametervariationen

Im ersten Schritt werden die Detailergebnisse für die drei Gebäude-/Nutzerinnen- und Nutzergruppen in einem zweiten je nach Maßnahmen und Randbedingungspaket dargestellt.

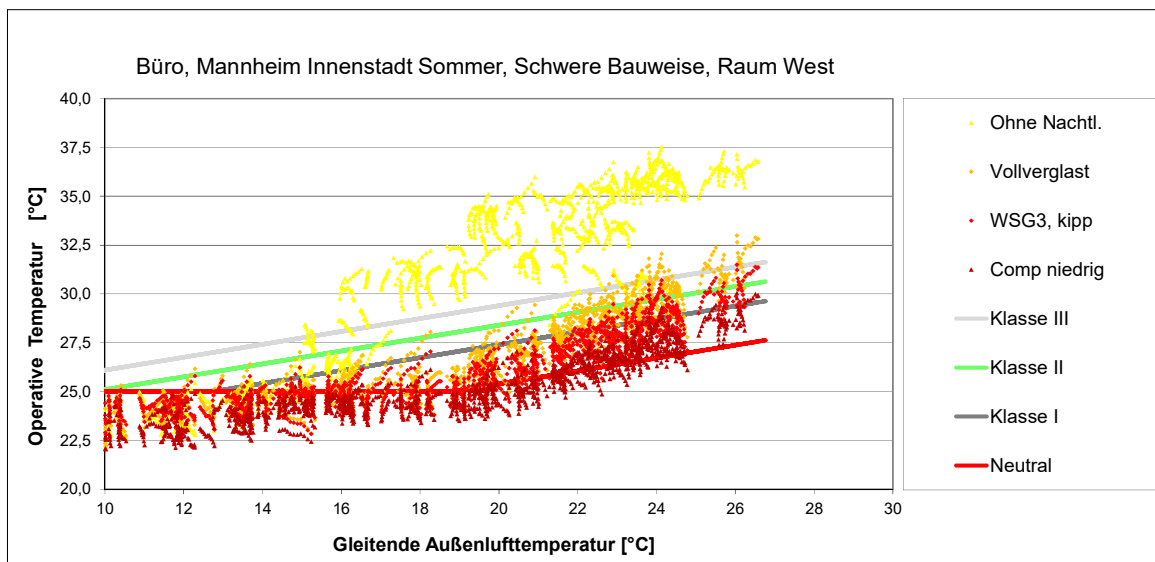
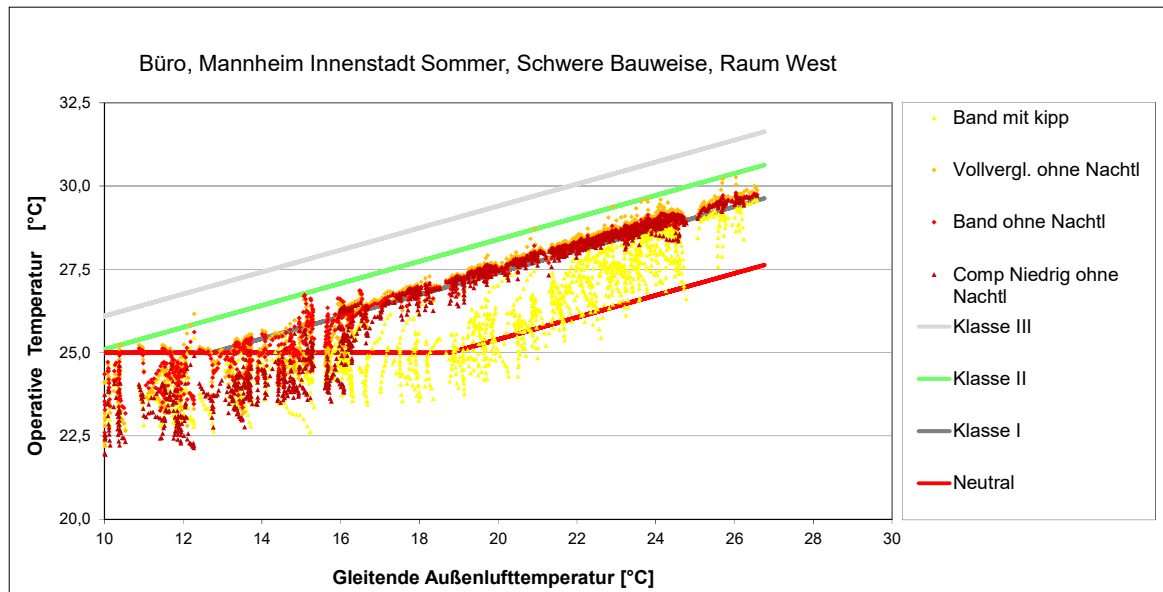


Abbildung 32: Büroraum Typ A.1, Typische Varianten ohne Kühlung

**Interpretation:**

- Überschreitungen Kategorie II ab einer gleitenden Außenlufttemperatur von circa 20 °C
- Ohne Nachtlüftung gibt es sehr hohe Überschreitungen
- Mit innenliegendem Sonnenschutz und niedrigen Arbeitshilfen sind die Behaglichkeitsgrenzen nicht einhaltbar



**Abbildung 33:** Büroraum Typ A.2, hybride Kühlung, Raumluft Solltemperatur Kat. I, Kühlleistung auf 15 W/m<sup>2</sup> beschränkt, Varianten 2 bis 4 ohne Nachtlüftung; Hinweis: Kühlraumsolltemperatur Kategorie I

**Rahmenbedingungen:**

Typ A.2: Eine Temperierung (hybride Kühlung) von Gebäuden ist möglich, vor allem für jene Fälle, wenn kein verstärkter nächtlicher Luftwechsel möglich ist, zum Beispiel

- Verstärkte Nachtlüftung über mechanische Lüftungsanlage, wenn  $JAZ > 10$
- Free-Cooling über Erdwärme, Grundwasser ohne Kältemaschine ( $JAZ > 10$ )
- Wenn Kühlung mit reversiblen Kältemaschinen im Sommer auch für die Beheizung im Winter fungiert und damit fossile Fernwärme oder Biomassewärme ersetzt wird, ist diese auch für Gebäude Typ A mit Nutzerinnen- und Nutzereinfluss erlaubt. Nebenkriterium mit einer lokalen Mindestdeckung von 80 % PV (monatliche Bilanzierung)
- Kältemaschinen mit ausschließlicher Deckung lokal: 100 % PV nach Deckung Betriebs-/Allgemeinstrom, Grundwasser, Erdwärme. Rückkühlung über Außenluft nur für maximal 25 % der Leistung möglich

**Interpretation:**

- Im Fall Vollverglasung Solltemperatur nicht immer einhaltbar
- Mit zusätzlicher Nachtlüftung deutliche Reduktion möglich, Temperierung nur in Spitzenzeiten

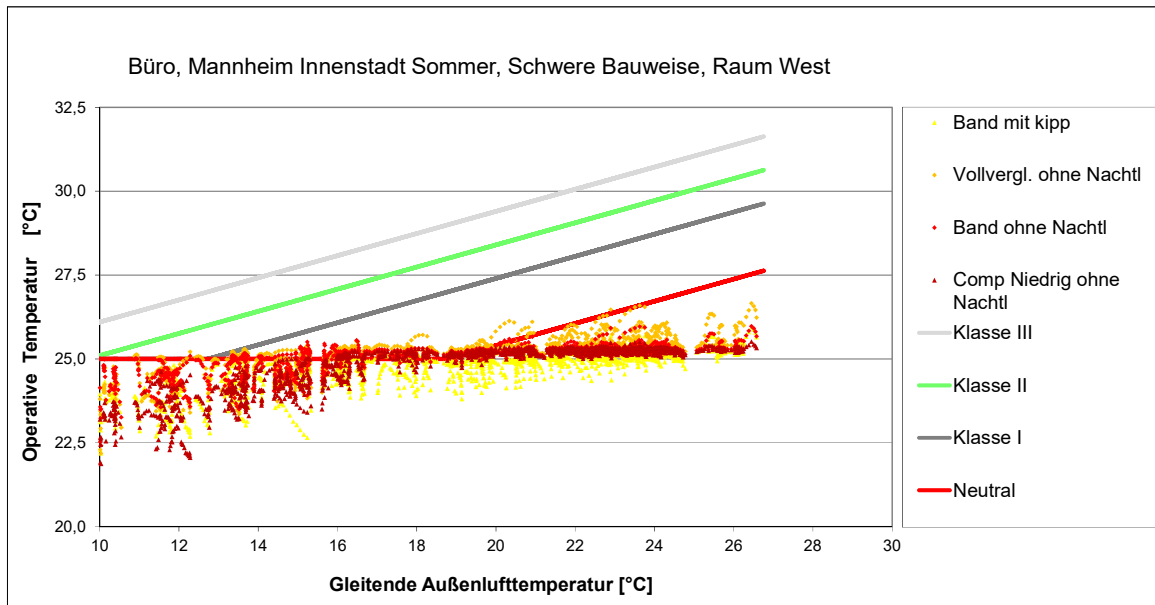


Abbildung 34: Büroraum Typ B, in Anlehnung an konventionelle Kühlung

**Rahmenbedingungen:**

- Typ B: ohne (wenig) Nutzerinnen- und Nutzereinfluss (nachfolgend „oder“-Kriterien)
- Bekleidung im Sommer fix und Bekleidungskennwert > 0,5 clo.
- Fenster eingeschränkt öffnbar (z. B. am Tag wegen Außenlärm nicht öffnbar, in der Nacht aus Sicherheitsgründen)
- Entfeuchtung erforderlich

**Nachweis:**

a) Ebenfalls über adaptives Komfortmodell laut 16798-1, Anhang B2.2 möglich, allerdings Kategorie I inklusive Feuchtwirkung auf thermischen Komfort (Modell Schnieders, bzw. Klimahaus). Die Deckung muss ausschließlich lokal erfolgen (Umweltsenke, Stromaufwand, Nachweis pro Stunde, PV für Konditionierung erst nach Deckung Arbeitshilfen etc. [Betriebsstrom]).

b) Klassisch nach DIN EN ISO 7730, Kategorie II (nur für die Räume des Gebäudes, die unter diesen Typ fallen! Das heißt, in einer Bank könnte im Kundenbereich eine Entfeuchtung notwendig sein, da keine freie Kleiderwahl und keine öffnbaren Fenster, in den Büros wäre allerdings der Fall Gebäude mit Nutzerinnen- und Nutzereinfluss anzuwenden).

**Interpretation:**

Solltemperaturen einhaltbar, empfundene Temperaturen je nach Verglasungsanteil

Nachgehend werden für die wesentlichen Parameter die Ergebnisse für das adaptive Modell Kategorie II dargestellt.

### Varianten unterschiedliche Fenstergrößen, Orientierungen, mit und ohne außenliegendem Sonnenschutz

| Orientierung Fensteranteil<br>Sonnenschutz | Fenlochwest<br>Sonn_außen | Fenbandwest<br>Sonn_außen | Fenvollwest<br>Sonn_außen | Fenlochsüd<br>Sonn_außen | Fenbandsüd<br>Sonn_außen | Fenvollsüd<br>Sonn_außen | Fenlochwest<br>Sonn_ohne | Fenbandwest<br>Sonn_ohne | Fenvollwest<br>Sonn_ohne | Fenlochsüd<br>Sonn_ohne | Fenbandsüd<br>Sonn_ohne | Fenvollsüd<br>Sonn_ohne |
|--------------------------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| II < 0,5%                                  | 0,0%                      | 0,8%                      | 5,1%                      | 0,0%                     | 0,1%                     | 1,6%                     | 4,0%                     | 20,0%                    | 30,9%                    | 1,9%                    | 18,6%                   | 36,9%                   |
| II < 3,5%                                  | 0,0%                      | 0,8%                      | 5,1%                      | 0,0%                     | 0,1%                     | 1,6%                     | 4,0%                     | 20,0%                    | 30,9%                    | 1,9%                    | 18,6%                   | 36,9%                   |
| II < 5,5%                                  | 0,0%                      | 0,8%                      | 5,1%                      | 0,0%                     | 0,1%                     | 1,6%                     | 4,0%                     | 20,0%                    | 30,9%                    | 1,9%                    | 18,6%                   | 36,9%                   |
| III < 0,5%                                 | 0,0%                      | 0,0%                      | 1,1%                      | 0,0%                     | 0,0%                     | 0,2%                     | 1,0%                     | 10,6%                    | 23,2%                    | 0,1%                    | 7,4%                    | 23,6%                   |

**Tabelle 8:** Varianten unterschiedliche Fenstergrößen, Orientierungen, mit und ohne außenliegendem Sonnenschutz

Sonnenschutz (Mannheim 2045x innere Stadt, Bauweise sehr schwer [B1], Baustandard konventionell, Zweifach-WSG-Verglasung, Nachtlüftung gekippte Fenster, innere Lasten hoch):

- Mit effizientem außenliegenden Sonnenschutz können die Grenzwerte in fast allen Fällen eingehalten werden.
- Voraussetzung sind ausreichend freie Lüftungsquerschnitte für einen verstärkten Fensterluftwechsel im Sommer.
- Vollverglasung West könnte mit einem noch effizienteren Sonnenschutz oder leicht erhöhtem Lüftungsquerschnitt den Grenzwert erreichen.
- Die Unterschiede zwischen den Orientierungen sind mit gutem Sonnenschutz gering.

### Varianten Öffnungsgrad nächtliche Fensteröffnung

| Effektiver Lüftungsquerschnitt/Nutzfläche [%] | 0,5%  | 1,3%  | 2,7% | 5,4% | 10,8% | 16,2% | 21,6% | 27,0% | 35,1% |
|-----------------------------------------------|-------|-------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|
| II < 0,5%                                     | 28,3% | 14,9% | 1,0% | 0,0% | 0,0%  | 0,0%  | 0,0%  | 0,0%  | 0,0%  |
| II < 3,5%                                     | 28,3% | 14,9% | 1,0% | 0,0% | 0,0%  | 0,0%  | 0,0%  | 0,0%  | 0,0%  |
| II < 5,5%                                     | 28,3% | 14,9% | 1,0% | 0,0% | 0,0%  | 0,0%  | 0,0%  | 0,0%  | 0,0%  |
| III < 0,5%                                    | 20,1% | 3,0%  | 0,0% | 0,0% | 0,0%  | 0,0%  | 0,0%  | 0,0%  | 0,0%  |

**Tabelle 9:** Varianten Öffnungsgrad nächtliche Fensteröffnung (Mannheim 2045x innere Stadt, Bauweise schwer, Baustandard konventionell, Orientierung West, Loch-Fassade [3 öffnbare Fenster, Höhe 1,9 m], Zweifach-WSG-Verglasung, außenliegender Sonnenschutz, innere Lasten hoch)

- Klimarichtlinien-Kriterium mit freiem Lüftungsquerschnitt pro Nutzfläche Büroraum von 2,7 % in fast allen Varianten erreichbar
- bei geringeren Querschnitten wird Grenzwert deutlich überschritten

### Varianten Öffnungsgrad nächtliche Fensteröffnung, niedrige innere Lasten

| Effektiver Lüftungsquerschnitt/Nutzfläche [%] | 0,5%  | 1,3% | 2,7% | 5,4% | 10,8% | 16,2% | 21,6% | 27,0% | 35,1% |
|-----------------------------------------------|-------|------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|
| II < 0,5%                                     | 32,6% | 1,1% | 0,0% | 0,0% | 0,0%  | 0,0%  | 0,0%  | 0,0%  | 0,0%  |
| II < 3,5%                                     | 32,6% | 1,1% | 0,0% | 0,0% | 0,0%  | 0,0%  | 0,0%  | 0,0%  | 0,0%  |
| II < 5,5%                                     | 32,6% | 1,1% | 0,0% | 0,0% | 0,0%  | 0,0%  | 0,0%  | 0,0%  | 0,0%  |
| III < 0,5%                                    | 27,7% | 0,0% | 0,0% | 0,0% | 0,0%  | 0,0%  | 0,0%  | 0,0%  | 0,0%  |

**Tabelle 10:** Varianten Öffnungsgrad nächtliche Fensteröffnung mit niedrigen inneren Lasten 5 W/m<sup>2</sup>  
(Mannheim 2045x innere Stadt, Bauweise schwer, Baustandard konventionell, Orientierung West,  
Loch-Fassade [3 öffnbare Fenster, Höhe 1,9 m], Zweifach-WSG-Verglasung, außenliegender Sonnenschutz)

- Klimarichtlinien-Kriterium mit freiem Lüftungsquerschnitt pro Nutzfläche  
Büroraum von 1,3 % in fast allen Varianten erreichbar
- Bei geringeren Querschnitten wird Grenzwert deutlich überschritten

### Varianten Öffnungsgrad nächtliche Fensteröffnung, sehr leichte Bauweise

| Effektiver Lüftungsquerschnitt/Nutzfläche [%] | 0,5%  | 1,3%  | 2,7%  | 5,4% | 10,8% | 16,2% | 21,6% | 27,0% | 35,1% |
|-----------------------------------------------|-------|-------|-------|------|-------|-------|-------|-------|-------|
| II < 0,5%                                     | 31,3% | 20,8% | 11,7% | 6,7% | 4,2%  | 3,4%  | 3,0%  | 2,7%  | 2,5%  |
| II < 3,5%                                     | 31,3% | 20,8% | 11,7% | 6,7% | 4,2%  | 3,4%  | 3,0%  | 2,7%  | 2,5%  |
| II < 5,5%                                     | 31,3% | 20,8% | 11,7% | 6,7% | 4,2%  | 3,4%  | 3,0%  | 2,7%  | 2,5%  |
| III < 0,5%                                    | 26,6% | 14,2% | 6,8%  | 3,2% | 1,8%  | 1,5%  | 1,3%  | 1,2%  | 1,0%  |

**Tabelle 11:** Varianten Öffnungsgrad nächtliche Fensteröffnung mit leichter Bauweise (Mannheim 2045x  
innere Stadt, Baustandard konventionell, Orientierung West, Loch-Fassade [3 öffnbare Fenster, Höhe 1,9 m],  
Zweifach-WSG-Verglasung, innere Lasten hoch)

- Klimarichtlinien-Kriterium mit freiem Lüftungsquerschnitt pro Nutzfläche  
Büroraum von 16 % Öffnungsgrad erreichbar
- Bei geringeren Querschnitten wird Grenzwert deutlich überschritten

Insgesamt kann Folgendes zu den dargestellten Varianten festgehalten werden:

- Verstärkter (nächtlicher) Fensterluftwechsel ist wesentliche Voraussetzung für eine „natürliche“ Kühlung von Gebäuden
- Mit entsprechend hohen wirksamen Speichermassen kann das natürliche Kühlpotenzial effizient genutzt werden
- Sehr leichte Bauweisen sollten mit wirksamen Speichermassen (massive Putze, massive Estriche, PCM) ausgerüstet werden
- Eine exakte und qualitätsgesicherte Planung der tatsächlich erreichbaren freien Querschnitte ist essenziell, um in der Umsetzung den geplanten thermischen Komfort sicherzustellen
- Die Reduktion der inneren Lasten kann bei geringen verfügbaren Querschnitten wesentlich sein zur Erreichung der Grenzwerte

Ohne nächtlichen Fensterluftwechsel ist eine rein „passive“ Kühlung nicht darstellbar.  
Nachfolgend werden weitere Varianten zu der sehr leichten Bauweise dargestellt.

**Varianten für sehr leichte Bauweise: unterschiedliche Fenstergrößen, Orientierungen, mit und ohne außenliegendem Sonnenschutz, gekippte oder ganz geöffnete Fenster über Nacht, hohe und niedrige innere Lasten**

| Leichte Bauweise                             | 1           | 3           | 2           | 4          | 6          | 5          | 7           | 9           | 8           | 10         | 12         | 11         |
|----------------------------------------------|-------------|-------------|-------------|------------|------------|------------|-------------|-------------|-------------|------------|------------|------------|
|                                              | Fenlochwest | Fenbandwest | Fenvollwest | Fenlochsüd | Fenbandsüd | Fenvollsüd | Fenlochwest | Fenbandwest | Fenvollwest | Fenlochsüd | Fenbandsüd | Fenvollsüd |
| Ausgangsvariante                             | Sonn_außen  | Sonn_außen  | Sonn_außen  | Sonn_außen | Sonn_außen | Sonn_außen | Sonn_ohne   | Sonn_ohne   | Sonn_ohne   | Sonn_ohne  | Sonn_ohne  | Sonn_ohne  |
| II < 0,5%                                    | 6,7%        | 13,0%       | 21,1%       | 6,1%       | 12,2%      | 20,9%      | 19,1%       | 32,3%       | 41,1%       | 26,8%      | 43,4%      | 52,4%      |
| II < 3,5%                                    | 6,7%        | 13,0%       | 21,1%       | 6,1%       | 12,2%      | 20,9%      | 19,1%       | 32,3%       | 41,1%       | 26,8%      | 43,4%      | 52,4%      |
| II < 5,5%                                    | 6,7%        | 13,0%       | 21,1%       | 6,1%       | 12,2%      | 20,9%      | 19,1%       | 32,3%       | 41,1%       | 26,8%      | 43,4%      | 52,4%      |
| III < 0,5%                                   | 3,2%        | 7,8%        | 13,7%       | 2,5%       | 5,9%       | 11,3%      | 11,9%       | 25,2%       | 34,3%       | 17,0%      | 34,9%      | 45,8%      |
| Innere Lasten niedrig                        |             |             |             |            |            |            |             |             |             |            |            |            |
| II < 0,5%                                    | 2,0%        | 6,1%        | 12,2%       | 1,4%       | 4,4%       | 10,7%      | 9,8%        | 22,7%       | 32,8%       | 13,3%      | 33,4%      | 45,6%      |
| II < 3,5%                                    | 2,0%        | 6,1%        | 12,2%       | 1,4%       | 4,4%       | 10,7%      | 9,8%        | 22,7%       | 32,8%       | 13,3%      | 33,4%      | 45,6%      |
| II < 5,5%                                    | 2,0%        | 6,1%        | 12,2%       | 1,4%       | 4,4%       | 10,7%      | 9,8%        | 22,7%       | 32,8%       | 13,3%      | 33,4%      | 45,6%      |
| III < 0,5%                                   | 0,7%        | 3,1%        | 7,8%        | 0,4%       | 1,8%       | 5,0%       | 6,1%        | 16,8%       | 27,4%       | 7,1%       | 25,0%      | 38,6%      |
| Fenster ganz offenbar, innere Lasten hoch    |             |             |             |            |            |            |             |             |             |            |            |            |
| II < 0,5%                                    | 2,5%        | 5,7%        | 12,3%       | 2,9%       | 6,0%       | 12,5%      | 9,5%        | 20,5%       | 29,0%       | 16,7%      | 33,6%      | 43,7%      |
| II < 3,5%                                    | 2,5%        | 5,7%        | 12,3%       | 2,9%       | 6,0%       | 12,5%      | 9,5%        | 20,5%       | 29,0%       | 16,7%      | 33,6%      | 43,7%      |
| II < 5,5%                                    | 2,5%        | 5,7%        | 12,3%       | 2,9%       | 6,0%       | 12,5%      | 9,5%        | 20,5%       | 29,0%       | 16,7%      | 33,6%      | 43,7%      |
| III < 0,5%                                   | 1,0%        | 2,9%        | 6,3%        | 0,8%       | 2,2%       | 5,3%       | 4,7%        | 13,7%       | 22,8%       | 8,2%       | 25,0%      | 36,7%      |
| Fenster ganz offenbar, innere Lasten niedrig |             |             |             |            |            |            |             |             |             |            |            |            |
| II < 0,5%                                    | 0,7%        | 2,5%        | 5,6%        | 0,5%       | 1,8%       | 5,7%       | 4,0%        | 13,0%       | 22,1%       | 7,3%       | 24,3%      | 37,0%      |
| II < 3,5%                                    | 0,7%        | 2,5%        | 5,6%        | 0,5%       | 1,8%       | 5,7%       | 4,0%        | 13,0%       | 22,1%       | 7,3%       | 24,3%      | 37,0%      |
| II < 5,5%                                    | 0,7%        | 2,5%        | 5,6%        | 0,5%       | 1,8%       | 5,7%       | 4,0%        | 13,0%       | 22,1%       | 7,3%       | 24,3%      | 37,0%      |
| III < 0,5%                                   | 0,1%        | 1,1%        | 3,3%        | 0,1%       | 0,5%       | 2,0%       | 2,2%        | 8,5%        | 17,2%       | 3,3%       | 17,6%      | 31,6%      |

**Tabelle 12:** Bauweise sehr leicht, Varianten Unterschiedliche Fenstergrößen, Orientierungen, mit und ohne außenliegenden Sonnenschutz, gekippt oder ganz geöffnete Fenster über Nacht, hohe und niedrige innere Lasten (Mannheim 2045x innere Stadt, Baustandard konventionell, Zweifach-WSG-Verglasung)  
Interpretation leichte Bauweise Mannheim 2045x:

- Mit einer sehr leichten Bauweise ist eine rein natürliche Kühlung nur schwer umsetzbar
- Die einzigen Varianten, die der Klimarichtlinie entsprechen, sind Loch-Fassaden mit außenliegendem Sonnenschutz sowie niedrigen Lasten und/oder ganz offenbaren Fenstern für den verstärkten nächtlichen Luftwechsel
- Die Einbringung von wirksamer Speichermasse durch schwere innere Schichten, Verwendung von PCM entspannt deutlich
- Das Kriterium Kategorie III 0 % ist anspruchsvoller als Kategorie II 3 %

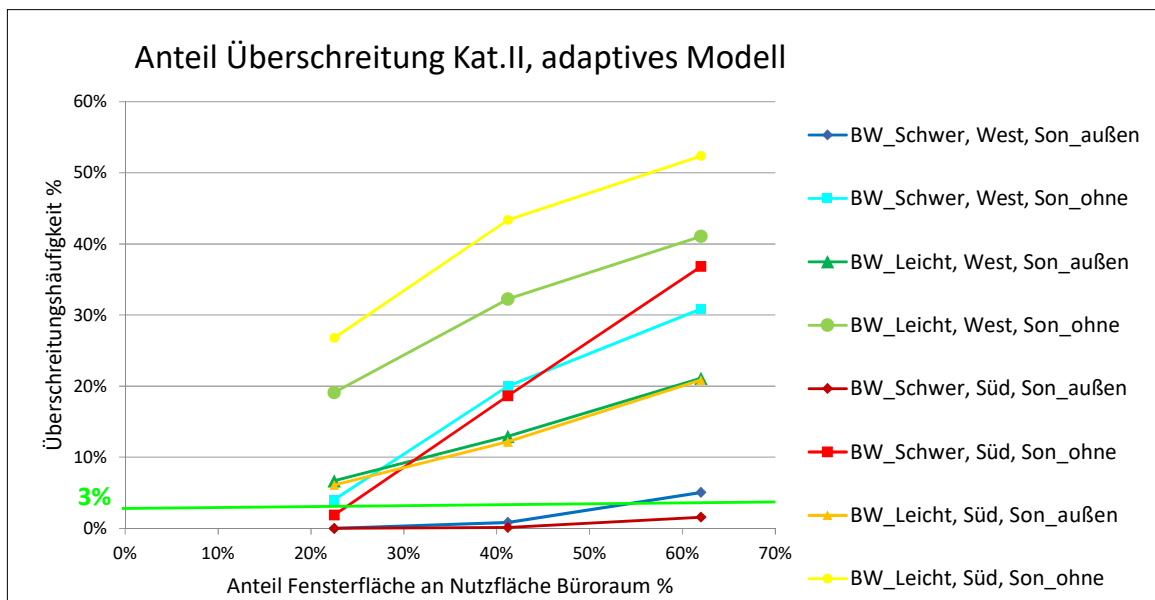
**Varianten Standorte Mannheim und Potsdam innere Stadt, 2045x**

|                                                  |                 | 1           | 2           | 3           | 4          | 5          | 6          | 7           | 8           | 9           | 10         | 11         | 12         |
|--------------------------------------------------|-----------------|-------------|-------------|-------------|------------|------------|------------|-------------|-------------|-------------|------------|------------|------------|
|                                                  |                 | Fenlochwest | Fenvollwest | Fenbandwest | Fenlochsüd | Fenvollsüd | Fenbandsüd | Fenlochwest | Fenvollwest | Fenbandwest | Fenlochsüd | Fenvollsüd | Fenbandsüd |
|                                                  |                 | Sonn_außen  | Sonn_außen  | Sonn_außen  | Sonn_außen | Sonn_außen | Sonn_außen | Sonn_ohne   | Sonn_ohne   | Sonn_ohne   | Sonn_ohne  | Sonn_ohne  | Sonn_ohne  |
| <b>Free Running, Mannheim 2045x innere Stadt</b> |                 |             |             |             |            |            |            |             |             |             |            |            |            |
| <b>B-schwer</b>                                  | Lkipp_Ahoch     | 0,0%        | 5,1%        | 0,8%        | 0,0%       | 1,6%       | 0,1%       | 4,0%        | 30,9%       | 20,0%       | 1,9%       | 36,9%      | 18,6%      |
|                                                  | Loffen_Ahoch    | 0,0%        | 0,3%        | 0,0%        | 0,0%       | 0,1%       | 0,0%       | 0,0%        | 11,1%       | 3,7%        | 0,8%       | 17,7%      | 4,2%       |
| <b>B-leicht</b>                                  | Lkipp_Ahoch     | 6,7%        | 21,1%       | 13,0%       | 6,1%       | 20,9%      | 12,2%      | 19,1%       | 41,1%       | 32,3%       | 26,8%      | 52,4%      | 43,4%      |
|                                                  | Lkipp_Aniedrig  | 2,0%        | 12,2%       | 6,1%        | 1,4%       | 10,7%      | 4,4%       | 9,8%        | 32,8%       | 22,7%       | 13,3%      | 45,6%      | 33,4%      |
|                                                  | Loffen_Ahoch    | 2,5%        | 12,3%       | 5,7%        | 2,9%       | 12,5%      | 6,0%       | 9,5%        | 29,0%       | 20,5%       | 16,7%      | 43,7%      | 33,6%      |
|                                                  | Loffen_Aniedrig | 0,7%        | 5,6%        | 2,5%        | 0,5%       | 5,7%       | 1,8%       | 4,0%        | 22,1%       | 13,0%       | 7,3%       | 37,0%      | 24,3%      |
| <b>Free Running, Potsdam 2045x innere Stadt</b>  |                 |             |             |             |            |            |            |             |             |             |            |            |            |
| <b>B-schwer</b>                                  | Lkipp_Ahoch     | 0,0%        | 0,2%        | 0,0%        | 0,0%       | 0,1%       | 0,0%       | 0,5%        | 29,5%       | 13,0%       | 1,5%       | 35,1%      | 15,9%      |
|                                                  | Loffen_Ahoch    | 0,0%        | 0,0%        | 0,0%        | 0,0%       | 0,1%       | 0,0%       | 0,1%        | 8,6%        | 2,0%        | 0,8%       | 14,3%      | 4,1%       |
| <b>B-leicht</b>                                  | Lkipp_Ahoch     | 4,0%        | 20,4%       | 11,9%       | 4,6%       | 21,1%      | 12,1%      | 17,4%       | 38,2%       | 29,4%       | 27,4%      | 53,9%      | 44,0%      |
|                                                  | Lkipp_Aniedrig  | 0,2%        | 10,7%       | 2,9%        | 0,3%       | 10,3%      | 2,2%       | 8,5%        | 31,6%       | 21,4%       | 14,9%      | 47,0%      | 35,3%      |
|                                                  | Loffen_Ahoch    | 1,3%        | 12,9%       | 5,6%        | 1,8%       | 14,2%      | 6,3%       | 9,8%        | 26,6%       | 19,2%       | 18,8%      | 46,4%      | 35,9%      |
|                                                  | Loffen_Aniedrig | 0,0%        | 5,3%        | 0,9%        | 0,2%       | 5,2%       | 0,9%       | 4,0%        | 21,0%       | 13,1%       | 8,6%       | 41,2%      | 27,9%      |

**Tabelle 13:** Vergleich Standorte, Bauweisen, Nachtlüftung, innere Lasten, Klima durchgehend 2045x.  
Grenzwert Kat. II, 3 %.

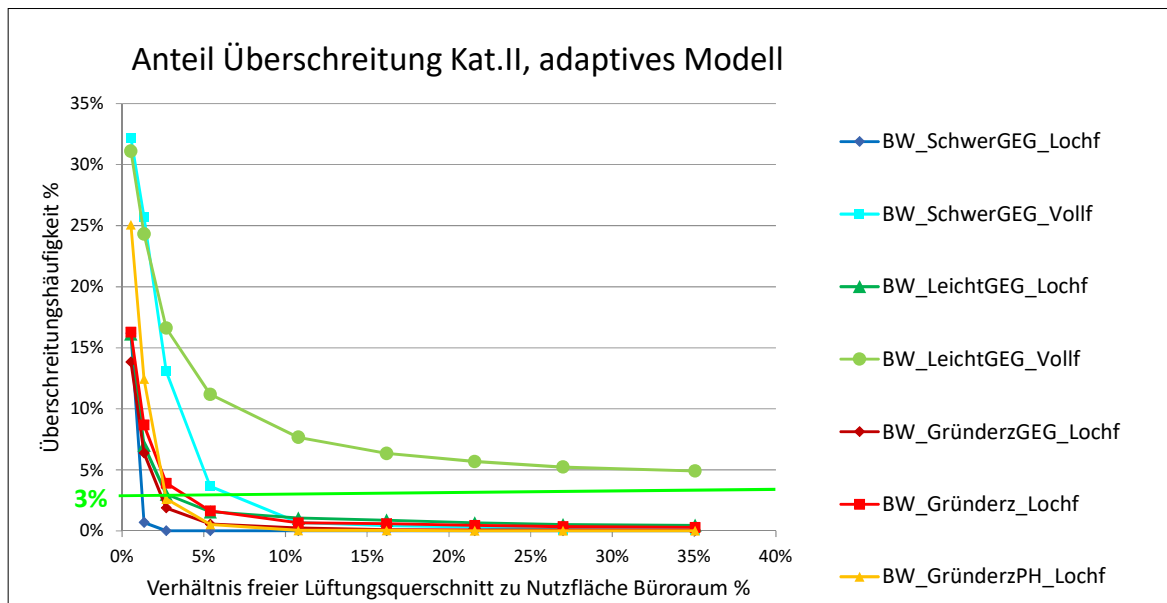
- Die Unterschiede zwischen den Standorten in den Ergebnissen sind verhältnismäßig gering, da durch das adaptive Modell und den Bezug auf die gleitende Außenlufttemperatur unterschiedliche Grenztemperaturen resultieren
- Für den kühleren Standort Potsdam reichen geringfügig geringere Maßnahmen aus, um die Klimarichtlinie einzuhalten
- Für Mannheim 2045x Vorort ergeben sich ähnliche Ergebnisse wie für die innere Stadt, obwohl die Außenlufttemperaturen niedriger liegen

Variiert man die Kernparameter systematisch, kann für einen bestimmten Standort und ein bestimmtes Klima rasch ein geeignetes Maßnahmenbündel zusammengestellt werden. In Abbildung 35 wird dies für die Parameter Fensteranteil bei Variation von Bauweise, Sonnenschutz und Orientierung dargestellt.

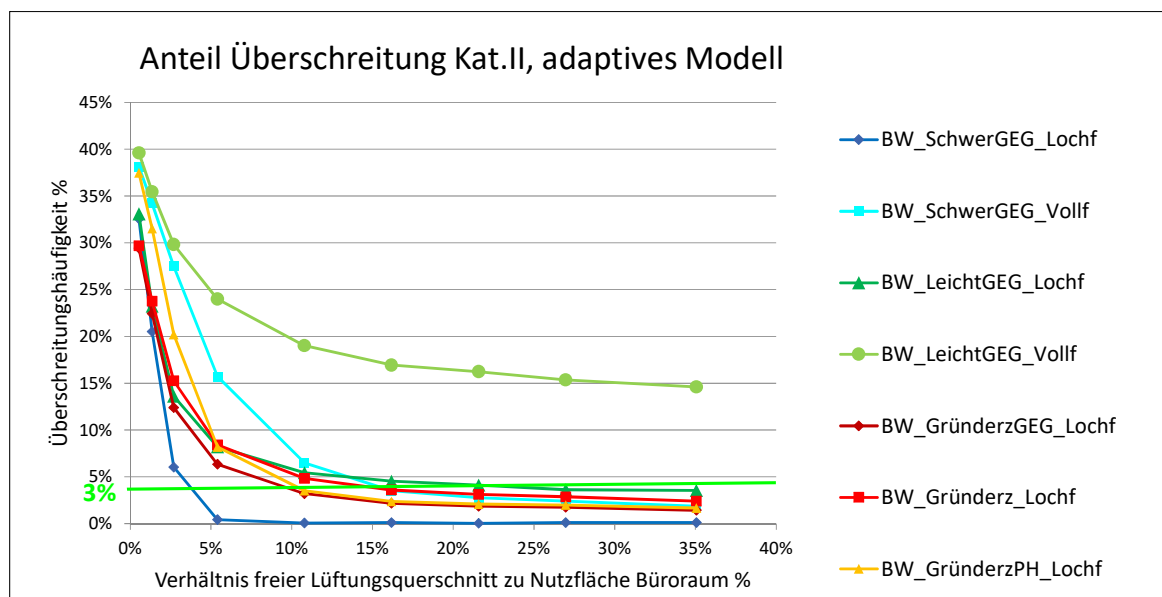


**Abbildung 35:** Entwicklung der Überschreitungshäufigkeit mit steigender Fensterfläche. Variation von Bauweise, Sonnenschutz und Orientierung. Sonstige Kenndaten wie Ausgangsvariante (Fenster gekippt außerhalb Betriebszeit, Höhe 1,9 m, Mannheim Innenstadt 2045x, innere Lasten hoch)

Ein weiterer Kernparameter ist der tatsächlich verfügbare freie Strömungsquerschnitt für eine nächtliche verstärkte Fensterlüftung. In Abbildung 36 sind die Ergebnisse für hohe innere Lasten durch Arbeitshilfen von  $15 \text{ W/m}^2$  angenommen, in Abbildung 37 für sehr niedrige innere Lasten von  $2,5 \text{ W/m}^2$ .



**Abbildung 36:** Entwicklung der Überschreitungshäufigkeit mit steigendem freien Lüftungsquerschnitt für verstärkten nächtlichen Luftwechsel bei hohen inneren Lasten (15 W/m²). Wirksame Höhe 1,9m. Variation von Bauweise, Baustandard und Fenstergröße. Sonstige Kenndaten wie Ausgangsvariante (Mannheim Innenstadt 2045x, Westfassade, Personen und Beleuchtung Standard)



**Abbildung 37:** Entwicklung der Überschreitungshäufigkeit mit steigendem freien Lüftungsquerschnitt für verstärkten nächtlichen Luftwechsel bei sehr niedrigen inneren Lasten (2,5 W/m²). Wirksame Höhe 1,9m. Variation von Bauweise, Baustandard und Fenstergröße. Sonstige Kenndaten wie Ausgangsvariante (Mannheim Innenstadt 2045x, Westfassade, Personen und Beleuchtung Standard)

**Aus der Detail-Parametervariation können die folgenden Schlussfolgerungen gezogen werden:**

- Mit einer sehr schweren Bauweise, außenliegendem Sonnenschutz und gut kippbaren Fensterflügeln mit ausreichendem freien Lüftungsquerschnitt können auch an sehr warmen Standorten die Grenzwerte der Klimarichtlinie in den meisten Fällen eingehalten werden. Bei hohen Glasanteilen können je nach Klima zusätzliche Maßnahmen erforderlich sein.
- Sehr leichte Bauweisen sind deutlich kritischer und nur für moderate Verglasungsanteile bei optimiertem verstärkten Nacht-Luftwechsel und/oder niedrigen inneren Lasten im Komfortbereich.
- Da in den meisten Fällen die Bauweisen zwischen diesen beiden liegen, liegen die erforderlichen Maßnahmen zwischen diesen beiden Extremen.
- Ohne verstärkten nächtlichen Luftwechsel sind die Grenzwerte im Free-Running-Modus nicht erreichbar, zudem sind der tatsächlich vorhandene freie Lüftungsquerschnitt und die thermisch wirksame Höhe höchst einflussreich.
- Ohne außenliegenden Sonnenschutz sind in günstigen Fällen Varianten innerhalb des Grenzwertes möglich, wenn der freie Lüftungsquerschnitt für nächtliches Lüften ausreichend ist.
- Niedrige innere Lasten sind vor allem für kritischere Randbedingungen äußerst hilfreich.

**Zusammenfassung und Fazit der Simulationsergebnisse von SC1 und SC2**

Durch eine Vielzahl umfangreicher simulationstechnischer Untersuchungen konnte die Evidenz erbracht werden, dass auch in Zukunft (TRY 2045x) in vielen Fällen mithilfe von passiven Maßnahmen der thermische Sommerkomfort in Gebäuden in Bezug auf das adaptive Komfortband nach EN 16798-1 ohne Klimatisierung realisiert werden kann. Nichtsdestotrotz hat sich auf Grundlage der zahlreichen Gebäudesimulationen herausgestellt, dass infolge des Klimawandels zukünftig der thermische Sommerkomfort nicht bei allen Raum- bzw. Fassadentypen zu 100 % über die gesamte Anwesenheits- bzw. Nutzungszeit eingehalten werden kann. In diesem Kontext bedarf es der Definition einer maximal zulässigen Überschreitungshäufigkeit, wie sie bereits in der Vorgängernorm DIN EN 15251 mit 3 % (bzw. 5 %) enthalten war und auch von aktuellen Forschungsarbeiten [Maas 2024] gefordert bzw. mit 3 % vorgeschlagen wird. Zum Erreichen des thermischen Sommerkomforts über den gesamten Anwesenheitszeitraum ist die konsequente Umsetzung von passiven Maßnahmen bzw. Maßnahmenkombinationen zum sommerlichen Wärmeschutz erforderlich. Als wirksamste passive Maßnahmen unter Berücksichtigung eines möglichst geringen Energiebedarfs lassen sich folgende planerische bzw. architektonische Gestaltungsmerkmale anführen:

- Mit einer schweren Bauweise, außenliegendem Sonnenschutz und gut kippbaren Fensterflügeln mit ausreichendem freien Lüftungsquerschnitt können auch an sehr warmen Standorten die Grenzwerte der EN 16798-1, Klasse 2 mit einer maximalen Überschreitungshäufigkeit von 3 % in den meisten Fällen eingehalten werden. Bei hohen Glasanteilen können je nach Klima zusätzliche Maßnahmen erforderlich sein.

- Sehr leichte Bauweisen sind deutlich kritischer und nur für moderate Verglasungsanteile bei optimiertem verstärkten Nacht-Luftwechsel und/oder niedrigen inneren Lasten im Komfortbereich.
- Ohne verstärkten nächtlichen Luftwechsel sind die Grenzwerte im Free-Running-Modus nicht erreichbar, zudem sind der tatsächlich vorhandene freie Lüftungsquerschnitt und die thermisch wirksame Höhe höchst einflussreich.
- Der Einsatz von energieeffizienten Arbeitsgeräten, welche durch die reduzierten internen Lasten einen doppelten Vorteil und Nutzen bringen, sollte jedenfalls umgesetzt werden. Einerseits kann dadurch der thermische Komfort positiv beeinflusst werden, und andererseits können erhebliche Energieeinsparungen realisiert werden.

Resultierend müssen zum Erreichen eines klimaneutralen Gebäudebestands bis 2045 jedenfalls eine Reihe der oben genannten baulichen Maßnahmen zur effizienten Einhaltung des sommerlichen Wärmeschutzes umgesetzt werden, um damit den Ressourcenverbrauch im Gebäudebetrieb zu minimieren sowie die CO<sub>2</sub>-Emissionen zu reduzieren und den thermischen Sommerkomfort zu maximieren. Reichen die Maßnahmen nicht aus, so sollte auf Temperierungsmaßnahmen mit sehr beschränkter Kühlleistung und hoher PV-Unterstützung zurückgegriffen werden. Als letzte Maßnahme, wenn der Einfluss der Nutzerinnen und Nutzer sehr beschränkt ist, kann auf die herkömmliche Klimatisierung mit möglichst hoher Unterstützung lokaler erneuerbarer Energieerzeugung in den erforderlichen Räumen zurückgegriffen werden.



## 03 Zusammenfassung

Angesichts der enormen Umweltwirkung und des dringenden Handlungsbedarfs im Gebäudebereich ist das einfache und technikreduzierte Bauen eine alternative Strategie zur Erreichung der Klima- und Ressourcenschutzziele, die zahlreiche Vorteile aufzeigt, aber auch mit veränderten rechtlichen und prozessualen Rahmenbedingungen einhergehen muss. Unter Berücksichtigung der Ergebnisse der drei Zukunft-Bau-Forschungsprojekte können – gegliedert nach den unterschiedlichen relevanten Parametern – folgende Schlussfolgerungen gezogen werden:

### Planungs- und Bauprozess

- Der **Planungsprozess wird komplexer sowie frühzeitiger** und ermöglicht optimalerweise eine **integrative Planung mit Feedbackschleifen** zwischen allen an der Planung Beteiligten und zukünftigen Nutzerinnen und Nutzern. Die beteiligten Planerinnen und Planer brauchen Wissen um die Zusammenhänge zwischen Technik, Tragwerk, Material sowie um die Anforderungen an Behaglichkeit und Komfort. **Eine verständliche Erklärung der Haustechnik und Steuerung durch alle an der Haustechnik beteiligten Planerinnen und Planer für die Nutzerinnen und Nutzer ist schon in der Planungsphase zentral**, um die Logik und die ganzheitlichen Zusammenhänge in Hinblick auf die Nutzung zu verstehen und gegebenenfalls noch Adaptionen zu ermöglichen. Außerdem sollte der konkrete Betrieb geklärt werden: Wer bedient es, wer kann es bedienen, wie funktioniert es hausübergreifend, was passiert, wenn unterschiedliche Nutzerinnen und Nutzer eingreifen, wie reagiert das System auf überhaupt auf Nutzerinnen- und Nutzereingriffe? Hierfür muss ein Budget vorgesehen werden, um diesen Mehraufwand der Planerinnen und Planer durch die Einführung ins das System entsprechend abzugelten.
- **Wichtigkeit des übergeordneten Systems und der Schnittstellen:** Im Planungs- und Bauprozess braucht es eine Stelle, die alle an der Planung beteiligten Akteurinnen und Akteure mit ihrem jeweiligen Teilwissen koordiniert, um die Schnittstellen optimal zu gestalten und das übergeordnete und ganzheitliche System im Planungs- und Bauprozess nicht aus den Augen zu verlieren.
- Um eine koordinierende Stelle zu ermöglichen, müssen die **Fachleute ihr Spezialwissen verständlich machen**. Es müssten Vereinbarungen über die Rahmenbedingungen und die Nutzung getroffen werden, schon in der Planungsphase, bei Beauftragung der Firmen und noch einmal im Zuge der Übergabe. So muss geklärt werden, welche Widersprüche es gibt, was warum geändert wurde und wie es letztlich im Betrieb funktioniert.
- **Je robuster die Steuersysteme, umso besser der Betrieb:** Der Aufwand, den Betrieb eines ganzen Hauses auch mit einem relativ einfachen Steuerungssystem zu monitoren und zu optimieren, ist sehr hoch. Bei jedem Planungsschritt sind daher Überlegungen anzustellen, wie mit minimaler Technik maximale Nutzerinnen- und Nutzerfreundlichkeit bei ausreichendem Komfort hergestellt werden kann („Jeder Schalter, den man nicht braucht, ist ein guter Schalter“).
- **Lowtech in der Ausführung bedeutet oft Hightech in der Planung:** Lowtech braucht digitale Werkzeuge der **Simulation**, um eine bessere Anpassung an die örtlichen Gegebenheiten und Rahmenbedingungen der Nutzung zu ermöglichen.

## Behaglichkeit und Komfort

- In Hinblick auf die steigenden sommerlichen Temperaturen und die länger andauernden Hitzeperioden wird das statisch-mechanistisch-thermodynamische Behaglichkeitsmodell nach Fanger [1972] zunehmend kritisiert, da es auf festgelegten Standards basiert. **Adaptive Modelle betonen hingegen die Anpassungsfähigkeit und Individualität der Menschen.** Nach EN 16798-1 wird für klimatisierte Gebäude aktuell EN ISO 7730 (Fanger) herangezogen, während für Gebäude ohne aktive Kühlanlage in einigen europäischen Ländern das adaptive Behaglichkeitsmodell verwendet wird.
- Die empirische Evidenz spricht für adaptive Modelle. In Hinblick auf die detaillierte Komfortbewertung in Gebäuden wird das **adaptive Wärmebilanzmodell (ATHB)** nach Schweiker [2022] empfohlen, da es die beste Korrelation in den Messungen aufzeigt. Wenn die gleitende Außenlufttemperatur auf über 26 °C ansteigt, zeigt das adaptive Modell nach EN 16798-1 Maximaltemperaturen von über 30 °C, während im ATHB-Modell diese bei knapp unter 30 °C liegen.

## Individualität der Gebäude: Standort und Nutzung

- Unterschiedliche **Konzepte funktionieren nicht überall**, das heißt, nicht in allen Lagen und unter allen klimatischen Bedingungen. Im Vorfeld sind frühzeitig **thermisch-dynamische Simulationen notwendig**, um sicherzustellen, dass das Konzept unter den gegebenen Bedingungen anwendbar ist.
- Gerade in einem **urbanen Umfeld muss über das Gebäude hinausgedacht werden – auch dem Freiraum kommt eine wesentliche Bedeutung zu.** Grün- und Wasserflächen im direkten Gebäudeumfeld können einen ökologischen Ausgleich schaffen und helfen unter Extrembedingungen (z. B. Tropennächte), das Mikroklima im Außenraum und damit auch den Komfort im Innenraum positiv zu beeinflussen.
- In Hinblick auf eine **kritische Analyse von Bedarfsplanungen** und die mögliche **Nutzung von bestehenden Gebäude sowie Infrastrukturen** erscheint die Einführung einer **Leistungsphase Null (LPh0)** dringend erforderlich.

## Einsatz von Baustoffen und Materialien

- Der **große Anteil grauer Energie durch den Materialeinsatz zur Generierung von Speichermasse** und der hohe CO<sub>2</sub>-Ausstoß im Zuge der Produktion sind bei vielen Lowtech-Projekten ein Thema.
- In Bezug auf die **Baumaterialien soll in Zukunft der Einsatz von Alternativen geprüft werden**, um unabhängiger zu werden und nachhaltigere Baumaterialien, wie beispielsweise Holz, einsetzen zu können (Lowtech und low-impact). Herausfordernd sind diese Überlegungen vor allem in Bezug auf die Herstellung der notwendigen Speichermasse, aber auch in Bezug auf die Kosten.

## Robuste und nutzerfreundliche TGA

- Durch die jährliche Preissteigerung der Energiekosten von 5 % besitzt die Energieeffizienz von Gebäuden das größte Einsparpotenzial bei den Lebenszykluskosten. Es zeigt sich, dass eine **optimierte thermische Gebäudehülle einen Großteil der Energiekosten reduzieren kann**. Einen signifikanten Beitrag zu den Energiekosten leistet der Stromverbrauch bei der Beleuchtung von Nichtwohngebäuden. Somit lassen sich hohe Kosten durch die Nutzung von energieeffizienten Leuchtmitteln reduzieren.
- Die kumulierten Kosten aus Ersatzinvestitionen, regelmäßige Instandsetzungs-, Inspektions- und Wartungskosten der KG 400 können dazu führen, dass **Hightech-Gebäude höhere Betriebskosten als Lowtech-Gebäude haben**, obwohl diese höhere Energiekosten aufweisen.
- Abhängig von der genutzten Methode zur Erfassung der Energieverbräuche bzw. -bedarfe können die Ergebnisse der Energiekosten gegensätzlich voneinander abweichen.
- Schlussendlich zeigen die **Lebenszyklusberechnungen**, dass bei richtiger Ausführung Lowtech-Gebäude im Betrieb kostengünstiger als Hightech-Gebäude sein können. Demzufolge besitzen Lowtech-Gebäude das Potenzial, den Gebäudesektor durch eine ressourcenschonende und energiesparende Bauweise ganzheitlich zu verändern.

## Nutzung und Nutzerinnen/Nutzer

- **Nutzerinnen und Nutzer müssen für das Haus sensibilisiert werden**, indem Bewusstsein für nachhaltiges Bauen geschaffen wird und ihnen gewisse Mechanismen erklärt werden (z. B. Trägheit des Heizsystems). Das Gebäude muss kennengelernt und eine Beziehung aufgebaut werden, um auch im Jahreszyklus zu wissen, wie und unter welchen Bedingungen es optimal funktioniert.
- Die **Erwartungshaltungen der Nutzerinnen und Nutzer** an neue Gebäude und den Komfort darin sind meist sehr groß. Eine frühzeitige Information über die Eigenschaften des Gebäudes und seine Funktionsweise sind zentral, um diesen oft falschen Erwartungshaltungen zu begegnen.
- Dazu braucht es **Konzepte für die Kommunikation und eine Begleitung der Nutzerinnen und Nutzer**, um ausreichend zu informieren, zu erklären, Verständnis zu vermitteln und falschen Erwartungshaltungen zu begegnen. Diese Begleitung der Nutzerinnen und Nutzer soll Vorbehalten begegnen und Motivation und eine gewisse Offenheit der Nutzerinnen und Nutzer fördern, sich mit dem Gebäude auseinanderzusetzen und sich darauf einzulassen.
- **Aushandlungsprozess und Commitment der Nutzerinnen und Nutzer:** Individuelle Eingriffe der Nutzerinnen und Nutzer ins System sind oft nicht zielführend (z. B. bei trägen Heizsystemen) und können Unzufriedenheit und Frustration fördern. Dazu braucht es neben einem Verständnis für das System auch Kompromissbereitschaft und Commitment – vor allem in Großraumbüros – um möglichst optimale Bedingungen und Komfort für alle Nutzerinnen und Nutzer herzustellen. Um diesen Aushandlungsprozess zu begleiten und zu moderieren, braucht es verantwortliche (interne oder externe) Personen.



## Bewertung von Lowtech-Lösungen im Gebäudebereich

Die unterschiedlichen Studien zeigen, dass je nach Standort, Gebäudefunktion, -konstruktion und -größe, Nutzerinnen- und Nutzerprofil usw. eine unterschiedliche Herangehensweise an technikreduzierte Lowtech-Strategien und ihre Umsetzung gefragt ist. Individuell gefundene Lösungen für die jeweiligen Aufgabenstellungen sollen im Zielbereich des konzipierten Lowtech Readiness Indicators (LowTRI) liegen, um hohe Qualitäten auf Basis klimaverträglicher Lösung bei möglichst geringem Gebäudetechnikeinsatz zu ermöglichen.

## Bewertungskriterien

Ein optimierter Gebäudeentwurf sowie intelligent eingesetzte Gebäudekomponenten ermöglichen es, die zur Gewährleistung des Nutzerinnen- und Nutzerkomforts erforderliche Sachtechnik gering zu halten. Um bestehende Lösungen vor allem im Spektrum von Lowtech, aber auch im Übergangsbereich zu Hightech-Lösungen bewerten und optimieren sowie eine robuste und richtungsstabile Lowtech-Strategie entwickeln zu können, ist die Formulierung dieser Techniken und Praktiken als soziotechnische Systeme bzw. als soziale Praktiken im Umgang mit Techniken oder Gebäuden hilfreich. Eine Präzisierung der Fragestellung, ob Nutzerinnen- und Nutzerkomfort durch Lowtech-Konzepte vergleichbar oder sogar besser als durch Hightech-Konzepte erreicht werden kann, ist in diesem umfassenden Sinne wesentlich dafür, nicht unpassende Vergleiche zu ziehen, sondern wissenschaftlich korrekt Aufwände sowohl in technischen als auch sozialen (und kommunikativen) Teilsystemen zu erheben und in unterschiedlichen Gesamtsystemen mit unterschiedlichem „Technikanteil“ hinsichtlich thermischer Behaglichkeit, Nutzerinnen- und Nutzerzufriedenheit, Lebenszykluskosten sowie Klima- und Ressourcenschonung zu vergleichen.

Die folgenden Kriterien können für die Bewertung von Gebäuden insbesondere in Hinblick auf Lowtech-Qualitäten operationalisiert werden:

- Technisierungsgrad, eingesetzte Komponenten
- Regelbarkeit, Automatisierung
- Investitionskosten und/oder Anteil TGA
- Betriebskosten (therm. und elektr. Energie, Facility Management)
- Instandsetzungs- und Wartungsaufwand, Wartungsintervalle, Reparierbarkeit (Lebenszykluskosten)
- Interaktionsmöglichkeit bzw. Aufwand Nutzerinnen und Nutzer
- Nutzungsflexibilität/Anpassbarkeit
- Primärenergie nicht erneuerbar (PENRE), Treibhauspotenzial Betrieb bzw. über den gesamten Lebenszyklus
- Adaptierbarkeit an den Klimawandel
- Komfort/Behaglichkeit

Die folgenden Rahmenbedingungen sollten dabei berücksichtigt werden:

Umweltbedingungen

- Klimazone, Höhenlage, Umfeld (z. B. Gewässer)
- Ausrichtung des Gebäudes
- lokale Energieressourcen erheben

Skaleneffekte, Konstruktion und rechtliche Rahmenbedingungen

- Dichte der Verbauung
- Grundrissgestaltung, Trakttiefen
- Öffnungen (Orientierung, Größe)

Potenzial zur Einbindung der Akteure

- Bauherr: Aufklärung über Auswirkungen bestimmter Planungsschritte (z. B. Bedarfsplanung)
- Nutzerinnen und Nutzer: soziale Begleitung während Bau- bzw. Sanierungsphase und zumindest der ersten Betriebsjahre

Auf der Grundlage von Recherche und Befragungen wurde das folgende fünfteilige Hauptkriterienset abgeleitet, das sich gegebenenfalls in Unterkriterien differenziert:

| Skalierung auf Grundlage Expertinnen und Experten IBO, FH TW |                              |                                          |                                                                                                                                                                    |          |
|--------------------------------------------------------------|------------------------------|------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------|
| Gewichtung                                                   | Hauptgruppen                 | Bewertungskriterien                      | Indikatoren, Nachweise                                                                                                                                             | Sub-Gew. |
| Aufwand "soziotechnisch"                                     | Gebäudetechnik               | Technisierungsgrad (Herstellungsaufwand) | Gebäudetechnikkosten, Investkosten absolut pro m² NF, dazu Anteil Gebäudetechnik an Gesamtbaukosten und Gesamterrichtungskosten, Graue Energie, CO <sub>2</sub> eq | 25       |
|                                                              |                              | Wartung Gebäudetechnik                   | Kosten, Graue Energie, CO <sub>2</sub> eq                                                                                                                          | 20       |
|                                                              |                              | Instandsetzung Gebäudetechnik            | Kosten, Graue Energie, CO <sub>2</sub> eq                                                                                                                          | 20       |
|                                                              |                              | Komplexitätsgrad                         | Anzahl Komponenten und Regler, Komplexitätsgrad, Aufwand MSR, von Nutzerinnen und Nutzern, Hauswart, Spezialfirma bewältigbar?                                     | 30       |
|                                                              |                              | Fremdenergie für Maßnahme(n)             | Hilfsenergie, Kosten, Graue Energie, CO <sub>2</sub> eq                                                                                                            | 5        |
|                                                              | Bautechnik                   | Aufwand Bautechnik                       | Investkosten Bau, Graue Energie, CO <sub>2</sub> eq Errichtung                                                                                                     | 80       |
|                                                              |                              | Instandsetzung Bautechnik                | Kosten, Graue Energie, CO <sub>2</sub> eq                                                                                                                          | 20       |
| Qualitäten                                                   | Nutzerinnen und Nutzer aktiv | Aufwand Nutzerinnen und Nutzer           | Zeit, inhaltliche Anforderungen, Aufmerksamkeit (z.B. Fensterlüften, Sonnenschutz schliessen etc.)                                                                 | 50       |
|                                                              |                              | Komplexitätsgrad Bedienung               | Informationsaufwand, wird auf unterschiedliche Gruppen Rücksicht genommen, Technikaffinität erforderlich?                                                          | 50       |
|                                                              | Abweichung Komfortgrenzen    | Thermischer Komfort                      | EN 16798-1, Sommer ergänzt Klasse I bis V, dynamischer Komfort, Häufigkeit, lokaler Diskomfort; Winter Klasse II Messung/Befragung oder Gebäudesimulation          | 70       |
|                                                              |                              | Qualität Raumluft                        | EN 16798-1, Klasse I bis IV, Häufigkeiten                                                                                                                          | 30       |
|                                                              | Energie/ Klimabelastung      | Energie/Klimabelastung                   | Endenergie, Graue Energie, Kosten, CO <sub>2</sub> eq, dynamische Qualität,                                                                                        | 100      |

**Tabelle 14:** Gewichtungsfaktoren für Aggregation „Lowtech Readiness Indicator – LowTRI“

Alle Kriterien werden anhand von Indikatoren beschrieben. Diese werden auf der Basis der jeweils minimalen und maximalen Kennwerte in Prozentwerte zwischen 0 und 100 % überführt.

Geringe Werte in den Hauptgruppen „Gebäudetechnik“ und „Energie/Klimabelastung“ sind „günstige“ Bewertungen im Sinne des Lowtech-Ansatzes, wo „weniger“ Aufwand und Klimabelastung angestrebt werden. Bei den Aspekten Bautechnik und Nutzerinnen und Nutzer „aktiv“ sind höhere Werte in einem gewissen Rahmen auch bei einem Lowtech-Ansatz möglich, da beispielsweise mehr Eingriffsmöglichkeiten auch ein Mehr an Aufwand bedeuten.

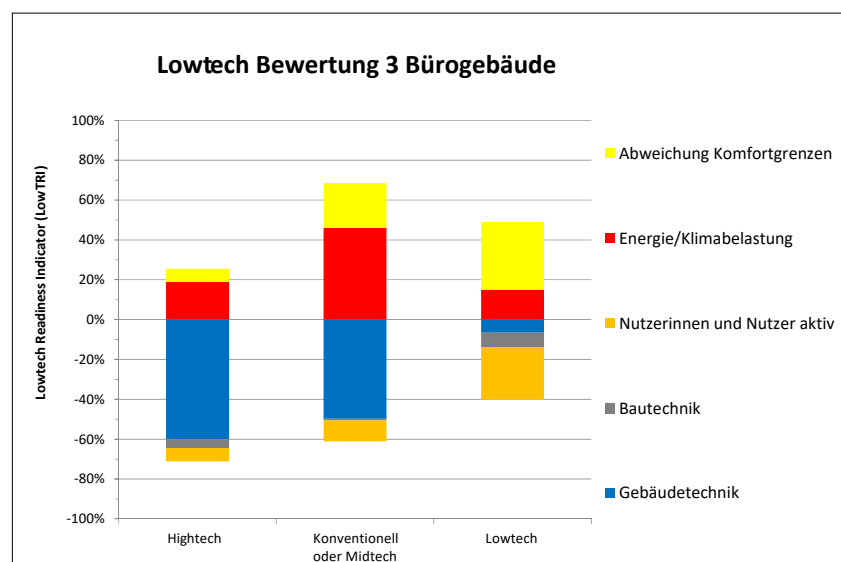
### Einige Annahmen zur Bewertung

Lowtech zielt auf die Betriebsphase: Intelligente Planung für Lowtech-Gebäude kann durchaus komplex sein, um gut abgestimmte Lösungen zu finden und umzusetzen. Da Lowtech (noch) kein klar definierter Begriff ist, wird hier vorgeschlagen, die aus unterschiedlichen Vorprojekten destillierten Konzepte möglichst kompakt in eine nachhal-

tig belastbare Definition (im Sinne einer prinzipiell zertifizierbaren Beschreibung von Kriterien, Zielwerten und Indikatoren) zu überführen. Dies gilt auch für Einstufung von einzelnen Lowtech-Maßnahmen z. B. im Rahmen von Bauteilen bzw. Gebäudetechnologien: Im Betrieb können sie als Lowtech eingestuft werden, obwohl die wesentlichen Komponenten in Hightech-Industriebetrieben hergestellt werden (z.B. PV-Anlagen, PV-Zellen, Kupfer für Kabel, Kunststoffe für Isolierung).

Für die Case Studies lagen diese Daten nur in Teilen vor, daher wurde nach den Befragungsergebnissen eingestuft. Für die Abbildung 38 wurden deshalb folgende Annahmen getroffen:

- Hightech-Gebäude (hoher Gebäudetechnikanteil an Gesamtkosten)
- konventionelles Bürogebäude (Qualität aktueller Neubau)
- Lowtech-Gebäude (besonders niedriger Gebäudetechnikanteil)



**Abbildung 38:** Beispielhafte Bewertung eines Bürogebäudes mit unterschiedlicher Ausstattung:  
Je niedriger die Kennwerte, desto günstiger.

### Zielwerte von Lowtech-Gebäuden:

Auf der Grundlage von technischen Bewertungen, der Recherche zu Lowtech-Konzepten und den Befragungen wird die folgende Gesamtbewertung für nachhaltige Lowtech-Gebäude vorgeschlagen:

#### Musskriterien:

**Kriterium Gebäudetechnik  $\leq 20\%$ :** Geringer Aufwand für Gebäudetechnik in der Herstellung, Wartung und Instandsetzung, ein geringer Komplexitätsgrad und eine robuste Gebäudetechnik sind die Voraussetzung für Lowtech-Gebäude.

**Niedrige Energie/Klimabelastung  $\leq 20\%$ :** Lowtech-Gebäude sind nur dann zukunftsfähig, wenn sie mit der 100 % Versorgung mit erneuerbaren Energieträgern bzw. Klimaneutralität kompatibel sind.

**Graue Energie/Embodied Carbon  $\leq 20\%$ :** Lowtech-Gebäude bedienen sich an Bau-

stoffen oder Gebäudetechnikkomponenten, die einen geringen ökologischen Fußabdruck haben und nach Nutzungsende wieder gut weiterverwendet oder -verwertet werden können.

#### Sollkriterien:

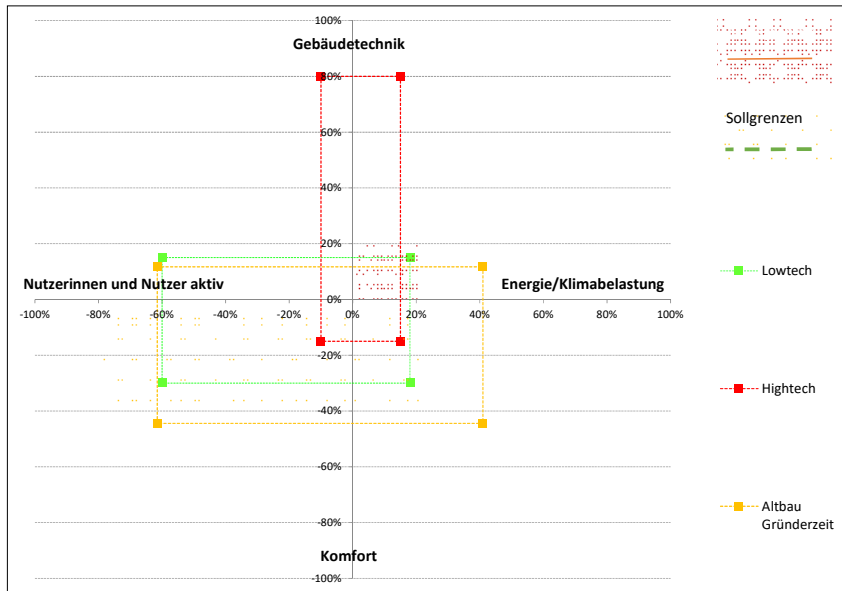
**Abweichung Komfortgrenzen  $\leq 40\%$ :** Wenn die Nutzerinnen und Nutzer gut informiert sind und ein Lowtech-Gebäude erwarten, sind die Komfortgrenzen andere als in Hightech-Gebäuden mit Vollklimatisierung: siehe adaptives Komfortmodell, aber auch Befragungsergebnisse und Literatur.

**Aufwand Nutzerinnen und Nutzer „aktiv“  $\leq 80\%$ :** Nutzerinnen und Nutzer sind in Lowtech-Gebäuden meist stärker gefragt und müssen gut informiert sein, um das Potenzial des Gebäudes bezüglich Komfort und Energie/Klimabelastung ausschöpfen zu können. Eine professionelle Begleitung ist bei Bezug, aber auch während des Betriebs notwendig. Eine Abstimmung mit dem Arbeitsschutz etc. ist sinnvoll.

#### Kriterien informativ:

**Aufwand für die Bautechnik: Dieser wird informativ angegeben.** Es gibt keine Einschränkung für eine positive Einstufung eines Bauwerks als Lowtech-Gebäude. Dies ist vor allem der meist langen Nutzungsdauer und dem geringen Wartungsaufwand der baulichen Komponenten im Vergleich zu den gebäudetechnischen geschuldet.

Für die drei typischen Gebäude könnten Ergebnisse und Zielwerte wie folgt dargestellt werden:



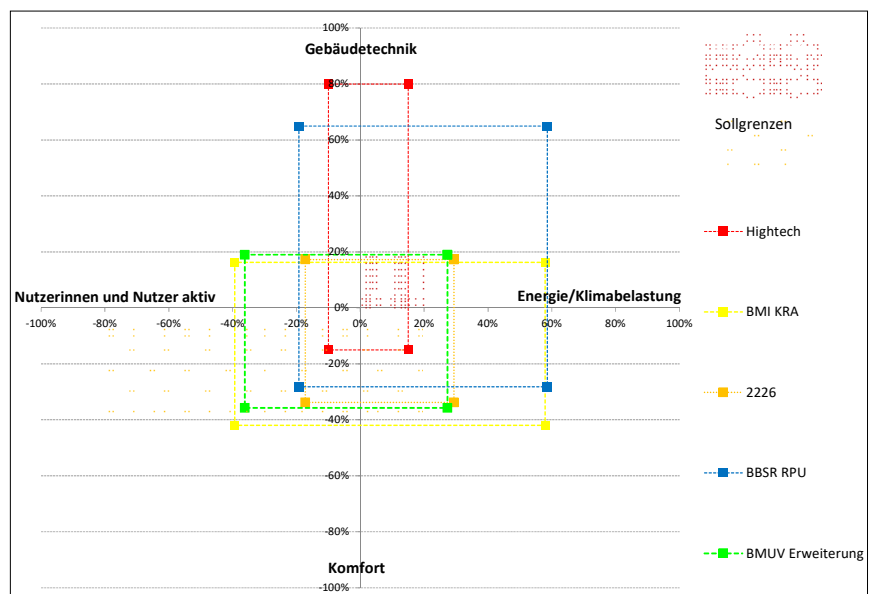
**Abbildung 39:** Bewertungsmatrix. Lesebeispiel: Projektvariante-Rechteck muss innerhalb des Muss-Ziel-Quadrats liegen und sollte auch innerhalb des Soll-Ziel-Quaders liegen. Die Grenzen zum Aufwand Nutzerinnen und Nutzer werden gebäudespezifisch festgelegt. Das Musskriterium Aufwand Bautechnik/ Errichtung/embodied carbon wird über die Strichart des Rechtecks dargestellt, durchgezogen bedeutet, dass das Gebäude den Anforderungen entspricht, wenn strichliert, ist das nicht der Fall.

Auf der Grundlage des vorgeschlagenen integralen Lowtech-Bewertungsmodells wurden die im Rahmen der Studie „**Nutzerkomfort durch Lowtech Konzepte in Gebäuden**“

untersuchten Gebäude bewertet. Im Rahmen des Projekts konnte für die meisten Kriterien eine qualitative Einstufung vorgenommen werden (Befragungen, Einstufung von Fachleuten, qualitative Kataloge), eine detaillierte (semi-)quantitative Einstufung wurde für den Erweiterungsbau des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMUV) in Berlin durchgeführt.

Nach der Aggregation der Bewertungskriterien wurde deutlich, dass kein Gebäude im Bereich Energie/Klimabelastung den Grenzwert einhalten kann. Das ist vor allem der unzureichenden Nutzung der lokalen Energieressourcen (PV) und teilweise der ineffizienten Gebäudehülle und -technik geschuldet. Der Grenzwert für die Gebäudetechnik wird von den Gründerzeitgebäuden, dem Haus 2226 und dem Erweiterungsbau des BMUV unterschritten. Es wird klar ersichtlich, dass keines der untersuchten Gebäude in allen vier Kriterien die Grenzwerte unterschreitet. Insgesamt bietet das BMUV-Gebäude einen guten Standard im Vergleich zu den untersuchten Bestandsgebäuden. Zu beachten ist, dass die Abweichung des thermischen Komforts im Falle des BMUV simuliert und nach Einstufungsmethodik um eine Klasse abgestuft wurde (im Vergleich zur Einstufung der Bestandsgebäude über Befragungen). Im Bereich Bautechnik kann durch die Holz-Rahmenbauweise gegenüber anderen Neubauten die aufgewendete Graue Energie deutlich reduziert werden.

Nachfolgend werden die Ergebnisse im LowTRI-Diagramm dargestellt:



**Abbildung 40:** Vorschlag für den Zielbereich von LowTRI-Gebäude

Es zeigt sich, dass keines der Gebäude ein nachhaltiges Lowtech-Gebäude laut der hier vorgelegten Definition darstellt. Allerdings erscheint die Bewertung von Lowtech-Gebäuden wie oben dargestellt schwierig, da es sehr viele unterschiedliche Wege zum Ziel gibt, speziell wenn das Umfeld eine deutlich größere Rolle spielt als in Standardlösungen. Hier gleicht die Haustechnik die Umgebungsunterschiede aus. Sollen ähnliche Behaglichkeitsniveaus mit einem geringeren Haustechnikanteil erreicht werden und die Nutzerinnen- und Nutzerzufriedenheit zumindest gleich hoch sein, muss in

Bautechnik bzw. aktive Nutzerinnen und Nutzer investiert werden. Diesen Sachverhalt versucht der LowRTI abzubilden und anschaulich darzustellen.

## **Komplexität reduzieren**

Der britische Architekturkritiker Reyner Banham thematisierte bereits 1965 den übermäßigen technischen Einfluss auf die Architektur und kritisierte die damit verbundenen „mechanical invasion“ unserer Gebäude [Banham 1965]. In der heutigen Baupraxis zeigt sich, dass ein Übermaß an komplexer Gebäudetechnik häufig mehr Probleme als Nutzen bereitet. Dies betrifft sowohl den Planungsprozess als auch den Gebäudebetrieb, der darüber hinaus eine dichte Abfolge aufwendiger Wartungs- und Instandsetzungszyklen nach sich zieht. Die Techniknutzerinnen und Nutzer sind meist damit überfordert, die Konsequenzen des Gebrauchs neuester Technik abzuschätzen, da diese weitgehend unbekannt oder wenig transparent sind. Wie von Kaminski beschrieben, entsteht eine Erwartungshaltung an Technik und ihre Performance [vgl. Kaminski 2010], die in vielerlei Hinsicht nicht erfüllt wird.

Wie die Ergebnisse des Projekts „Nutzerkomfort durch Lowtech Konzepte in Gebäuden“ zeigen, korreliert die Nutzerinnen- und Nutzerzufriedenheit nicht mit dem technischen Ausstattungsgrad der Gebäude. Ein wesentlicher Faktor für die Zufriedenheit scheint dahingegen die Möglichkeit einer unmittelbaren Einflussnahme auf das Raumklima zu sein. In diesem Fall werden sogar weniger behagliche Raumtemperaturen weit mehr akzeptiert, als dies bei einem maschinell erzeugten Raumklima normalerweise üblich ist.

Die stetig zunehmenden technischen Anforderungen und der damit verbundene Technisierungsgrad von Gebäuden scheinen in diesem Zusammenhang eine wesentliche Ursache für nicht-intendierte Sekundäreffekte wie Rebounds, Akzeptanzprobleme und Diskomfort zu sein. Dies führt zu einer wachsenden Kritik von Planerinnen und Planern sowie Gebäudenutzerinnen und Nutzern. Infolgedessen sind in den vergangenen Jahren zahlreiche Veröffentlichungen und Forschungsprojekte entstanden, die das Thema eines einfachen und technikreduzierten Bauens aufgreifen und ein grundsätzliches Umdenken fordern [vgl. u.a. BBSR 2020 und 2023, Energieinstitut Vorarlberg 2021, Haselsteiner 2017 und 2022, Nagler 2022]. Die Umsetzung von sogenannten Lowtech-Strategien setzen auf einfache, robuste, langlebige, klimaangepasste und benutzerinnen- und benutzerfreundliche Bauweisen, die auch den unmittelbaren Bezug zum Gebäude und dessen Umweltwirkung herstellen sollen.

Zum Zeitpunkt des Erscheinens dieser Broschüre ist der detaillierte Endbericht des Projekts „Robuste, nutzerfreundliche und kostengünstige TGA in Gebäuden“ bereits auf der Website des BBSR verfügbar:

<https://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/forschung/programme/zb/Auftragsforschung/5EnergieKlimaBauen/2019/robuste-tga/01-start.html>

Die beiden anderen Berichte werden ebenfalls im Laufe des Jahres dort bzw. auf der Website des Innovationsprogramms Zukunft Bau verfügbar sein.

## Studien zu Lowtech im Gebäudebereich

Folgende Studien zum Thema Lowtech sind zu empfehlen, die das Thema sowohl theoretisch beleuchten als auch Praxisbeispiele liefern. Primär sind zwei Studien zu nennen:

Die im Juli 2016 unter der Leitung von Edeltraud Haselsteiner abgeschlossene Studie **„Lowtech – High Effect! Eine Übersicht über nachhaltige Lowtech-Gebäude“** [Haselsteiner 2017] liefert eine Übersicht über nachhaltige Lowtech-Gebäude durch Präsentation von innovativen Ansätzen, systemischen Lösungswegen und realisierten Beispielen. Es werden internationale Beispiele realisierter Gebäude angeführt – gegliedert in die möglichen Lowtech-Strategien Funktion, Material und System.

Die Studie umfasst neben dem Endbericht drei Anhänge mit unterschiedlicher Themensetzung: In Annex I erfolgt eine mögliche Bewertung bzw. qualitative Darstellung von Lowtech-Ansätzen anhand von zehn Beispielen aus unterschiedlichen Gebäudenutzungsfeldern. Annex II untersucht mögliche Parallelen zwischen naturgegebenen, evolutionsbedingt optimierten Systemen wie die bionische Formgebung mit potenziellen Anwendungsfeldern in der Lowtech-Architektur. Annex III behandelt die sogenannte Suffizienz in der Haustechnik, es werden Chancen und Risiken von Lowtech-Maßnahmen sowie fünf realisierte Beispiele mit Lowtech-Komponenten angeführt.

Unter Lowtech verstehen die Studienautorinnen und -autoren zusammenfassend die **Balance zwischen Energieeinsparung, Kosten und Nutzungskomfort**. Als Planungsgrundlagen für Lowtech-Gebäude dienen die Verbrauchsminimierung hinsichtlich Energie und Betriebsmittel, lange Nutzung von Gebäudeteilen, kurze Transportwege bei Bau und Betrieb, die gute Rückbaufähigkeit, flächenschonendes Bauen sowie die grundlegende Bedarfshinterfragung. Ein geringer Einsatz von Technologie über den gesamten Lebenszeitraum – das heißt in der Planungs-, Bau-, Betriebs-, Erneuerungs- und Rückbauphase – soll gewährleistet werden.

Im Zeitraum 2015 bis 2020 wurde unter Mitwirkung von fünf Institutionen aus Deutschland, Österreich, der Schweiz und Liechtenstein die interreg-Studie **„Konzepte für energieeffiziente, klimaverträgliche „Lowtech“-Gebäude im Bodensee-raum“** [Interreg 2021] durchgeführt. Das Projekt baut auf einer von der Universität Liechtenstein durchgeführten Vorstudie [Ritter 2014] auf, im Rahmen derer die Hauptaussagen und Thesen zu Lowtech von 22 Personen aus Architektur und Wissenschaft zusammengeführt wurden.

Zielsetzung des Projekts war die *langfristige und nachhaltige Reduktion des Energieverbrauchs im Gebäudesektor in Neubau und Bestand, bei kritischer Auseinandersetzung mit Haustechnik und Steuerungskomponenten. Angestrebt werden klimaverträgliche Bauten mit hohem Komfort, geringem Energiebedarf und langfristig überdurchschnittlicher Werterhaltung durch an den Klimawandel angepasste Bauweise* [Mair 2016]. Nach gemeinsam erarbeiteter Definition **sind Lowtech-Gebäude energieeffizient, ressourcenschonend und wirtschaftlich, robust und auf eine lange Lebensdauer ausgelegt**. Sie bieten den Nutzenden Behaglichkeit im gesamten Jahresverlauf. Die Gebäudetechnik im Lowtech-Gebäude ist auf unbedingt notwendige Komponenten beschränkt. Einfache Wartung und Unterhalt der verbleibenden technischen Komponenten stehen immer im Vordergrund, wobei passive Systeme den aktiven technischen Systemen vorzuziehen sind.

Im Rahmen der Vorstudie wurde ein Anforderungsraster für Lowtech-Gebäude hinsichtlich Energie- und Ressourcenverbrauch, Behaglichkeit und thermischem Komfort, Raumluftqualität und Dauerhaftigkeit erstellt, mithilfe dessen Gebäude im geografischen Projektraum identifiziert wurden.

Pro teilnehmendem Institut wurden zwei bis drei Beispielgebäude aus dem Lowtech-Bereich in der Planungs-, Ausführungs- und Monitoringphase begleitet.

## **Studien mit Befragungen zur Nutzerinnen- und Nutzerzufriedenheit**

Studien, welche den Komfort in energieeffizienten Gebäuden (sowohl Büro- als auch Wohngebäude) durch Befragung von Nutzerinnen und Nutzern, Planerinnen und Planern sowie anderweitig involvierten Personen erhoben haben, sind im Folgenden beispielhaft aufgelistet:

- Al Horr, Y. et al.: Occupant productivity and office indoor environment quality: A review of the literature. *Building and Environment* 105, 369–389 (2016).
- Arif, M.; Katafygiotou, M.; Mazroei, A.; Kaushik, A.; Elsarrag, E.: Impact of indoor environmental quality on occupant well-being and comfort: A review of the literature. *International Journal of Sustainable Built Environment* 5, 1–11 (2016)
- Bordass, B., Leaman, A. & Ruyssevelt, P.: Probe Strategic Review 1999 – Report 4: Strategic Conclusions. *Usable Buildings* (1999)
- Cox, C. et al.: HOPE: Health Optimisation Protocol for Energy-efficient Buildings Pre-normative and socio-economic research to create healthy and energy-efficient buildings (2005). doi: 10.13140/RG.2.2.33658.80328
- Frontczak, M. et al.: Quantitative relationships between occupant satisfaction and satisfaction aspects of indoor environmental quality and building design. *Indoor air* 22, 119–131 (2012)
- Galatioto, A.; Leone, G.; Milone, D.; Pitruzzella, S.; Franzitta, V.: Indoor Environmental Quality Survey: A Brief Comparison between Different Post Occupancy Evaluation Methods. *Advanced Materials Research* 864–867, 1148–1152 (2013)
- Gossauer, E.: Nutzerzufriedenheit in Bürogebäuden. Eine Feldstudie. Dissertation TU Karlsruhe. (2008)
- Gossauer, E.; Wagner, A.: Post-occupancy evaluation and thermal comfort: state of the art and new approaches. *Advances in building energy research* 1, 151–175 (2007)
- Grabler-Bauer G. et al.: Das Passivhaus in der Praxis – Strategien zur Marktaufbereitung für das Passivhaus im Osten Österreichs. *Berichte aus Energie- und Umweltforschung* 24/2002, Programmlinie Haus der Zukunft, Hrsg.: BMVIT
- Hellwig, R. T.: Thermische Behaglichkeit – Unterschiede zwischen frei und mechanisch belüfteten Gebäuden aus Nutzersicht. Dissertation Universität München (2005)
- Hutter, H.-P. et al.: Auswirkungen energiesparender Maßnahmen im Wohnbau auf die Innenraumluftqualität und Gesundheit. Forschungsvorhaben F 1469, Endbericht. Gefördert aus Mitteln der Wohnbauforschung des Bundesministeriums für Wirtschaft und Arbeit (2005)

- Knotzer, A. et al.: low\_vent.com. Konzepte für die „Lowtech“ Komfortlüftung in großvolumigen Wohngebäuden und deren Nutzungskomfort. Programmlinie NEUE ENERGIE 2020 (2015)
- Li, P., Froese, T. M.; Brager, G.: Post-occupancy evaluation: State-of-the-art analysis and state-of-the-practice review. *Building and Environment* 133, 187–202 (2018)
- Paone, A.; Bacher, J.-P.: The impact of building occupant behavior on energy efficiency and methods to influence it: A review of the state of the art. *Energies* 11, 953 (2018)
- Park, J. Y.; Nagy, Z.: Comprehensive analysis of the relationship between thermal comfort and building control research-A data-driven literature review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 82, 2664–2679 (2018)
- Rohracher, H. et al.: Akzeptanzverbesserung bei Niedrigenergiehaus-Komponenten. Impulsprogramm nachhaltig wirtschaften. Programmlinie Haus der Zukunft, Hrsg.: BMVIT (2001)
- Rojas, G. et al.: Lüften und Heizen in Passivhäusern in Österreich. Variantenvergleich auf Basis von Behaglichkeit und Nachhaltigkeit. *Berichte aus Energie- und Umweltforschung* 00/2010, Programmlinie Haus der Zukunft, Hrsg.: BMVIT
- Schakib-Ekbatan, K.; Wagner, A.; Lützkendorf, T.: Bewertung von Aspekten der soziokulturellen Nachhaltigkeit im laufenden Gebäudebetrieb auf der Basis von Nutzerbefragungen: Abschlussbericht (2012)
- Schulze, E., Wilbrandt, A., Dietel, K.; Oesterreich, D.: Sozialwissenschaftliches Monitoring des „Effizienzhaus Plus mit Elektromobilität“. (Berliner Institut für Sozialforschung GmbH, 2013)
- Tappler, P. et al.: Lüftung 3.0 – Bewohnergesundheit und Raumluftqualität in neu errichteten, energieeffizienten Wohnhäusern. Endbericht einer Studie im Rahmen des Programms „Neue Energien 2020“, Klima- und Energiefonds (2014)
- Wagner, A. et al.: Nutzerzufriedenheit in Bürogebäuden. Empfehlungen für Planung und Betrieb (2015)
- Wagner, A.; Schakib-Ekbatan, K.: Nutzerzufriedenheit als ein Indikator für die Beschreibung und Beurteilung der sozialen Dimension der Nachhaltigkeit. Stuttgart (2010)

## Themenrelevante Regelwerke

Bei der Erarbeitung der Bewertungskriterien für Lowtech-Konzepte in Gebäuden dienen auch themenrelevante Regelwerke wie die EN 15232 sowie der in dessen Anlehnung konzipierte Smart Readiness Indicator (SRI) als Hilfestellungen. Normwerke zu thermischem Komfort:

- ISO 7730: 2006 05 01: Ergonomie der thermischen Umgebung – Analytische Bestimmung und Interpretation der thermischen Behaglichkeit durch Berechnung des PMV- und des PPD-Indexes und Kriterien der lokalen thermischen Behaglichkeit
- EN 15251 bzw. nunmehr EN 16798-1: 2019 11 01: Energetische Bewertung von Gebäuden – Teil 1: Eingangsparameter für das Innenraumklima zur Auslegung und Bewertung der Energieeffizienz von Gebäuden bezüglich Raumluftqualität, Temperatur, Licht und Akustik – Module M1–6

- EN 15232-1: 2017-12-01: Energieeffizienz von Gebäuden – Einfluss von Gebäudeautomation und Gebäudemanagement
- DIN V 18599: 2018-09: Energetische Bewertung von Gebäuden – Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung
- Smart Readiness Indicator for buildings (Waide Strategic Efficiency Europe), Stand 9/2019

- Auer 2020; Auer, T.; Lauss, L.; Heissler, M.; Maderspacher, J.; Reiß D., Mehnert, J.; Rumpe, B.; Stüber, S.; Hannen, M.; Plessner, S.; Pinkernell, C.; Kröker, A.; Gentemann, R., 2020: Big Data in der Gebäudeautomation. Forschungsbericht, Lehrstuhl für Gebäudetechnologie und klimagerechtes Bauen, Technische Universität München. Zugriff: <https://mediatum.ub.tum.de/1546757doi:10.14459/2020md1546757>.
- Armstrong McKay 2022; Armstrong McKay, D. I. et al.: Exceeding 1.5°C global warming could trigger multiple climate tipping points. Science. Volume 377 doi: 10.1126/science.abn795.
- Banham 1965; Banham, Reyner: "A Home is not a House", in: Art in America, Nr. 2, S. 70–79.
- BAUA 2021; <https://www.baua.de/DE/Angebote/Rechtstexte-und-Technische-Regeln/Regelwerk/ASR/ASR-A3-5.html>.
- BBSR 2020; Lowtech im Gebäudebereich, Fachsymposium TU Berlin 17.05.2019 (2020). Reihe: Zukunft Bauen: Forschung für die Praxis, Band 21, BBSR, Bonn. <https://www.zukunftbau.de/neue-meldung/Lowtech-im-gebäudebereich-fachsymposium-tu-berlin-17052019>.
- BBSR 2023; Lowtech im Gebäudebereich, Fachsymposium TU Berlin 16.05.2022. (2023). Reihe: Zukunft Bauen: Forschung für die Praxis, Band 32, BBSR, Bonn. <https://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/veroeffentlichungen/zukunft-bauen-fp/2023/band-32.html>.
- Bettgenhäuser 2011; Bettgenhäuser K. et al.: Klimaschutz durch Reduzierung des Energiebedarfs für Gebäudekühlung. UBA, Dessau, [www.uba.de/uba-info-medien/3979.html](http://www.uba.de/uba-info-medien/3979.html).
- Bluyssen 2011; Bluyssen, P.; Janssen, S., Brink, L.; de Kluizenaar Y.: Assessment of wellbeing in an indoor office environment. Fuel and Energy Abstracts. 46.10.1016/j.buildenv, 2011.06.026.
- Boerstra 2010; Boerstra, A.: Personal control in future thermal comfort standards. Proceedings of Conference: Adapting to Change: New Thinking on Comfort. Gehalten auf der Adapting to Change: New Thinking on Comfort, Cumberland lodge, Windsor, UK, 9.–11. April 2010, London.
- Brager 2004; Brager, G.; Paliaga, G.; de Dear, R.; Olesen, B.; Wen, J.; Nicol, F., Humphreys, M.: Operable windows, personal control, and occupant comfort. ASHRAE Transactions, 110, 17–35, S. 32.
- Copernicus 2024; Copernicus: Global Climate Highlights 2023. Copernicus Climate Change Service (C3S), European Union's Earth Observation Programm, 2024, <https://climate.copernicus.eu/copernicus-2023-hottest-year-record>.
- De Dear 2002; De Dear, R. J.; Brager, G. S.: Thermal comfort in naturally ventilated buildings: revisions to ASHRAE Standard 55. In: Energy and Buildings, 34 (6), S. 549–561.
- Dena 2021; Deutsche Energie-Agentur GmbH. Statistiken und Analysen zur Energieeffizienz im Gebäudebestand. Online, 2021. [https://www.dena.de/fileadmin/user\\_upload/8162\\_dena-Gebaeudereport.pdf](https://www.dena.de/fileadmin/user_upload/8162_dena-Gebaeudereport.pdf).
- Dena 2022; Deutsche Energie-Agentur GmbH. Keine Energiewende ohne Wärmewende. Online, 2022. <https://www.dena.de/themen-projekte/energieeffizienz/gebaeude/>.
- Dexter 2001; Dexter, A.; Pakanen, J.: Building Energy Management System – Demonstration Automated Fault Detection and Diagnosis Methods in Real Buildings. Annex 34, International Energy Agency (IEA), Espoo, Finland, 2001.

- DIN V 18599-10 2018; DIN V 18599-10: Energetische Bewertung von Gebäuden – Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung – Teil 10: Nutzungsrandbedingungen, Klimadaten. Deutsches Institut für Normung, Berlin, Germany, 2018.
- DWD 2024; DWD: Klimatologischer Rückblick auf 2023: Das bisher wärmste Jahr in Deutschland. Deutscher Wetterdienst, Offenbach, Germany, 2024 [https://www.dwd.de/DE/leistungen/besondereereignisse/temperatur/20240201\\_klimarueckblick-2023.html](https://www.dwd.de/DE/leistungen/besondereereignisse/temperatur/20240201_klimarueckblick-2023.html).
- EUA 2024; EUA: European climate risk assessment. European Environment Agency, Copenhagen, Denmark, 2024, <https://www.eea.europa.eu/publications/european-climate-risk-assessment>.
- Energieinstitut Vorarlberg 2021; Energieinstitut Vorarlberg et al. (Hrsg): Low-Tech Gebäude. Prozess, Planung, Umsetzung, Dornbirn 2021.
- Fanger 1972; Fanger, P. O.: Thermal Comfort, Analysis and Applications in Environmental Engineering. McGraw-Hill, New York. 1972.
- Frischknecht 2020; Frischknecht, R. et al.: Umweltfußabdruck von Gebäuden in Deutschland. Kurzstudie zu sektorübergreifenden Wirkungen des Handlungsfelds „Errichtung und Nutzung von Hochbauten“ auf Klima und Umwelt, BBSR-Online-Publikation Bonn 2020 <https://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/veroeffentlichungen/bbsr-online/2020/bbsr-online-17-2020.html>.
- Gossauer 2008a; Gossauer E.; Wagner A.: Nutzerzufriedenheit und Komfort am Arbeitsplatz – Ergebnisse einer Feldstudie in Bürogebäuden. Bauphysik, 30. S. 52, 2008.
- Gossauer 2008b; Gossauer, E.: Nutzerzufriedenheit in Bürogebäuden – Eine Feldstudie. Universität Karlsruhe, Karlsruhe, 2008. doi: 10.5445/IR/1000007727.
- Grunning 2017; Grynning, S.; Lolli, N.; Waagø, S. I.; Risholt, B. D.: Solar shading in low energy office buildings-design strategy and user perception, 201, <https://doi.org/10/ggc8bg>.
- Haselsteiner 2017; Haselsteiner Edeltraud et al.: Lowtech – High Effect! Eine Übersicht über nachhaltige Lowtech-Gebäude, nachhaltig wirtschaften 20/2017 + Annex I, Annex II und Annex III.
- Haselsteiner 2022; Haselsteiner, E. (Hrsg): Robuste Architektur – Lowtech Design, München 2022. Mitwirkende Institute: FH Campus Wien, Lund University, Delft University of Technology und team gmi.
- Hellwig 2020; Hellwig, R.; Schweiker, M.; Boerstra, A.: The ambivalence of personal control over indoor climate – how much personal control is adequate? E3S Web of Conferences 172, 06010, 2020.
- Hopfe 2011; Hopfe, C.; Hensen, J.: Uncertainty analysis in building performance simulation for design support. Energy and Buildings, 43. Auflage, 2798-2805. 2011. [https://www.researchgate.net/publication/258291390\\_Uncertainty\\_analysis\\_in\\_building\\_performance\\_simulation\\_for\\_design\\_support](https://www.researchgate.net/publication/258291390_Uncertainty_analysis_in_building_performance_simulation_for_design_support).
- Huijts 2012; Huijts, N. M. A.; Molin, E. J. E.; Steg, L.: Psychological factors influencing sustainable energy technology acceptance: A review-based comprehensive framework. Renewable and sustainable energy reviews, 16(1), S. 525–531, 2012, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.08.018>.
- Humphreys 2004; Humphreys, M. A., J.; Nicol, F.: Do people like to feel neutral? Response to the ASHRAE scale of subjective warmth in relation to thermal preference, indoor and outdoor temperature. In: ASHRAE Transactions, 110(2), S. 569–577, 2004.

- Hutter 2017; Hutter HP; Moshhammer H; Wallner P.: Klimawandel und Gesundheit. Auswirkungen, Risiken, Perspektiven, Wien, 2017.
- Hutter 2023; Hutter, C. et al.: Kühle Gebäude im Sommer. Anforderungen und Methoden des sommerlichen Wärmeschutzes. Ingenieurbüro Hausladen. Research report. Umweltbundesamt, 2023 Climate Change. <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/kuehle-gebaeude-im-sommer-0>.
- Interreg 2021; Interreg-Studie Lowtech-Gebäude (ABH020): Konzepte für energieeffiziente, klimaverträgliche „Lowtech“-Gebäude im Bodenseeraum. <https://www.interreg.org/projekte/P2/SZ4/ABH020> (Projektlaufzeit: 1.12.2015–31.03.2021)
- Mitwirkende Institute: Energieagentur Ravensburg gGmbH, Energieeffizientes Bauen (D), Energie- & Umweltzentrum Allgäu gGmbH (eza!) (D), Energieinstitut Vorarlberg (A), Energieagentur St. Gallen (CH), Universität Liechtenstein (FL).
- Ioannou 2015; Ioannou, A.: Energy performance and comfort in residential buildings: Sensitivity for building parameters and occupancy. *Energy and Buildings*, 92, 216–233, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.01.055>.
- IPCC 2023; IPCC: Climate Change 2023: Synthesis Report. Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Geneva, Switzerland, 2023 doi: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.
- Kahlenborn 2021; Kahlenborn, W.; Porst, L.; Voß, M.: Klimawirkungs- und Risikoanalyse 2021 für Deutschland. Forschungsbericht, Online, Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau, 2021. [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/5750/publikationen/2021-06-10\\_cc\\_26-2021\\_kwra2021\\_kurzfassung.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/5750/publikationen/2021-06-10_cc_26-2021_kwra2021_kurzfassung.pdf).
- Loftness 2018; Loftness, V.; Aziz, A.; Hartkopf, V.; Lam, K. P.; Lasternas, B.: Humans and Nature in the Loop: Integrating occupants & natural conditioning into advanced controls for high performance buildings, 2018, <https://doi.org/10/ggc8bf>.
- Maas 2024; Maas, A. et al.: Weiterentwicklung von Anforderungen an den sommerlichen Wärmeschutz. Ingenieurbüro Hauser. Research report. German Federal Institute for Research on Building, Urban Affairs and Spatial Development (BBSR). Zukunft Bau, 2024 <https://www.zukunftbau.de/mediathek/publikationen/forschungsberichte>.
- Mair 2016; Mair R.: Lowtech-Gebäude, Folien zum IBK Klimaschutzkongress 20. September 2016.
- Mayring 2016; Mayring, P.: Einführung in die qualitative Sozialforschung. 6. und überarbeitete Auflage, Weinheim und Basel, 2016.
- Mohs 2007; Mohs, C.; Kindsmüller, M. C.; Naumann, A. B.; Husslein, S.; Israel, J. H.: Intuitive Benutzung als Ziel in der Produktentwicklung. In: Röse, K.; Brau, H.; (Hrsg.): Usability Professionals 2007, S.165–168. Fraunhofer IRB, Stuttgart. S. 27 ff.
- Mojic 2018; Mojic, I.; Luzzatto, M.; Haller, M.; Lehmann, M.; Benz, M.; van Velsen, S.: ImmoGap: Einfluss der Kombination aus Nutzerverhalten und Gebäudetechnik auf den Performance Gap bei Mehrfamilienhäuser. Rapperswil, 2018. Verfügbar unter [https://www.minergie.ch/media/501469\\_haller\\_sb\\_immogap.pdf](https://www.minergie.ch/media/501469_haller_sb_immogap.pdf).
- Moosmann 2003; Moosmann, C.: Studie zur Leuchtdichte Verteilung an Bildschirmarbeitsplätzen. Diplomarbeit an der Universität Fridericiana Karlsruhe (TH), Fakultät für Architektur, 2003.
- Nagler 2022; Nagler, Florian (Hrsg): Einfach Bauen. Ein Leitfaden, Basel 2022
- Rammert 2000; Rammert, W.: Was heißt Technik heute? In: Technik aus soziologischer Perspektive, Wiesbaden, Verlag für Sozialwissenschaften, 2000.

- Ritter 2014; Ritter V.: Vorstudie Nachhaltiges Lowtech-Gebäude. 12.09.2014 Version V1.5. Universität Liechtenstein, im Auftrag der Internationalen Bodensee Konferenz (IBK).
- Schakib-Ekbatan 2011; Schakib-Ekbatan, K. et al.: Bewertung von Aspekten der soziokulturellen Nachhaltigkeit im laufenden Gebäudebetrieb auf Basis von Nutzerbefragungen. Fraunhofer IRB Verlag, 2011.
- Schakib-Ekbatan 2012; Schakib-Ekbatan K, Wagner A.; Lützkendorf, T.: Bewertung von Aspekten der soziokulturellen Nachhaltigkeit im laufenden Gebäudebetrieb auf der Basis von Nutzerbefragungen. Stuttgart, Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau, 2012.
- Schiavon 2014; Schiavon, S.; Altomonte, S.: Influence of factors unrelated to environmental quality on occupant satisfaction in LEED and non-LEED certified buildings. *Building and Environment*, 77, 2014, S. 148–159. <https://doi.org/10/ggcx2t>.
- Schnieders 2009; Schnieders, J.: Passive Houses in South West Europe. Passivhausinstitut, Darmstadt 2009.
- Schweiker 2022; Schweiker, M.: Combining adaptive and heat balance models for thermal sensation prediction: A new approach towards a theory and data-driven adaptive thermal heat balance model; 2022;32:e13018. doi:10.1111/ina.13018.
- Suschek-Berger 2014; Suschek-Berger J.; Haslinger J.; Freitag D. et al.: Build to satisfy: Modellierung des NutzerInnenverhaltens in Niedrigst- und Plusenergiegebäuden. Auswirkung auf Gebäudeperformance und Zufriedenheit, BMVIT (Hrsg.), Schriftenreihe 32/2014, S. 82.
- UBA 2019; Purr et al.: Wege in eine ressourcenschonende Treibhausgasneutralität. RESCUE-Studie. *Climate Change* 36/2019, Umweltbundesamt Dessau-Roßlau (UBA), 2019.
- UBA 2022; Umweltbundesamt UBA. Energiesparende Gebäude. Online, 2022. Verfügbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/energiesparen/energiesparende-gebaeude#eigentuemer>.
- UBA 2023; UBA: Monitoringbericht 2023 zur Deutschen Anpassungsstrategie an den Klimawandel, Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau, Germany, 2023 <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/monitoringbericht-2023>.
- Urlaub 2013; Urlaub, S.: Methodik zur Quantifizierung der Auswirkung von moderater Wärmebelastung auf die menschliche Leistungsfähigkeit. *Bauphysik* 35, Heft 1, 2013.
- Urlaub 2015; Urlaub, S.: Der Einfluss von moderater Wärmebelastung auf die Leistungsfähigkeit von Menschen im besonderen Kontext der Büroarbeit. Dissertation Universität Stuttgart, 2015.
- VDI 2021; VDI Ressourceneffizienz: Verein Deutscher Ingenieure VDI, Zentrum Ressourceneffizienz. Ressourceneffizienz im Bauwesen. Online, 2021 Verfügbar unter: <https://www.ressource-deutschland.de/themen/bauwesen/>.
- VDI 2022; VDI Ressourceneffizienz: Verein Deutscher Ingenieure VDI, Zentrum Ressourceneffizienz. Ressourceneffizienz im Bauwesen. Online, 2022. Verfügbar unter: <https://www.ressource-deutschland.de/themen/bauwesen/>.
- Wisser 2018; Wisser, K.: Akzeptanzforschung im Bereich der Technikakzeptanz. In *Gebäudeautomation in Wohngebäuden (Smart Home)*, S. 45–62, Springer.
- Zelger 2011; Zelger T.; Bednar T.; Huber W.: Entwicklung eines sommerlichen Zertifizierungskonzept und vereinfachten Berechnungsverfahrens für die Bewertung des Sommerverhaltens von Gebäuden in Italien. Wien.







# Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung

im Bundesamt für Bauwesen  
und Raumordnung



**ZUKUNFT BAU**  
FÖRDERN FORSCHEN ENTWICKELN

ISBN 978-3-87994-100-1  
ISSN 2199-3521

Im vorliegenden Band „Zukunft Bauen: Forschung für die Praxis“ des Innovationsprogramms Zukunft Bau werden drei Forschungsprojekte präsentiert, die im Kontext der Lowtech-Symposien zum einfachen und technikreduzierten Bauen entstanden sind.

Angesichts der steigenden energie-, ressourcen- und klimapolitischen Anforderungen an unsere Gebäude nimmt häufig auch der Technisierungsgrad zu, was zu einem höheren Fehlerrisiko durch die Technik einerseits und durch das Nutzerrinnen- und Nutzerverhalten andererseits führt. Dies kann wiederum erhebliche negative Folgen für den Energieverbrauch, klimaschädigende Emissionen, den Nutzerinnen- und Nutzerkomfort und die Betriebskosten von Gebäuden haben. Die drei Projekte sollen sowohl die Ressortarbeit in den Themenbereichen des Klima- und Ressourcenschutzes als auch Planerinnen und Planer bei der konkreten Umsetzung von Bauprojekten unterstützen. Dabei wird nach Lösungswegen gesucht, die zugleich die Robustheit und die Benutzerinnen- und Benutzerfreundlichkeit von Gebäuden erhöht.

Zukunft Bau setzt seit über 15 Jahren wichtige Impulse für Architektur und Bauwesen, schlägt Brücken zwischen Bauforschung und Baupraxis. Im Mittelpunkt steht der baurelevante Erkenntnisgewinn zu aktuellen Forschungsthemen wie Klimaschutz, Material- und Ressourceneffizienz, Digitalisierung, kostengünstiges Bauen und demografischer Wandel. Hierfür bietet Zukunft Bau eine Plattform, um entsprechende innovative Ansätze zu erforschen, zu konzipieren, zu erproben und zu vermitteln. Dabei sollen neue Rahmenbedingungen des Bauwesens ausgelotet wie auch die Forschung als Methode beim Planen und Bauen in größerer Breite etabliert werden. Getragen wird das Innovationsprogramm Zukunft Bau vom Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen (BMWSB) gemeinsam mit dem Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR).