

Parameterstudie Low-Tech Bürogebäude

Parameterstudie Low-Tech Bürogebäude

Endbericht

Impressum:

Technische Universität München
Lehrstuhl für Gebäudetechnologie und klimagerechtes Bauen
Prof. Dipl.-Ing. Thomas Auer

Projektleitung
Dipl.-Ing. (Univ.) Elisabeth Endres

Projektmitarbeit
Ata Chokhachian, M.Sc.
Laura Franke, M.Sc.
Lisa Neubert, B.Sc.
Mark Sen Dong, M.Sc.

München, Dezember 2017

Das Forschungsvorhaben wurde unterstützt von:
Deutsche POROTON GmbH
Ansprechpartner Herr Clemens Kuhlemann

Das Forschungsvorhaben wurde mit Mitteln der Forschungsinitiative Zukunft Bau des Bundesinstitutes für Bau-, Stadt und Raumforschung gefördert.
(Aktenzeichen: SWD-10.08.18.7-16.65)

Die Verantwortung für den Inhalt des Berichts liegt bei den Autoren
Der Bericht stellt in Teilen eine Vorveröffentlichung zur Dissertation von Frau Dipl.-Ing. (univ.) Elisabeth Endres dar. Dies wurde mit Erstprüfer Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. Gerhard Hausladen abgestimmt und durch die Fakultät Architektur genehmigt.

Inhaltsverzeichnis

1	Ausgangssituation und Motivation	1
2	Vorgehen und Methodik	7
2.1	Grundsätzliche Vorgehensweise.....	7
2.2	Werkzeuge	8
2.3	Methodik einzelner Arbeitsschritte	9
3	Betrachtung gebauter Beispiele	11
3.1	Projektauswahl	11
3.2	Zusammenfassung Projektanalyse	12
4	Simulationen	14
4.1	Aufbau Basismodell Simulation.....	14
4.1.1	Klimadaten	14
4.1.2	Raumgeometrie.....	16
4.1.3	Belegungsdichte.....	17
4.1.4	Lüftungsstrategie.....	18
4.2	Beschreibung Parameter	20
4.2.1	Passive Parameter	20
4.2.2	Aktive Parameter.....	25
4.3	Auswertung Tageslichtsimulation.....	27
4.3.1	Vorgehensweise.....	27
4.3.2	Definition sDA Faktor.....	28
4.3.3	Simulationsergebnisse Tageslicht	28
4.4	Auswertung thermische Simulation	31
4.4.1	Auswertung Raumklima und Energie.....	31
4.4.2	Auswertung Robustheit	59
4.5	Auswertung LCA – Varianten Baustoffe Außenkonstruktion.....	64
4.5.1	Vorgehensweise.....	64
4.5.2	Ergebnisdarstellung.....	64
5	Zusammenfassung und Fazit	66

Abbildungs- und Quellenverzeichnis

Anhang

1 Ausgangssituation und Motivation

Anforderungen an Energieeffizienz in Gebäuden zur Umsetzung der Energiewende sowie zur Minimierung des CO₂ Ausstoßes im Sinne des nachhaltigen Umgangs mit der Umwelt, prägen sowohl die Diskussion in der Architektur als auch den Planungs- und Bauprozess v.a. in den letzten drei Jahrzehnten.

Zur Steigerung der Energieeffizienz ist neben der Optimierung von Baustoffen und damit verbundene Reduzierung von Transmissionswärmeverlusten, der Einsatz von mechanischen Lüftungsanlagen mit Wärmerückgewinnung ein Aspekt zur Minimierung des Energiebedarfs von Gebäuden. Dieser Aspekt ergänzt, um steigende Komfortansprüche ist vor allem für die Büronutzung durch die aus hohen Belegungsdichten resultierenden Luftwechselzahlen entscheidend. Ergänzend steigt kontinuierlich die Implementierung der Elektronik in den Gebäuden im Bereich der Meß-, Steuer- und Regeltechnik. Diese dient z.B. kontrollierten natürlichen Lüftungskonzepten innerhalb von Nachtlüftungsstrategien, einer zentral gesteuerten Absenkung der Heiztemperatur außerhalb der Nutzungszeiten oder außenliegenden Sonnenschutzsystemen.

Genannte steigende Anforderungen an die Effizienz der Gebäude wurden ohne Einschränkungen hinsichtlich Raumkomfort oder Flexibilität festgelegt. In diesem Aspekt ist die Entwicklung gegenläufig, Anforderungen an das Raumklima sind für den Betrieb von Bürogebäuden, Geschäftshäusern und Produktionsstätten durch Normen und Richtlinien zum Schutz von Arbeitnehmern v.a. in den Arbeitsstättenrichtlinien geregelt. Ebenso werden zur Optimierung von Energieeffizienz technische Maßnahmen für den Betrieb wie z.B. Einzelraumregelung [1] oder Nachtabsenkung der Raumtemperaturen gefordert, welche zu einer Mehrung der technischen Systeme führt. Der Aspekt der Nutzerzufriedenheit durch Eingriffsmöglichkeiten in das Raumklima sowie der Wunsch nach multifunktionalen Flächen mit geringem Umbauaufwand, führen in der Planungspraxis zur Implementierung technischer Systeme, unabhängig der aus der Beschaffenheit der Außenwand resultierenden Lastgänge im Gebäude. In diesem Bereich hat keine Entschärfung der Anforderungen im Zuge der Einführung optimierter wärmetechnischer Standards der Baustoffe stattgefunden.

In Folge dieser zunehmenden Anforderungen an Effizienz, gekoppelt mit hohen Erwartungen der Nutzer an den ganzjährigen Komfort, steigen die Komponenten im Gebäude sowohl in der Baukonstruktion als auch in den technischen Systemen. Für die Baukonstruktion und damit das passive winterliche Verhalten, zeigt sich dies v.a. in den gestiegenen gesetzlichen Vorgaben zum wärmetechnischen Standard der Gebäudehülle. Forderte die Wärmeschutzverordnung 1977 einen mittleren Wärmedurchgangskoeffizienten für die Außenwandqualität von $1,45 - 1,75 \text{ W/m}^2\text{K}$ [2], abhängig vom Verhältnis der Hüllfläche zum zu beheizenden Volumen, gilt nach aktueller ENEC ein U-Wert von $0,28 \text{ W/m}^2\text{K}$ [3], als Richtwert für geschlossene Außenwandkonstruktionen von Nichtwohngebäuden. Zum Erreichen des Passivhausstandards werden U-Werte von $0,15 \text{ W/m}^2\text{K}$ angestrebt. Diese Forderungen sind durch die Entwicklung in der Baustoffindustrie mit unterschiedlichen Baukonstruktionen erreichbar. Neben der Implementierung von 3-Scheiben Glas als geltender Standard für transparente Flächen sind monolithische Baustoffe sowie Dämmstoffe zur Umsetzung mehrschaliger Hüllkonstruktionen kontinuierlich optimiert worden. Ebenso wird mit dem gesetzlich geforderten Nachweis des sommerlichen Wärmeschutzes eine Verbesserung des passiven sommerlichen Verhaltens der Gebäude angestrebt. Dies führt neben den Anforderungen an den wärmetechnischen Standard zu einer hohen Robustheit des Gebäudes gegenüber Lastschwankungen im Sommer und Winter. Energieintensive Spitzenlasten aktiver Systeme zum Ausgleichen der Gebäudelastgänge werden damit reduziert. Ein Verzicht von technischen Systemen hat jedoch mit Maximierung der Anforderungen an die Gebäudehülle nicht stattgefunden. Die Technisierung und der Einsatz aktiver technischer Systeme hat mit steigenden Anforderungen an das passive Gebäudeverhalten zugenommen. Die Steigerung der aktiven Systeme in der Haustechnik zur Schaffung eines behaglichen Raumklimas im Sommer und Winter zeigt sich u.a. in kontinuierlich steigenden Baukosten für die technischen Anlagen seit 1999. Wie in Abbildung 1 zeigt, ist seit dem Jahr 2000 eine Preissteigerung von 45,9% festzustellen. [4]

Mit zunehmendem Einsatz technischer Systeme zur Sicherung der Funktionalität sinkt die o.g. Robustheit des Gebäudes, da die Funktionalität und Wirtschaftlichkeit abhängig ist von Wartung und Betrieb der aktiven Gebäudetechnik. Ebenso steigt der Einfluss des Nutzers auf die Effizienz des Gebäudes, wenn ihm viele Eingriffsmöglichkeiten gegeben werden. Die Folge dieser Entwicklung von Maximierung des passiven Gebäudeverhaltens sowie einem hohen Einsatz aktiver Gebäudetechnik ist eine komponentenreiche Bauweise mit hoher Komplexität in der Planung und Umsetzung der Gebäude.

Durch unterschiedliche Wartungsintensitäten sowie Lebenszyklen der einzelnen Komponenten erhöhen sich Pflegeaufwand und Betriebskosten für den Gebäudeunterhalt und das Gebäudemanagement. Setzt man den Begriff Low-Tech gleich mit „Einfach Bauen“ bildet die Entwicklung eines robusten passiven Gebäudekonzeptes die Grundlage der Umsetzung eines solch einfachen Hauses.

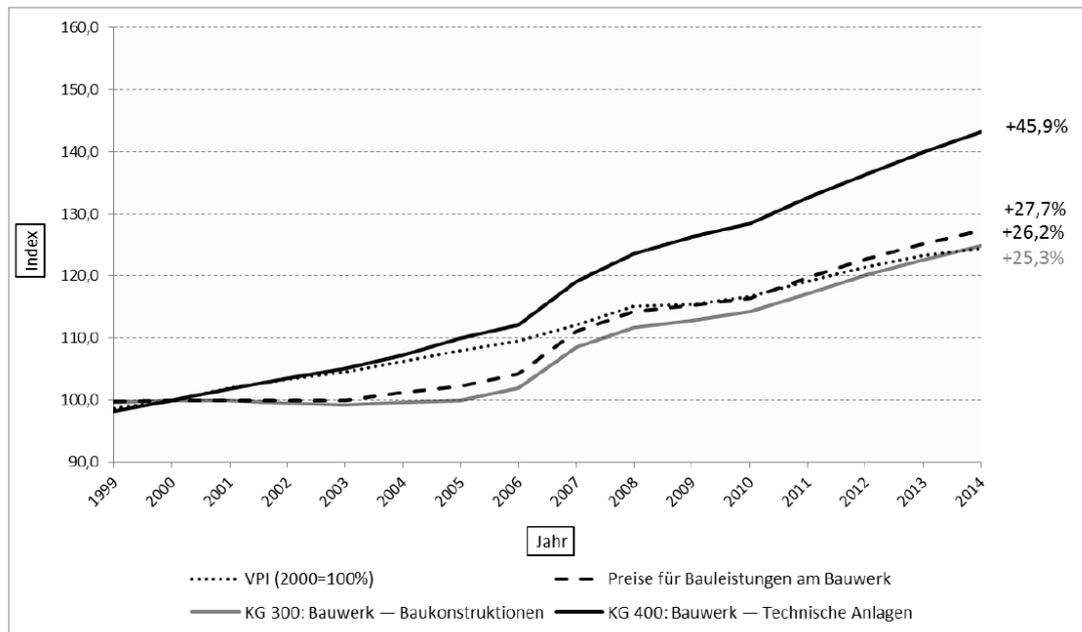


Abbildung 1_Darstellung der Indexreihen „KG 300 – Bauwerk – Baukonstruktionen“ und „KG 400 – Bauwerk - Technische Anlagen“ im Vergleich zum VPI [4]

Es zeigt sich also eine deutliche Divergenz hinsichtlich der o.g. Möglichkeiten der passiven Gebäudehüllen und dem praktizierten Einbau notwendiger technischer Systeme zur Lastdeckung oder von Steuerungstechnik zur maximalen Leistungsfähigkeit aktiver und passiver Komponenten. Der Glaube und die Anwendung von sog. „High-Tech Lösungen“ mit einem hohen Anteil aktiver Komponenten im Gebäude galt in den letzten drei Jahrzehnten als Antwort auf die Frage von Effizienz und Nachhaltigkeit. Die aktuelle Diskussion, hervorgerufen durch teilweise ausbleibende Erfolge und eine hohe Komplexität Planungs- und Bauablauf sowie durch die Entwicklung optimierter Baustoffe stellt diesen Lösungsansatz heute in Frage.

Vor allem seit den 2010er Jahren zeigt sich ganz deutlich diese Abwendung vom High-Tech Gedanken zur Effizienzsteigerung. Das Bürogebäude „2226“ in Lustenau (A) von be Architekten hat 2013 die Diskussion der Fachwelt in Gestalt umgesetzt und befeuert. Im Vordergrund der Konzeption stehen eine maximale Nutzung passiver Komponenten

des Gebäudes und die Reduzierung aktiver Systeme auf stromgeführte Licht- sowie Steuerungstechnik. Dabei bilden folgende wenige Maßnahmen den Rahmen für dieses Gebäude: Minimierung der Transmissionswärmeverluste durch enorme Wandstärken, natürliche Lüftungselemente in der Fassade zur Frischluftversorgung, reduzierter Fensterflächenanteil und einer großen Laibungstiefe der Fenster zur Minimierung von Überhitzungsstunden ergänzt um maximal freiliegende Speichermassen im Innenraum zur Pufferung von Lastspitzen [5]. Das Gebäude steht seit seiner Inbetriebnahme in der öffentlichen Diskussion. Dabei bilden weder neuartige Baustoffe noch eine Weiterentwicklung technischer Anlagen die Innovationskraft des Bauwerks, es ist vielmehr der radikale Verzicht auf wassergeführte aktive Raumkonditionierungssysteme, der die Debatte anführt. Das Kunstlicht stellt die maximale Wärmequelle der Räume neben den Bürogeräten dar, zur aktiven Kühlung besteht grundsätzlich keine Möglichkeit. Es zeigt sich in den Aufzeichnungen des Gebäudes, dass die prognostizierten Werte (Winter 22 °C und Sommer 26°C) im Jahresverlauf eingehalten werden [6].



Abbildungen 2 a+b_Gebäude 2226 Lustenau (Bilder Elisabeth Endres)

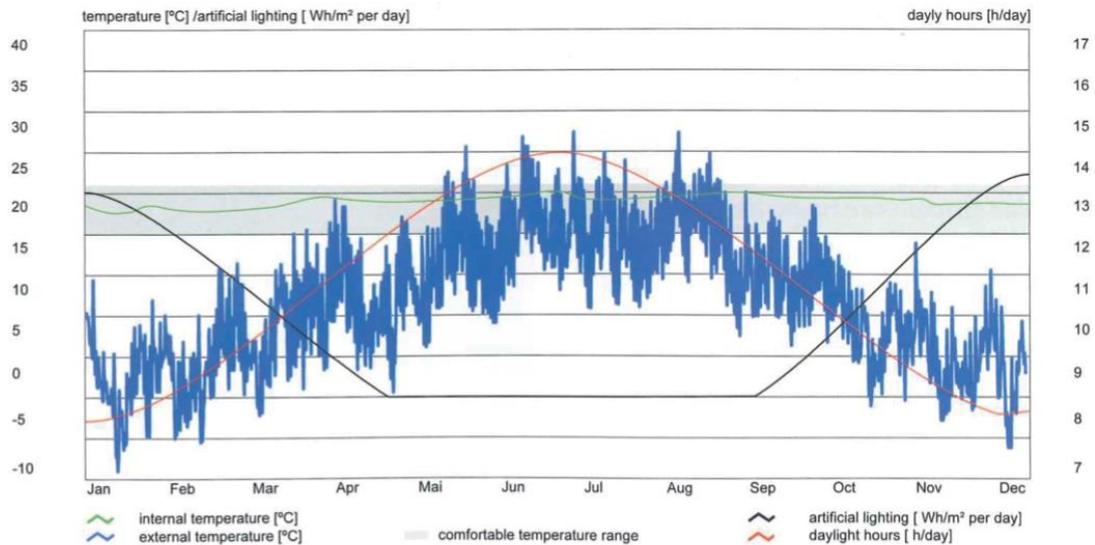


Abbildung 3_Jahresverlauf Außen- und Innenraumtemperatur Gebäude 2226 [6]

Dieses Gebäude wie auch das Gebäude für die Fa. Ricola der Architekten Herzog & deMeuron sind als Prototypen zu betrachten, allgemeingültige, übertragbare Aussagen der Auswirkungen einzelner passiver Parameter und deren Gewichtung für eine Implementierung in den Planungsprozess liegen nicht vor. Die Frage nach der Robustheit einzelner Parameter hinsichtlich der Auswirkungen auf das Raumklima, der Widerstandsfähigkeit bei Veränderungen des Außenklimas sowie der Einsatz grauer Energie unterschiedlicher Hüllkonstruktionen sind unbeantwortet. Aus dieser Situation heraus ist die vorliegende Arbeit entstanden, welche sich im Spannungsfeld von passiver und aktiver Gebäudekonzeption bewegt.

Aufbauend auf der Hypothese des Förderantrags **„Durch die Optimierung passiver Maßnahmen – thermische Masse, hoher Dämmstandard, reduzierter Fensterflächenanteil, optimierte und kontrolliert natürliche Lüftung – lassen sich energieeffiziente Bürogebäude ohne aktive Systeme zum Heizen, Kühlen und Lüften sowie ohne Beeinträchtigung des Komforts umsetzen“** wurden die im Bericht vorgestellten Ergebnisse erarbeitet. Sie geben eine Übersicht der Abhängigkeiten und des Einflusses einzelner Stellschrauben der Fassade auf das Raumklima. Die Ergebnisse zeigen somit neben den absoluten raumklimatischen Auswirkungen einzelner Einflussgröße, die Robustheit der Parameter untereinander auf. Diese Validierung der einzelnen Parameter soll im Entwurf bei der Konzeption von Low-Tech Gebäuden vor dem Hintergrund des einfachen und zukunftsfähigen Bauens dienen. Die Innovation im Bauen wird in der Zu-

kunft der Umgang mit den vorhandenen Möglichkeiten sein. Solange Lösungen zum vollständigen Recycling von Baustoffen und technischen Komponenten fehlen, werden lange Lebenszyklen eines eingesetzten Parameters mit einer hohen Robustheit gegenüber Klimaanpassungen, Nutzungsänderungen und fluktuierenden Verfügbarkeiten von Energie nachhaltige Gebäude im Sinne der Haltbarkeit hervorbringen.

Eine robuste Optimierung, unter Berücksichtigung unsicherer Randbedingungen, ist in vielen Industriezweigen Stand der Technik, hat jedoch im Bauwesen noch keinen Einzug gefunden. Gleichzeitig besteht gerade im Gebäudesektor eine Vielzahl unsicherer Randbedingungen. Unsicherheiten ergeben sich beispielsweise aus dem Nutzerverhalten, nicht optimal betriebenen Systemen, oder auch aus Phänomenen hervorgerufen durch Klimawandel oder Nachverdichtung, die zwangsläufig - vor allem in Städten - zu einer Veränderung der klimatischen Randbedingungen führen werden. Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich daher einerseits mit der Fragestellung von Low-Tech im Sinne der Reduzierung von Komponenten und definiert die betrachteten Parameter hinsichtlich ihrer Robustheit gegenüber unsicherer Randbedingungen.

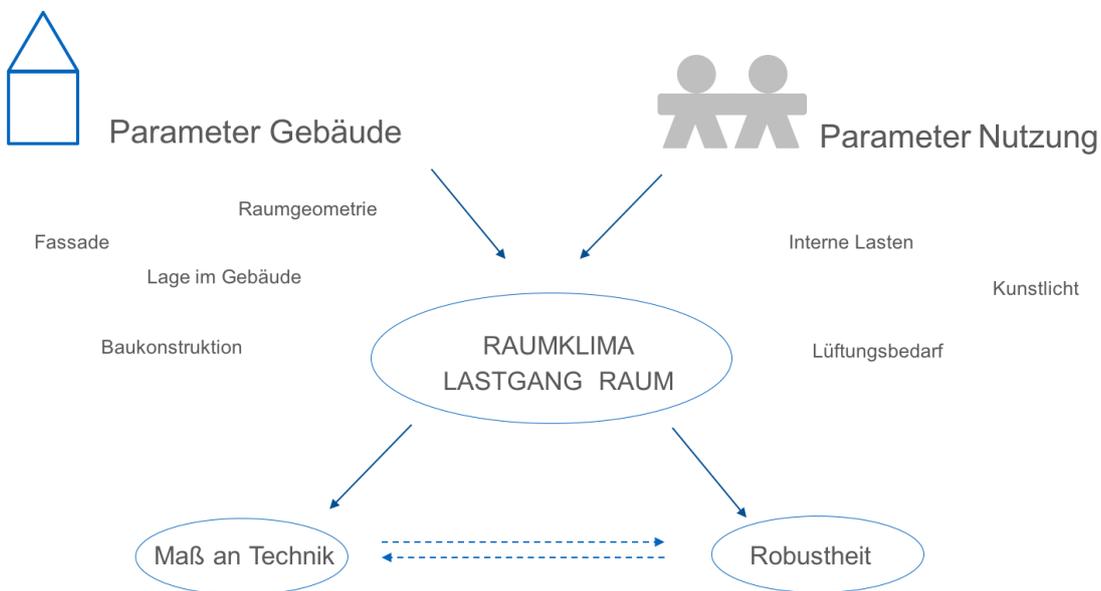


Abbildung 4_Spannungsfeld passive Parameter – Nutzung

2 Vorgehen und Methodik

Ziel der Studie ist die Validierung und Evaluierung einzelner passiver Parameter hinsichtlich des Einflusses auf das Raumklima und die Energieeffizienz, sowie die Ableitung der Robustheit einzelner passiver Komponenten hinsichtlich dieser beiden Aspekte zueinander.

2.1 Grundsätzliche Vorgehensweise

Grundsätzlich teilt sich das Projekt in zwei Blöcke. Zum einen wurden gebaute Beispiele aus der Praxis der letzten 30 Jahre anhand von Projektdaten und Unterlagen betrachtet zum anderen erfolgte die theoretische Parameterstudie mittels Simulationsprogrammen.

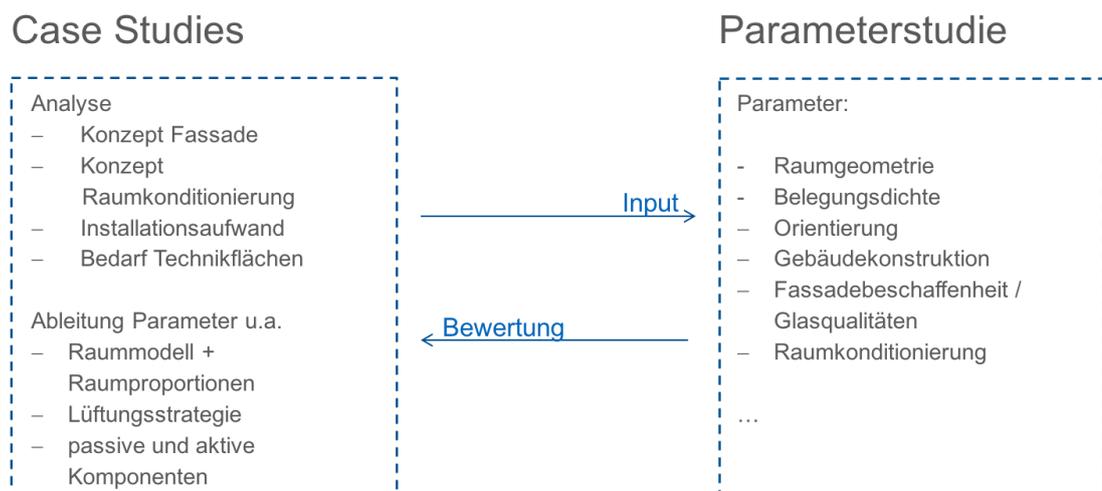


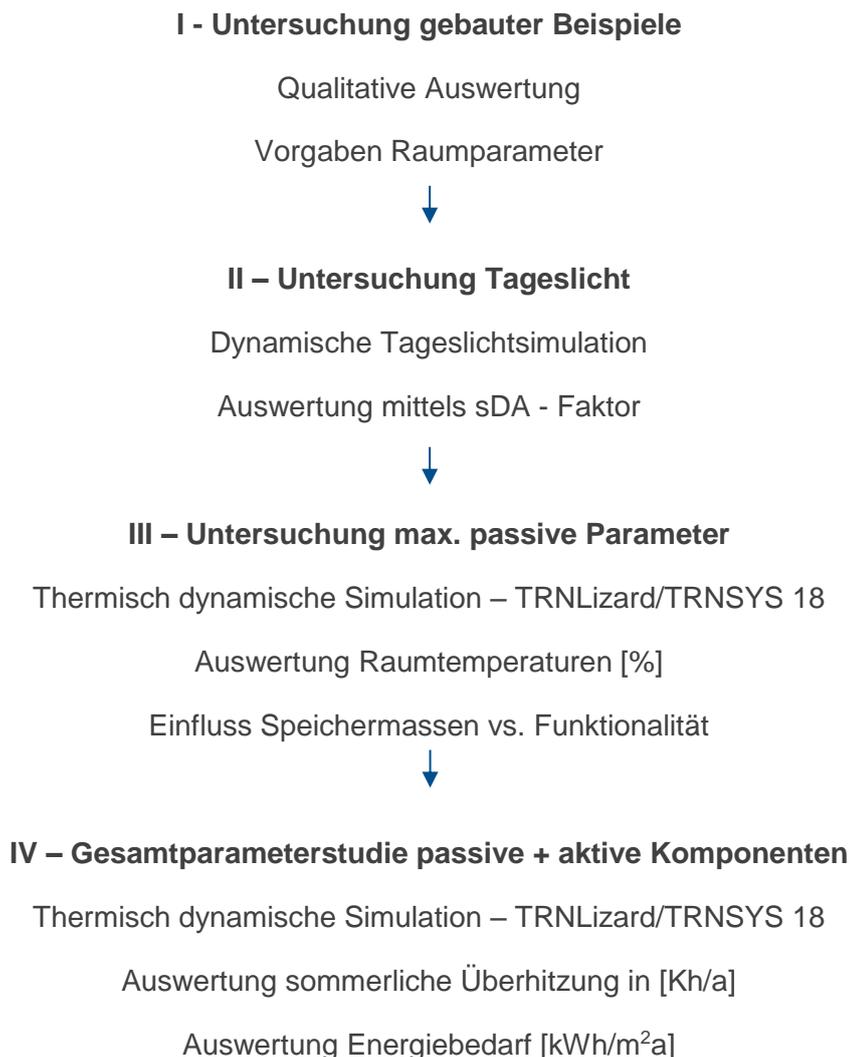
Abbildung 5_Betrachtungsschwerpunkte Studie

Die vorliegenden Ergebnisse wurden innerhalb der o.g. Gesamtvorgehensweise in unterschiedlichen Arbeitsschritten erarbeitet, die jeweils aufeinander aufbauen. Dabei stellen die Ergebnisse des jeweiligen Arbeitspakets die Grundlage des nächsten Schrittes dar. Während Arbeitsschritt I die Grundlagenermittlung beinhaltet, dienen die Arbeitsschritte II – IV der Evaluierung der einzelnen festgelegten Parameter.

2.2 Werkzeuge

Mittels dynamischer Simulationswerkzeuge wurden in den Arbeitsschritten II-IV Daten für einen repräsentativen Büroraum generiert. Die Daten zum Tageslicht wurden mit dem Simulationskern *Radiance* und *Daysim* über das Interface *Grasshopper (Rhino 5)* [7] mit dem Plugin *Honeybee* [8] generiert. Für die Berechnung der raumklimatischen und energetischen Kennwerte wurde mit dem Simulationskern *TRNSYS 18* und dem Plugin *TRNLizard* [9] in *Grasshopper* verwendet. Dieses Plugin ist innerhalb der Weiterentwicklung der Software *TRNSYS* entwickelt worden und dient explizit parametrischen Studien. Es ist seit Ende 2016 auf dem Markt und wurde in diesem Projekt erstmals in einem Forschungsprojekt angewendet.

Übersicht Vorgehensweise + Werkzeuge



2.3 Methodik einzelner Arbeitsschritte

Im Folgenden werden die Arbeitsschritte, die sog. „Story Line“ des Projekts einzeln benannt und erläutert:

Arbeitsschritt I - Untersuchung gebauter Beispiele

Die Untersuchung gebauter Beispiele dient der Grundlagenermittlung für die Parameterstudie. Die Ergebnisse zeigen die Bandbreite der aktuell gebauten Fassaden und Konditionierungssysteme. Ebenso dient die Betrachtung der gebauten Beispiele als Vorlage für die gebäudebezogenen Parameter.

Arbeitsschritt II - Untersuchung Fensterflächenanteil / Tageslicht

Fokus: Tageslicht

Bezugsgröße: Raum;

Parameter: Orientierung; Glasqualität; Laibungstiefe Außenwand

Methode / Werkzeug: Bewertung Tageslicht nach sDA

Tageslicht ist eine entscheidende Größe in der Gestaltung von Arbeitsplätzen. Daher wurde dieser Parameter im Arbeitsschritt II den anderen Parametern vorangestellt. Die passive Nutzung des Tageslichtes dient als *erster limitierender Faktor in der Gesamtbeurteilung*. Fassadenkonfigurationen (% Anteil Fensterfläche zu geschlossener Wand „Window-to-Wall-Ratio“) die keine ausreichende natürliche Belichtung in der Jahresbilanz erreichen, werden in den Arbeitsschritten III + IV nicht weiter berücksichtigt.

Arbeitsschritt III – Untersuchung rein passive Komponenten

Reduzierte Parameter

Fokus: Einfluss Einsatz Speichermassen; absolute Raumtemperaturen Winter; Funktionalität

Betrachtungsebene: Raum südorientiert mit Belegungsszenario „Büro“

Parameter: Innenkonstruktion; Lüftungsstrategie; Glasqualität

Methode / Werkzeug: Thermische Simulation TRNLizard/TRNSYS 18

Nach der Betrachtung des Tageslichtes als limitierenden Faktor wird im Arbeitsschritt III das grundsätzliche Verhalten des Raumklimas ohne jegliche aktiven Systeme betrachtet. Zur Validierung des Einflusses von Speichermassen sowie zur ersten Abschätzung des winterlichen Verhaltens werden lediglich die Faktoren: Glasqualität, thermisch wirksame Speichermassen im Raum, sowie Lüftungsszenarien parametrisiert.

Arbeitsschritt IV – Gesamtparameterstudie

Fokus: Raumklima nach Kh/a + Energiebedarf

Betrachtungsebene: Raum

Parameter Gebäude: Orientierung; Fensterflächenanteil; Außenwandkonstruktion; Glasqualität; Laibungstiefe Fenster; Speichermassen Decke;

Methode / Werkzeug: Thermische Simulation TRNLizard/TRNSYS 18

Variante zur Bewertung Einfluss Klima:

- a) Klima Potsdam 4y - normal;*
- b) Klima Potsdam 4x - extrem;*

Variante zur Bewertung Einfluss von Systemen:*

- a) außenliegender Sonnenschutz;*
- b) mechanische Be- und Entlüftung mit WRG;*
- c) Betonkernaktivierung*

Variante zur Bewertung Einfluss der Belegungsdichte:*

- a) Büro;*
- b) Seminar*

Dieser Arbeitsschritt stellt den finalen Simulationsschritt zur Validierung und Evaluierung der einzelnen Parameter dar. Im Arbeitsschritt IV wurden nach der Minimierung der Varianten in den Arbeitsschritten II + III insgesamt 638 Varianten aus unterschiedlichen Fassaden- und Innenausbaukonstellationen final betrachtet und ausgewertet. Diese Varianten wurden jeweils durch Änderung von folgenden Randbedingungen: Klima, Systemergänzungen sowie Belegungsdichte, geprüft und hinsichtlich der Auswirkungen auf das sommerliche Verhalten und den Energiebedarf bewertet.

** diese Varianten wurden ausschließlich mit Wetterdatensatz Potsdam untersucht*

3 Betrachtung gebauter Beispiele

3.1 Projektauswahl

Im ersten Arbeitsschritt I wurden Bürogebäude aus den vergangenen drei Jahrzehnten ausgewählt, diskutiert und dokumentiert. Ziel der Auseinandersetzung mit den gebauten Beispielen ist einerseits die Einarbeitung in die Thematik „Bürogebäude“ sowie die Erarbeitung von Randparametern für die Simulationen. Die Auswahl der Gebäude erfolgte hinsichtlich unterschiedlicher Kubaturen, Fassaden- und Raumkonditionierungskonzepte. (Ausführliche Projektblätter gewählter Beispiele s. Anhang).

Folgende 10 Beispiele wurden genauer diskutiert, analysiert und hinsichtlich der Fassadenkonstruktion, der Raumkonditionierungssystem und des Installationskonzeptes dokumentiert:

EAM Hauptsitz Kassel, Fertigstellung 1993

Bieling Architekten Hamburg + Kassel

Post Tower Bonn, Fertigstellung 2002

Murphy und Jahn Architekten, Chicago

ZVK – SOKA Bau Wiesbaden, Fertigstellung 2003

Thomas Herzog Architekten (bis 2012 Herzog + Partner), München

Westhafen Tower Frankfurt, Fertigstellung 2004

Schneider + Schumacher Architekten, Frankfurt

Umweltbundesamt Dessau, Fertigstellung 2005

Sauerbruch Hutton Architekten, Berlin

Capriconhaus Düsseldorf, Fertigstellung 2008

Gatermann + Schossig Architekten, Köln

Heinrich-Böll-Stiftung Berlin, Fertigstellung 2008

E2A Architekten, Zürich

Spiegel Headquarters Hamburg, Fertigstellung 2012

Henning Larsen Architects, Kopenhagen

Dreischeibenhochhaus Düsseldorf, Fertigstellung 1957/ Sanierung 2014

Hentrich, Petschnigg und Partner (HPP Architekten), Düsseldorf

2226 Lustenau, Fertigstellung 2013

be Architekten, Lustenau

WIKUS Sägefabrik – Headquarter Spangenberg, Fertigstellung vs. 2018

Bieling Architekten Hamburg + Kassel

3.2 Zusammenfassung Projektanalyse

In der zusammenfassenden Betrachtung und qualitativen Bewertung der untersuchten Gebäude ist festzustellen, dass die Lüftung in der Diskussion um Low-Tech Bürogebäuden eine entscheidende Rolle spielt. Dies bezieht sich vor allem auf die Flächeneffizienz, die Raumhöhen und die Flexibilität in der Nutzung. Hinzu kommen in Großraumstrukturen, Räumen mit hohen Belegungszahlen sowie Innenliegenden temporär genutzten Räumen die Versorgung mit frischer Luft. Natürlich gelüftete Gebäude oder Gebäude oder die Bauten mit dezentraler Technik in den Fassaden weisen deutlich weniger Technikflächen auf. Ebenso fällt die Nutzung von Speichermassen entweder passiv durch Nachlüftung oder aktiv durch die Integration einer Betonkernaktivierung in der Planung einfacher.

Die Untersuchungen und Besichtigungen haben gezeigt, dass die Nutzerakzeptanz bei natürlich belüfteten Gebäuden sehr hoch ist. Das EAM Gebäude in Kassel erfährt eine sehr hohe Beliebtheit in der Nutzerschaft. Ebenso wurde im Gespräch mit Nutzern des 3-Scheibenhochhaus betont, dass die Klimatisierung über Umluft geduldet sei, da seit der Sanierung und Implementierung von Öffnungsflügeln mit Prallscheibe ein individuelles Eingreifen möglich ist. Auffallend ist, dass die älteren gebauten Beispiele mehrfach Fensterlüftung oder dezentrale Lösungen einsetzten, die neueren Gebäude bis auf das Beispiel Lustenau 2226 auf eine zentrale Lüftungstechnik zurückgreifen.

Am Beispiel des Neubaus zum Umweltbundesamt in Dessau ist deutlich geworden, dass der Nutzer einer Nachtauskühlung im Vergleich zum Aufwand in der Fassade mit Steuerungssystemen und Einbruchschutz in der Realität eher gering ist. Der Erfahrungswert beläuft sich auf unter 2K für einen Beispielraum. Grundsätzlich hat die Betrachtung gezeigt, dass die großen technischen komponentenreichen Antworten auf Fragen der Effizienz und des Komforts abnehmen und erste Konzepte mit vereinfachter Technik oder

gar mit Verzicht auf technische Systeme umgesetzt werden. Bessere Hüllkonstruktionen ermöglichen dieses Umdenken, dennoch wird oftmals zur Gewährleistung von Anforderungen aus der Vergangenheit Technik eingesetzt, etwa zur Einzelraumregelung in der Heizung, die bei heutigen wärmetechnischen Standards nicht zwingend erforderlich wäre.

4 Simulationen

In den folgenden Kapiteln werden zunächst die Randbedingungen der Simulationen sowie die im Kapitel 2.3 erläuterten einzelnen Simulationsschritte vorgestellt und anschließend ausgewertet.

4.1 Aufbau Basismodell Simulation

4.1.1 Klimadaten

Als Referenzklima für Deutschland gilt nach DIN 18599 der Standort Potsdam [10]. Zur allgemeingültigen Beschreibung werden demzufolge in der Studie die Wetterdaten dieses Referenzstandortes für alle Simulationen des Raum- und Anlagentechnikmodelles verwendet.

Nach Norm (VDI) ist der Testreferenzjahr-Datensatz (TRY) des Deutschen Wetterdienstes zu verwenden. TRY repräsentieren den typischen Witterungsverlauf eines Gebietes. Sie enthalten diverse meteorologische Daten für jede Stunde eines Jahres und werden aus Messwerten über einen langen Zeitraum bestimmt. Die Datensätze eines TRY entsprechen somit in der Regel durchschnittlichen Werten der ausgewählten Parameter. Speziell für die Auslegung von Heiz- und raumluftechnische Anlagen werden zudem Witterungsprofile aus extremen Messwerten der Basisperiode definiert [11]. Im Rahmen dieser Studie werden die Wetterdaten des Testreferenzjahres 2011 mit korrigierter Horizontalstrahlung [12] den Simulationen zugrunde gelegt. Der Datensatz TRY2004 ist veraltet und entspricht im Zuge der Klimaveränderung nicht mehr der aktuellen Wettersituation. TRY2017 als neuester Wetterdatensatz ist noch nicht erprobt und wurde daher nicht verwendet.

Der verwendete TRY Datensatz repräsentiert für die gewählte Klimaregion den typischen Witterungsverlauf (DWD). Da zur thermischen Berechnung für die Auslegung von technischen Anlagen sowie zur Darstellung der Funktionsfähigkeit des Raumes extreme Belastungen nötig sind [11], wird nicht das Normaljahr, sondern die extrem warmen und kalten Halbjahre in einem Datensatz zusammengeführt und verwendet (Potsdam extrem) [11]. Dabei ist anzumerken, dass die TRY2011 Extremwetterdaten des DWD schon heute die Realität stark widerspiegeln. Zudem wurden die Lufttemperaturen um den „Urban Heat Island Effect“ korrigiert, was zu zusätzlich extremeren Lufttemperaturen führt.

In der Studie wurde zur Validierung der Ergebnisse mit o.g. extrem Klima Randbedingungen im Arbeitsschritt IV eine Variantenbetrachtung mit sog. Potsdam normal [13] Wetterdatensatz durchgeführt.

Folgende Klima Parameter sind den Simulationen hinterlegt:

- Lufttemperatur [°C]
- Relative Luftfeuchte [%]
- Absoluter Luftdruck [Pa]
- Direkte und diffuse Horizontalstrahlung [W/m²]
- Windgeschwindigkeit [m/s]
- Windrichtung [N = 0°]
- Bedeckungsgrad [0-8]

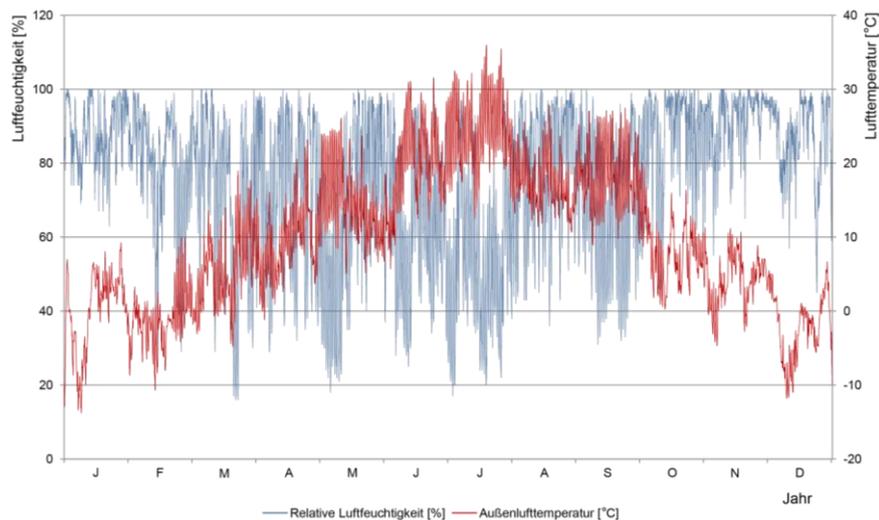


Abbildung 6_Außentemperatur + relative Feuchte

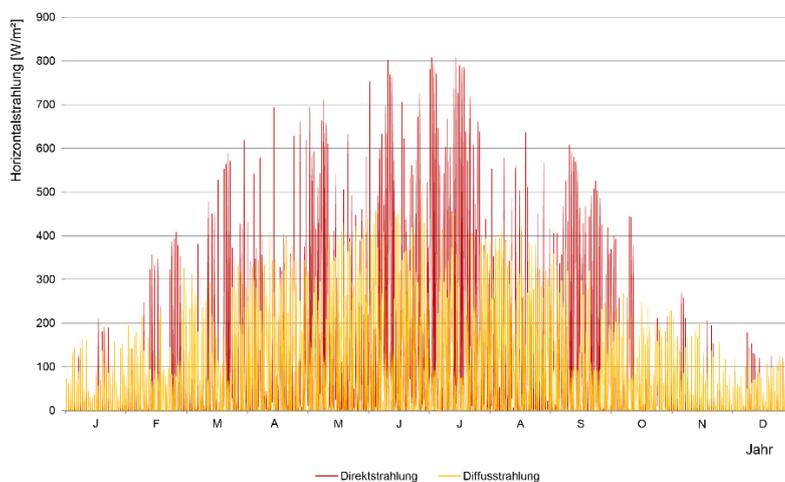


Abbildung 7_Globalstrahlung diffus / direkt

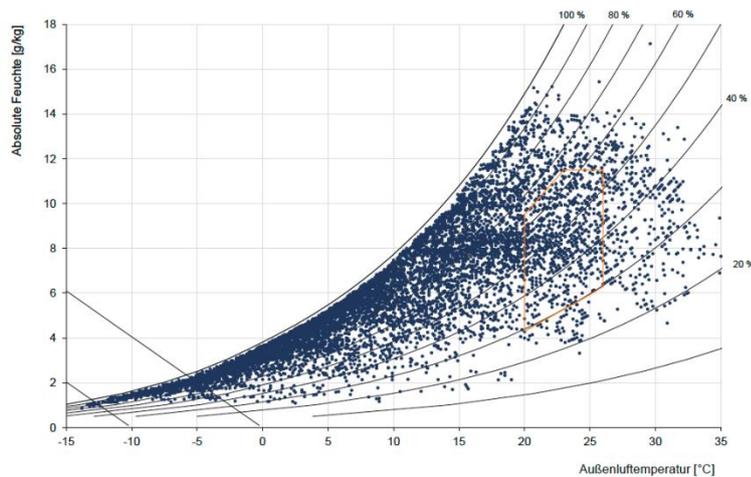


Abbildung 8_hx Diagramm

4.1.2 Raumgeometrie

Grundfläche

Das Raummodell basiert auf einem Fassadenraster von 1,35 m. Die Betrachtung der Bestandsgebäude hat ergeben, dass sich innerhalb der Fassadengliederungen eine Spanne von 1,25 – 1,50 m abbildet. Daraus wurde der o.g. Wert abgeleitet.

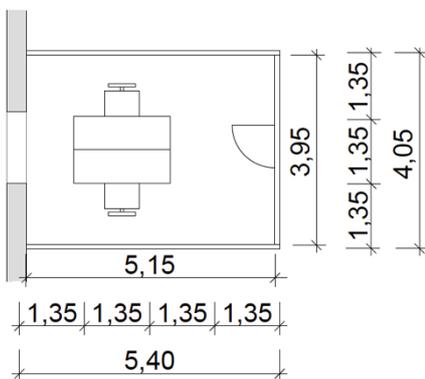


Abbildung 9_Grundriss Raummodell

Für ein Zellenbüro mit 2 Arbeitsplätzen wird ein 3-Achsraum festgelegt. Als Nettofläche nach Abzug anteilig je Arbeitsplatz einer halben Trennwand, ergeben sich pro Person 10 m² im Doppelbüro. Damit entspricht die Geometrie den Anforderungen der Arbeitsstättenrichtlichen [14], welche für Büro- und Bildschirmarbeitsplätze von Zellenbüros als Richtwert ein Flächenbedarf von 8 bis 10m² je Arbeitsplatz einschließlich Möblierung und anteiliger Verkehrsflächen im Raum vorgibt. Ebenso werden die Richtwerte der Norm DIN 4543-1 für die Mindesttiefe der freien Bewegungsfläche vor der Tischkante von

1,00 m [15] und die Forderung der Arbeitsstättenrichtlinie nach einer Bewegungsfläche > 1,50 m² [16] bei dieser Raumgeometrie eingehalten (Tischbreiten 80-90cm).

Raumhöhe

In allen Simulationen beträgt die lichte Raumhöhe 3,20 m. Dieser Wert liegt etwas über den in den Arbeitsstättenrichtlinien geforderten Mindestanforderungen (2,70m in Zellen und 3,00m in Großraumstrukturen). Das resultierende geringfügig erhöhte Raumvolumen strebt eine Minimierung der Lüftungsrate im Winter an. Durch dieses größere Raumvolumen reduzieren sich Anzahl der im Low-Tech Sinne angestrebten natürlichen Lüftungsraten und damit die Lüftungswärmeverluste. Zur Auswertung des Einflusses einer Abhangdecke ändert sich die lichte Raumhöhe in diesen Szenarien nicht, in diesen Berechnungen wird von einer höheren absoluten Raumhöhe ausgegangen.

Insgesamt ergibt sich für den repräsentativen Büroraum eine Nettogrundfläche von 20,34 m² und ein Nettoraumvolumen von 65,10 m³.

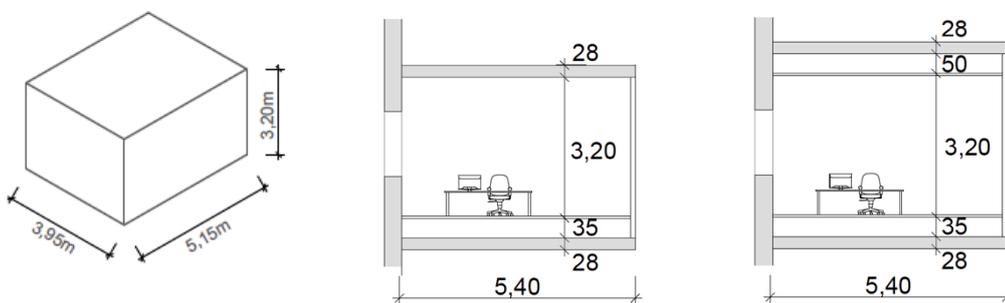


Abbildung 10 a-c_Raumvolumen + lichte Raummaß

4.1.3 Belegungsichte

Insgesamt werden im Verlauf der Studie 2 unterschiedliche Belegungsszenarien im Raum untersucht. Belegungsszenario 1 stellt die Grundbelegung dar, die verdichtete Belegung „Seminar“, Szenario 2 wird zur Validierung der Varianten Sonnenschutz, mechanische Lüftung und Betonkernaktivierung eingesetzt hinsichtlich der Auswirkungen auf das sommerliche Verhalten und die Betriebsenergie.

Szenario 1 „Büronutzung“

Das Grundmodell sieht eine Belegung von 2 Personen vor. Folgende Randbedingungen zu internen Lasten und zur Auslegung der Lüftung sind in den thermischen Simulationen hinterlegt:



2 Arbeitsplätze / Computer á 70 W
10 W/m² installierte Lichtleistung



2 Personen á 75 W
10m²/Pers.
Nutzungszeit Mo.-Fr. 8-18 Uhr

Szenario 2 „Seminar“

Dieses Szenario wird zur Validierung der Ergebnisse mit Systemen am Ender der Studie angewendet. Es wird von einer dichten Belegung des Raumes als kleiner Besprechungsraum / Seminarraum ausgegangen.



1 Laptop á 70 W + 1 Beamer
10 W/m² installierte Lichtleistung



6 Personen á 75 W
Nutzungszeit Mo.-Fr. 9-11h + 14-17h

4.1.4 Lüftungsstrategie

Die Lüftungsstrategien unterscheiden sich innerhalb der beiden Arbeitsschritte III + IV. Zur Untersuchung des Einflusses der Speichermassen werden unterschiedliche Lüftungsstrategien verwendet, um einerseits die Auswirkungen der natürlichen Lüftung ohne jegliche Heizung im Winter zu betrachten und andererseits die Auswirkungen von Speichermassen bei Nachtlüftung zu validieren.

Den Ergebnissen der Gesamtparameterstudie liegen jeweils die gleichen Lüftungparameter zugrunde, auch bei der Validierung der Robustheit hinsichtlich unterschiedlicher Belegungsszenarien wurden die Randbedingungen beibehalten.

Lüftungsstrategien Arbeitsschritt III – „Validierung maximal passive Parameter“

Szenario 1 - Grundszenario:

Konstanter Luftwechsel durch Infiltration Außenwand: $n = 0,16/h$ + hygienischer Mindestluftwechsel während der Nutzungszeit mit $30m^3/Pers.$ $n = 0,92/h$

Szenario 2:

Keine Frischluftversorgung durch Nutzer: rein konstanter Luftwechsel durch Infiltration der Außenwand: $n = 0,16/h$,

Szenario 3:

Grundszenario + Lüftung zur Entwärmung während Nutzungszeit: Ab einer operativen Raumtemperatur $> 23^{\circ}C$ mit wird ein 4-facher Luftwechsel über die Fassade angestrebt bis zu einer operativen Innentemperatur von $21,5^{\circ}C$.

Szenario 4:

Grundszenario + Szenario 3 + Nachtlüftung: Es erfolgt eine Nachtspülung mit $n=6/h$ wenn sich Außentemperaturen über 24h $> 18^{\circ}C$ einstellen.

Natürliche Lüftungsstrategie Parameterstudie

Konstanter Luftwechsel durch Infiltration Außenwand: $n=0,16/h$

Bis $23^{\circ}C$ Raumtemperatur wird von einem intelligenten Nutzer ausgegangen, welcher die Fenster so öffnet, dass ein notwendiger hygienischer Luftwechsel (mittlere Raumluftqualität IDA II [17]) pro Person $30m^3/h$ gewährleistet wird. Dies entspricht einer Luftwechselzahl $n=0,92/h$

Bei einer Raumtemperatur **ab $23^{\circ}C$** wird von einer zusätzlichen Entwärmung durch Öffnen der Fenster ausgegangen; hierbei wird von einer Querlüftungsmöglichkeit z.B. durch Klappen oberhalb der Innentüren ausgegangen, so dass sich ein 4-facher Luftwechsel einstellt. Sinkt die Raumtemperatur auf $21,5^{\circ}C$ wird die Entwärmungslüftung beendet. Übersteigt die Raumtemperatur $23^{\circ}C$ und liegt die Außentemperatur höher als die Raumtemperatur, bleiben die Fenster geschlossen und es wird lediglich der notwendige hygienische Luftwechsel sichergestellt.

Die **Nachtlüftung** setzt grundsätzlich ein, wenn die Nutzer nicht da sind. Ab einer Außentemperatur von min. $18^{\circ}C/24h$ wird die Nachtspülung mit $n=6/h$ in den Simulationen angesetzt. Ab einer Innenraumtemperatur von $23^{\circ}C$ öffnet sich die Fassade. Erreicht die Innenraumtemperatur von $< 21,5^{\circ}C$ schließen sich die Öffnungen.

4.2 Beschreibung Parameter

4.2.1 Passive Parameter

Dieses Kapitel beschreibt die Parameter, welche passiv das Raumklima beeinflussen und hinsichtlich Ihrer Auswirkungen absolut sowie relativ zueinander evaluiert werden. Orientierung und im Innenraum wirksame Speichermasse stellen die beiden einzigen Parameter unabhängig der Außenwand des Modellraumes dar.

Orientierung

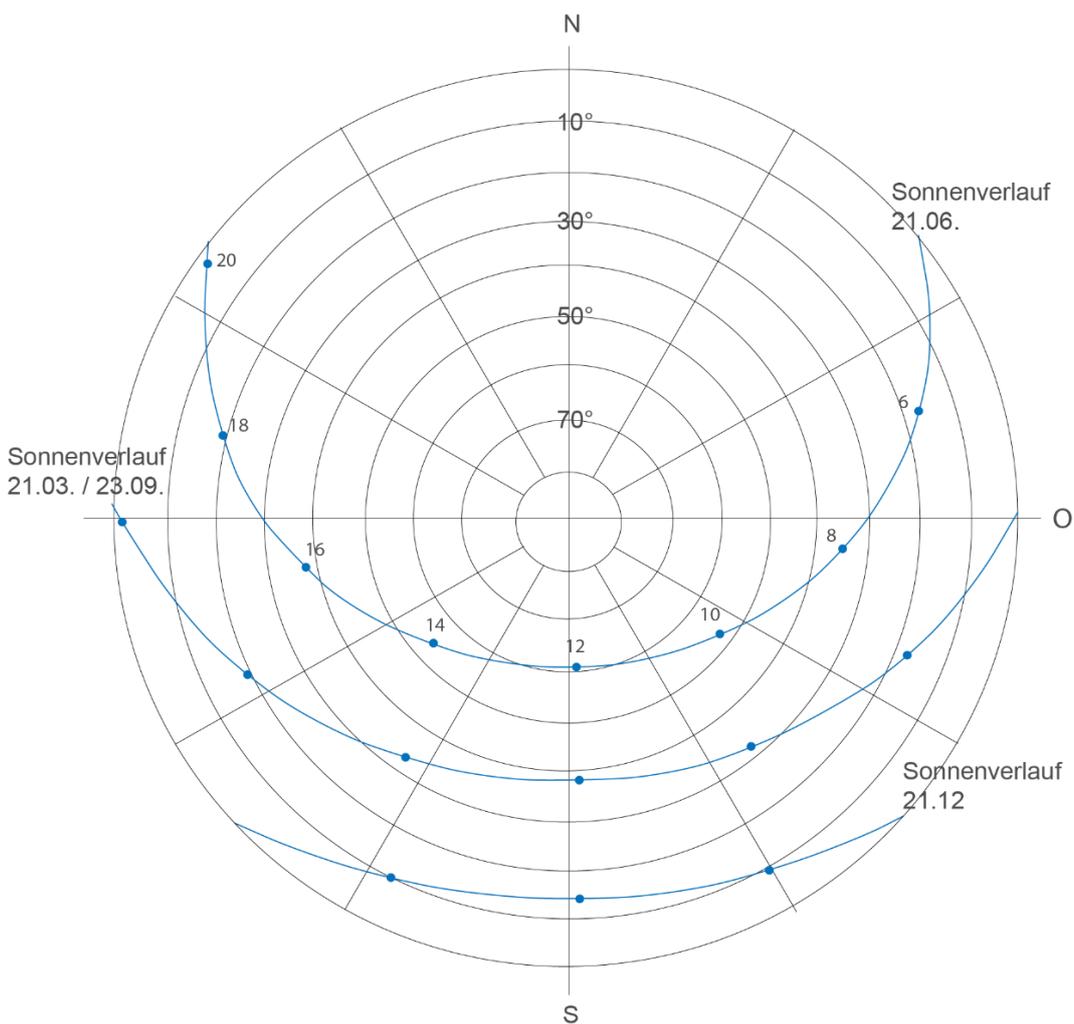


Abbildung 11_Sonnenstandsdiagramm [18]

Unterschiedliche Sonnenstände der einzelnen Himmelsrichtungen beeinflussen die solaren Einträge in Gebäude und haben somit Auswirkungen auf das Raumklima. Der tägliche und jahreszeitliche Verlauf der Sonne mit den entsprechenden differenzierten Son-

neneinstrahlwinkeln [18] (vgl. Abb. 11) beeinflusst die Beaufschlagung der Fassaden abhängig von Orientierung und Jahreszeit. Im Sommer steht einer mehrstündigen Beaufschlagung der Ost-West orientierten Fassaden mit niedrigem Sonnenwinkel, ein steiler Einstrahlwinkel im Süden auf die Gebäudehülle gegenüber, Die nördliche Fassade ist lediglich in den frühen Morgenstunden bei Sonnenhöchststand in den Monaten Mai bis Juli mit Sonne beaufschlagt. In den Wintermonaten erfolgt die Besonnung überwiegend im Süden, mit einem geringen Anstellwinkel der Sonne von 10° bis 15° . In der Simulation werden zunächst alle Orientierungen hinsichtlich der Tageslichtversorgung bei unterschiedlichen Außenwandkonfigurationen quantifiziert und die Ergebnisse in die thermische Simulation übertragen.

Fensterflächenanteil - FFA

Schutzfunktion und Schaffung eines dem Nutzer dienenden Innenraumklimas sind der originäre Zweck der Außenwand. Ein entscheidender Faktor ist für die Gestalt der Fassade die Versorgung des Innenraumes mit Tageslicht, welcher konträr zur Forderung minimierter transparenter Flächen, im Zuge der Optimierung des sommerlichen Wärmeschutzes, steht. Entsprechend dem Fokus dieser Studie – maximale Performance durch passive Parameter - ist der Fensterflächenanteil der erste entscheidende und limitierende Faktor in der Parameterstudie. Der Fensterflächenanteil [%] bezieht sich auf das Verhältnis von geschlossener zu transparenter Außenwand. Zur Minimierung der Raumkonfigurationen in der Gesamtparameterstudie wurde eine Tageslichtsimulation vorangeschaltet, aus dieser gingen 129 „Window to Wall Ratio“ - Außenwandkonstellationen zur weiteren Quantifizierung in der thermischen Simulation hervor (s. Tageslichtsimulation Kapitel 4.3).

Glasqualitäten

Thermisches Verhalten sowie die Tageslichtversorgung eines Raumes sind abhängig von der Beschaffenheit der eingebauten Gläser. Neben o.g. Verhältnis der transparenten Flächen zu geschlossenen Flächen bestimmt die Qualität des Glases sowohl den *Tageslicht- und Energieeintrag*, als auch die *Transmissionswärmeverluste*. Der Gesamtenergiedurchlassgrad (g-Wert) steht dabei in direktem Verhältnis zum Lichttransmissionsgrad (T-Wert) – Durch Beschichtungen der Gläser in Position 2 werden die energiereichen Wellenlängen des Sonnenlichtes direkt nach außen reflektiert. Somit werden die

Strahlen nicht in den Raum geleitet und zu Wärmeenergie umgewandelt. Als Sonnenschutzverglasung werden nach DIN 4108-2 [19] alle Gläser mit g-Wert $< 0,4$ bezeichnet. Diese Norm stellt die Grundlage des Nachweises zum sommerlichen Wärmeschutz dar. Der Gesamtenergiedurchlassgrad g-Wert [%] verhält sich proportional zum Lichttransmissionsgrad Tau [%] [20]. Für das Raumklima sind diese beiden also Faktoren divergent. Eine Minimierung des g-Wertes zur Optimierung des passiven Verhaltens im Sommer stellt ebenfalls eine Minimierung der Lichttransmission dar, welche einer maximal anzustrebenden Tageslichtversorgung entgegensteht. Zur Validierung der Auswirkungen unterschiedlicher transparenter Flächen werden zwei unterschiedliche Gläser sowohl in der Tageslicht- als auch in der thermischen Simulation betrachtet.

Glas 1:

Wärmeschutzverglasung: ID 11300 (W74) Climatop Ar90 Tau = 0,71 / g = 0,5 / Ug = 0,69

Glas 2:

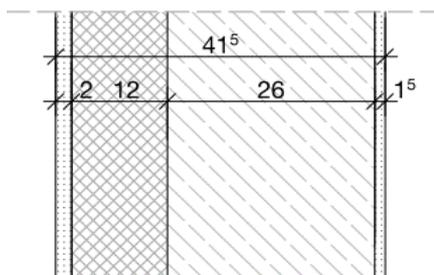
Sonnenschutzverglasung: ID 3500 (W74) Tau = 0,53 / g = 0,26 / Ug = 0,72

Baukonstruktion Außenwand

Für die geschlossenen Bauteile der Außenwand werden 5 unterschiedliche Konstruktionen in Ihren Auswirkungen bezüglich Raumklima, Energieeffizienz sowie Einsatz grauer Energie für die Herstellung und Recycling betrachtet.

Hinsichtlich der wärmetechnischen Qualität bildet der Richtwert der geltenden ENEC für Nichtwohngebäude mit $U = 0,28 \text{ W/m}^2\text{K}$ [21] die Grundlage für die folgenden **drei** Konstruktionen:

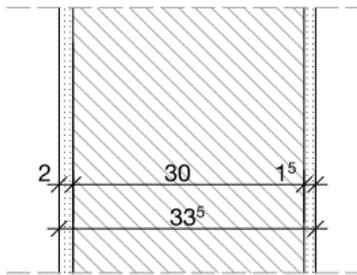
Konstruktion AW 1a – Stahlbeton + WDVS:



15 mm	Gipsputz
260 mm	Stahlbeton
120 mm	Mineralwolle
20 mm	Kalk Zementputz

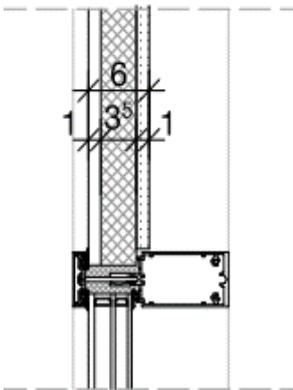
415 mm / 0,27 W/m²K

Konstruktion AW 2a – Ziegel massiv:



15 mm	Gipsputz
300 mm	Ziegel (Poroton S9 P)
20 mm	Kalk Zementputz
<hr/>	
335 mm	/ 0,28 W/m²K

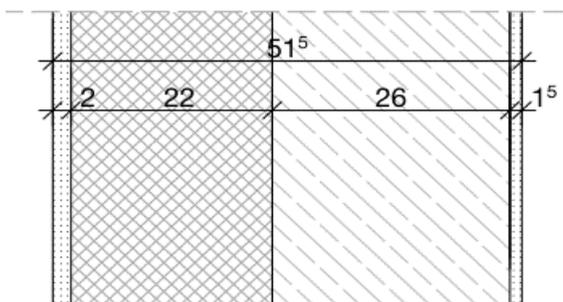
Konstruktion AW 3 – Pfosten-Riegel Konstruktion:



12,5 mm	Gipskartonplatte
35,5 mm	Vakuumisolationspaneel
10,0 mm	Opake Glasschicht
<hr/>	
58 mm	/ 0,19 W/m²K

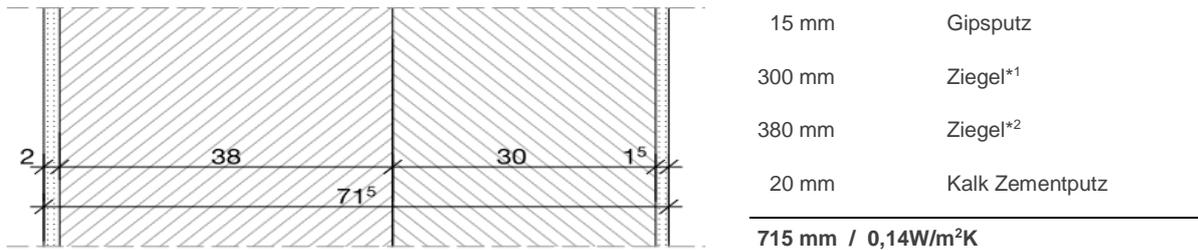
Zur Validierung werden **zwei** der o.g. Bauteilaufbauten, welche einen annähernd gleichen U-Werten haben, hinsichtlich des wärmetechnischen Standard entsprechend den Empfehlungen für des Passivhauses $U=0,15 \text{ W/m}^2\text{K}$ optimiert, und deren Auswirkungen auf den Energieverbrauch und das sommerliche Verhalten durch die Ergebnisse der Simulationen evaluiert:

Konstruktion AW 1b – optimierte Stahlbetonwand + WDVS:



15 mm	Gipsputz
260 mm	Stahlbeton
220 mm	Mineralwolle
20 mm	Kalk Zementputz
<hr/>	
515 mm	/ 0,15 W/m²K

Konstruktion AW 2b – doppelschaliges Ziegelmauerwerk massiv:



*1 entspricht Eigenschaften - Poroton S9 P [22]

*2 entspricht Eigenschaften - Porotherm 38 [23]

Eigenverschattung / Laibung

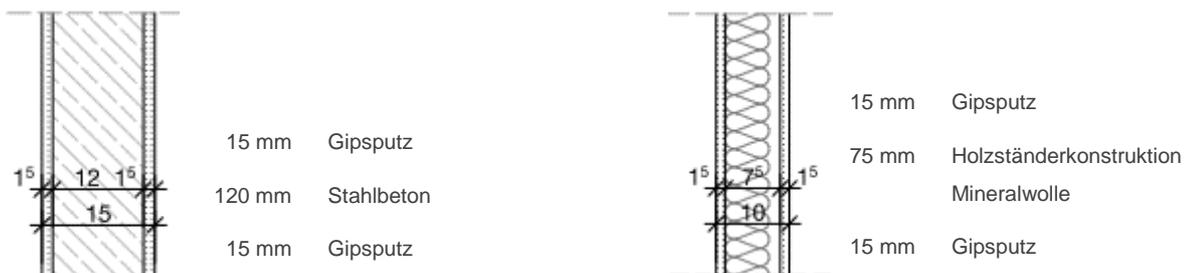
Laibungstiefe der Fassadenöffnungen und daraus resultierende Eigenverschattung der transparenten Flächen bilden den konstruktiven Sonnenschutz ohne Aufwand einer weiteren Komponente zur Verschattung. Zur Quantifizierung des Einflusses dieses passiven Elementes werden Laibungstiefen von 0,25m und 0,5m – abhängig von den o.g. Außenwandkonstruktionen in der Tageslichtsimulation sowie in der thermischen Simulation berücksichtigt.

Thermische Speichermassen / Innenausbau

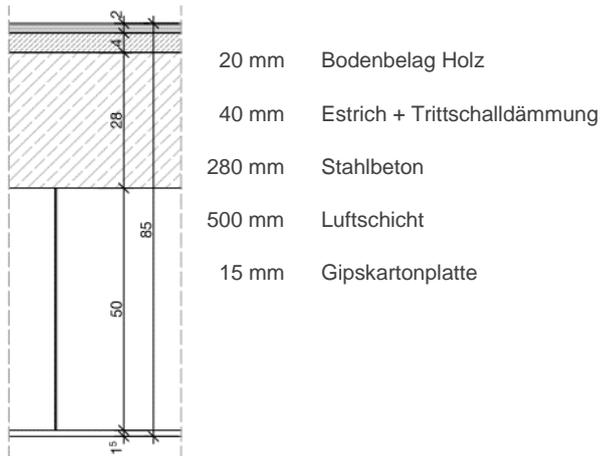
Im Raum wirksame thermische Speichermassen dienen der Pufferung von Lastspitzen im Tageslastgang. Räume mit einer hohen Speicherfähigkeit sind in der Lage interne und solare Wärmeinträge zu puffern und bei Veränderung der Umgebungstemperatur wieder abzugeben.

Arbeitsschritt III betrachtet fokussiert die Auswirkungen der thermischen Masse im Raum mit vier Ausbauszenarien; in die Gesamtparameterstudie fließen final zwei Szenarien zu Bewertung ein: freie Speichermassen an der Decke vs. Abhangedecke.

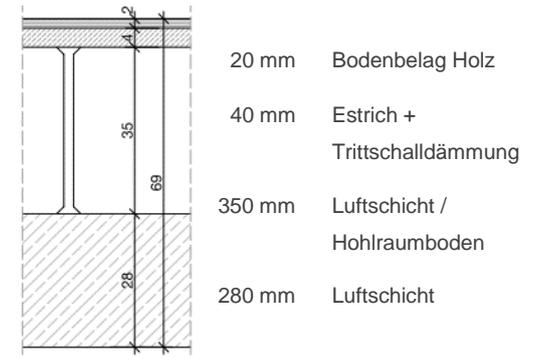
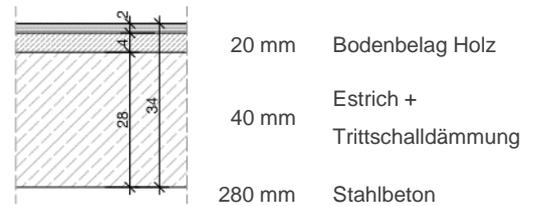
Innenwandkonstruktionen schwer / leicht:



Deckenaufbauten:



Bodenaufbauten:



4.2.2 Aktive Parameter

Zur Validierung und Optimierung der rein passiven Strategien sind folgende aktiven Komponenten im Arbeitsschritt IV ergänzt worden.

Idealer Heizer

Zur Quantifizierung des Energiebedarfs während der Wintermonate wird ein sog. „Idealer Heizer“ in den Simulationen Arbeitsschritt IV eingesetzt. Die Idealisierung bezieht sich auf die direkte Wirkungsweise des Heizsystems, welches den Eigenschaften schnellreagierender Systeme wie z.B. eines Heizkörpers, einer starken Beleuchtung oder einer Infrarotheizung annähernd entspricht. Die Leistung des Systems wird auf 44 W/m^2 begrenzt [24]. Zielwert ist es, auch bei kalten Außentemperaturen, eine operative Temperatur im Raum von $> 20,5^\circ\text{C}$ zu halten. Durch die o.g. Begrenzung der Heizleistung erfolgt kein Ausgleich von absoluten Spitzenlasten z.B. während der natürlichen Lüftung. Kurzfristiges Absinken der Raumtemperatur wird damit akzeptiert. Diese Regelung dient der Energieeffizienz, zudem ist dieser Wert mittels Flächensystemen ebenso wie mit statischen Heizkörpern zu erreichen. Der Ideale Heizer wird bei allen Varianten der Simulationen in Arbeitsschritt IV implementiert. (s. Auswertung/Fazit Arbeitsschritt III)

Variabler außenliegender Sonnenschutz

Der außenliegende Sonnenschutz dient der Ergänzung der physikalischen Eigenschaften des Glases. Die Wirkungsweise ist abhängig von der Ausführung je nach Orientierung und der Steuerung. Zur Quantifizierung des Systems als optimierende Maßnahme für das sommerliche Verhalten wurde ein Außenbehang angesetzt mit einem Abminderungsfaktor von 70%; entspricht einem f_c Wert=0,3. Dieser Wert stellt einen durchschnittlichen Standard dar, Grundlage sind die Angaben der DIN 4108-2 [25]. Er gilt gleichermaßen bei Wärmeschutzverglasung als auch für Sonnenschutzverglasungen. Ein optimierter Wert wird nach o.g. Regel der Technik in Kombination mit einer Sonnenschutzverglasung abgemindert. Für die Tageslichtversorgung wird davon ausgegangen, dass der Behang durch Umlenkung des oberen Drittels, die Tageslichtversorgung bei direkter Strahlung im Raum gewährleistet. Die Steuerung erfolgt je nach Orientierung; ab einer mittleren Einstrahlung von 200 W/m^2 auf die Fassadenfläche der jeweiligen Orientierung ist das System aktiv und ab einem Wert von 150 W/m^2 wird es zurückgefahren.

Mechanische Lüftung

Der Einsatz einer mechanischen Lüftung ermöglicht eine nutzerunabhängige Steuerung der Luftqualität. Somit ermöglicht sie eine konstante Luftqualität, zudem optimiert sie den Innenkomfort und den Energiebedarf im Winter. Kaltluftabfälle durch Öffnung der Fenster werden unterbunden und mittels Wärmerückgewinnung die Lüftungswärmeverluste reduziert. Im Sommer wird bei konstanter Einblastemperatur eine Temperierung im Vergleich zur Außenluft generiert. Durch die geringe Wärmekapazität von Luft $c=0,34 \text{ W/m}^2\text{K}$ ist diese nicht als leistungsstarke aktive Kühlung zu Abfuhr hoher Kühllasten anzusetzen, vielmehr dient die Lüftung zur Minimierung der Spitzenlasten.

Lüftungsprofil Simulation:

Luftwechsel konstant während der Nutzungszeit 8-18 Uhr = 1,5/h; Einbringtemperatur Raum 18°C konstant ganzjährig; ab operativer Temperatur $> 23^\circ\text{C}$ zusätzliche natürliche Lüftung + Nachtspülung entsprechend Szenario 4 natürliche Lüftung (s. Seite 18). Kälteerzeugung über freie Kühlung ergänzt um Kompressionskälte COP 3,5 [26].

Betonkernaktivierung BKT

Als aktive Kühlung werden die Auswirkungen eine Betonkernaktivierung gegenüber einem Verzicht auf ein aktives System zum Ausgleich der Kühllast in den Simulationen

berechnet und bewertet. Da das System über Strahlung im Raum wirksam ist, werden bei der Bewertung nur die Varianten mit freiliegenden Decken berücksichtigt. Das System wird mit einer Vorlauftemperatur von 18°C und einem Massenstrom von 10 kg/(h*m²) betrieben, so dass sich Oberflächentemperaturen von 20°C einstellen. Diese sind in Kombination mit natürlicher Lüftung bezogen auf Tauwasserausfall (hx-Diagramm s. S. 15) unkritisch. Ab einer operativen Temperatur > 24°C wird aktiv über die BKT gekühlt. Die Leistung des Systems wird auf 50 W/m² begrenzt, um Taupunktunterschreitungen an der Decke zu minimieren (entspricht einer T_{Oberfläche}=18-20°C). Die Kälteerzeugung über eine freie Kühlung wird ergänzt, um die Kompressionskälte mit einem COP von 3,5.

4.3 Auswertung Tageslichtsimulation

4.3.1 Vorgehensweise

Die Versorgung mit Tageslicht wird als erster limitierender Faktor gesetzt. Ziel der Tageslichtsimulation ist es Fassadenproportionen, die ganzjährig eine minimale Tageslichtversorgung erreichen für die weiteren Betrachtungen zu eliminieren. Die passive Tageslichtversorgung während der Nutzungszeit stellt einen entscheidenden Faktor in der Maximierung passiver Strategien dar. Als Zielwert wird eine Grundbeleuchtung mit 300lx Beleuchtungsstärke festgelegt. Dies entspricht nach ASR [27] der mittleren Beleuchtungsstärke im Umgebungsbereich von Büroarbeitsplätzen, die absolut eine Anforderung von 500lx haben.

Grundlage der Simulation bilden Klima und Raummodell (s. 4.1). Die Aspekte Belegung und Lüftung sind für die Tageslichtsimulation irrelevant und werden nicht berücksichtigt. Betrachtet werden die vier Orientierungen Süden, Westen Norden und Osten. Im Raummodell wird von einer gleichbleibenden Höhe von 3,00m des Fensters ausgegangen, die Breite ist variabel, die wird in der Simulation in Schritten von 10cm verändert. Aus der Geometrie der Innenwand ergeben sich eine Mindestbreite von 1,55m sowie eine maximale Fensterbreite von 3,75m. Dies entspricht Fensterflächenanteilen von 36% bis 89%. Neben der Validierung der Ergebnisse werden die Einflüsse unterschiedlicher Laibungstiefen entsprechend den vorgesehenen Konstruktionen sowie ein Wärmeschutz- und ein Sonnenschutzglas betrachtet.

Aus den beschriebenen Parametern ergeben sich zur Validierung der Tageslichtsimulation folgende Anzahl an Varianten: **23** verschiedene Fensterbreiten **x 4** Orientierungen **x 2** Tau-Werte **x 2** Laibungstiefen = **368 Varianten**

4.3.2 Definition sDA Faktor

Entgegen der üblichen Auswertung des Tageslichtquotienten [28] werden die Ergebnisse der vorliegenden Studie mittels sog. sDA-Faktor evaluiert. Während die Auswertung nach Tageslichtquotient sich auf einen Punkt im Raum auf Arbeitshöhe bezieht, liefert der sDA Faktor eine Aussage zur Versorgung der Grundfläche des Raumes.

Der sDA Faktor (Spatial Daylight Autonomy) beschreibt den Anteil der analysierten Raumfläche (gesamte Grundfläche), welcher zu 50% der jährlichen Nutzungszeit ausreichend mit Tageslicht versorgt wird. Dabei wird der Prozentsatz der mit einer Beleuchtungsstärke von 300lx versorgten Grundfläche angegeben.

In der vorliegenden Studie wurden entsprechend der Definition das minimale Kriterium mit 55% und die max. beleuchtete Fläche mit 300lx auf 75% der Grundfläche festgesetzt. Der Bewertungsrahmen ergibt sich damit aus: **sDA_{300,50%}=55%** und **sDA_{300,50%}=75%**. Dieser Index wurde von der Illuminating Engineering Society of North America (IES) 2012 anerkannt.

4.3.3 Simulationsergebnisse Tageslicht

Die folgenden Boxplot Grafen zeigen die Bandbreite der Ergebnisse aus den Simulationen mit Aussagen je Orientierung und folgenden baulichen Randbedingungen:

- a) Unterschiedliche Glasqualität:
 - t5 = Sonnenschutzglas mit Tau= 0,5;
 - t7= Wärmeschutzverglasung mit Tau = 0,7
- b) Abhängigkeit unterschiedliche Laibungstiefe 25cm bzw. 50cm

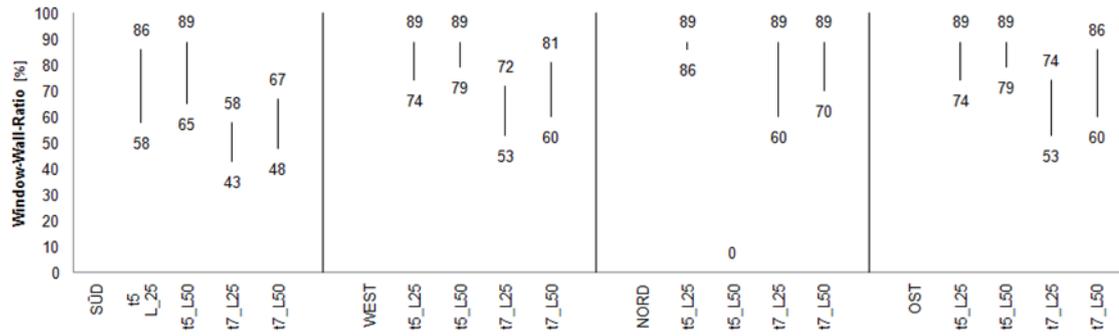


Abbildung 12_Boxplot Ergebnis Fensterflächenanteil [%] Kriterium sDA 55%-75%

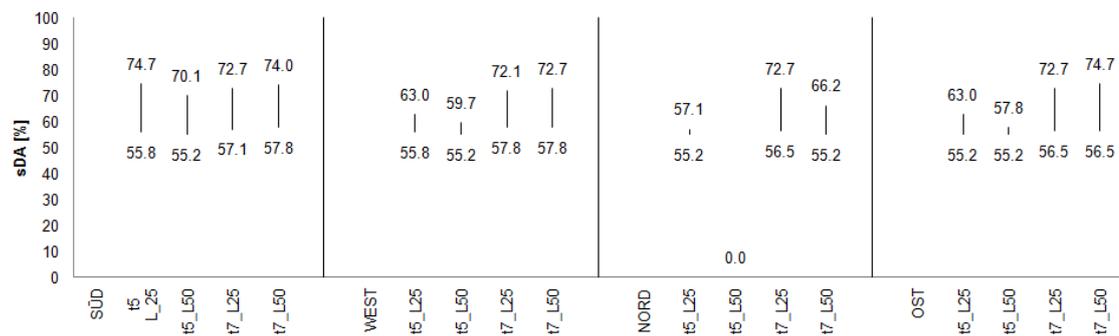


Abbildung 13_Boxplot Ergebnis sDA [%]

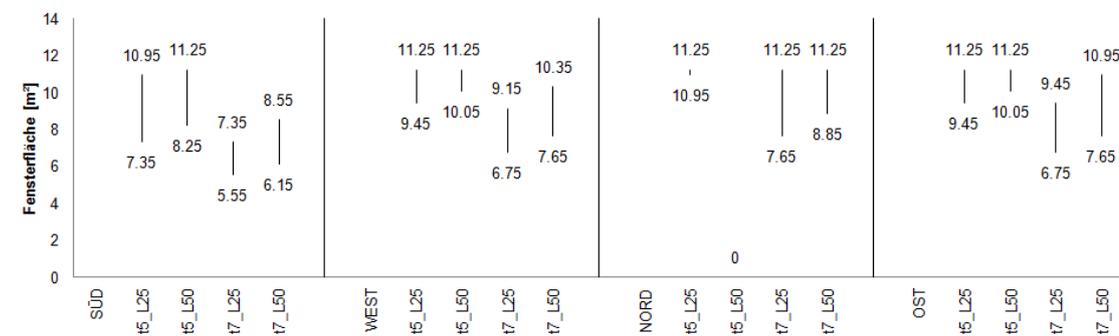


Abbildung 14_Boxplot Ergebnis absolut mögliche Bandbreite Fensterflächen [m²]

Die Berechnungen zeigen, dass bei gleicher Tageslichtausleuchtung der FFA bei Einsatz von Sonnenschutzglas deutlich höher sein muss. Im Norden bietet die Kombination aus Laibungstiefe und Sonnenschutzglas keinen Mehrwert. In dieser Orientierung sind im Vergleich die größten Flächen zur natürlichen Tageslichtversorgung notwendig, jedoch weist diese Orientierung die geringsten Wärmelasten auf, da überwiegend indirekte Strahlung auf die Fassade auftritt. Damit ist der erforderliche höhere FFA unproblematisch. Nach Evaluierung der Simulationsergebnisse haben 129 Varianten o.g. Kriterium erfüllt und werden in den thermischen Simulationen berücksichtigt.

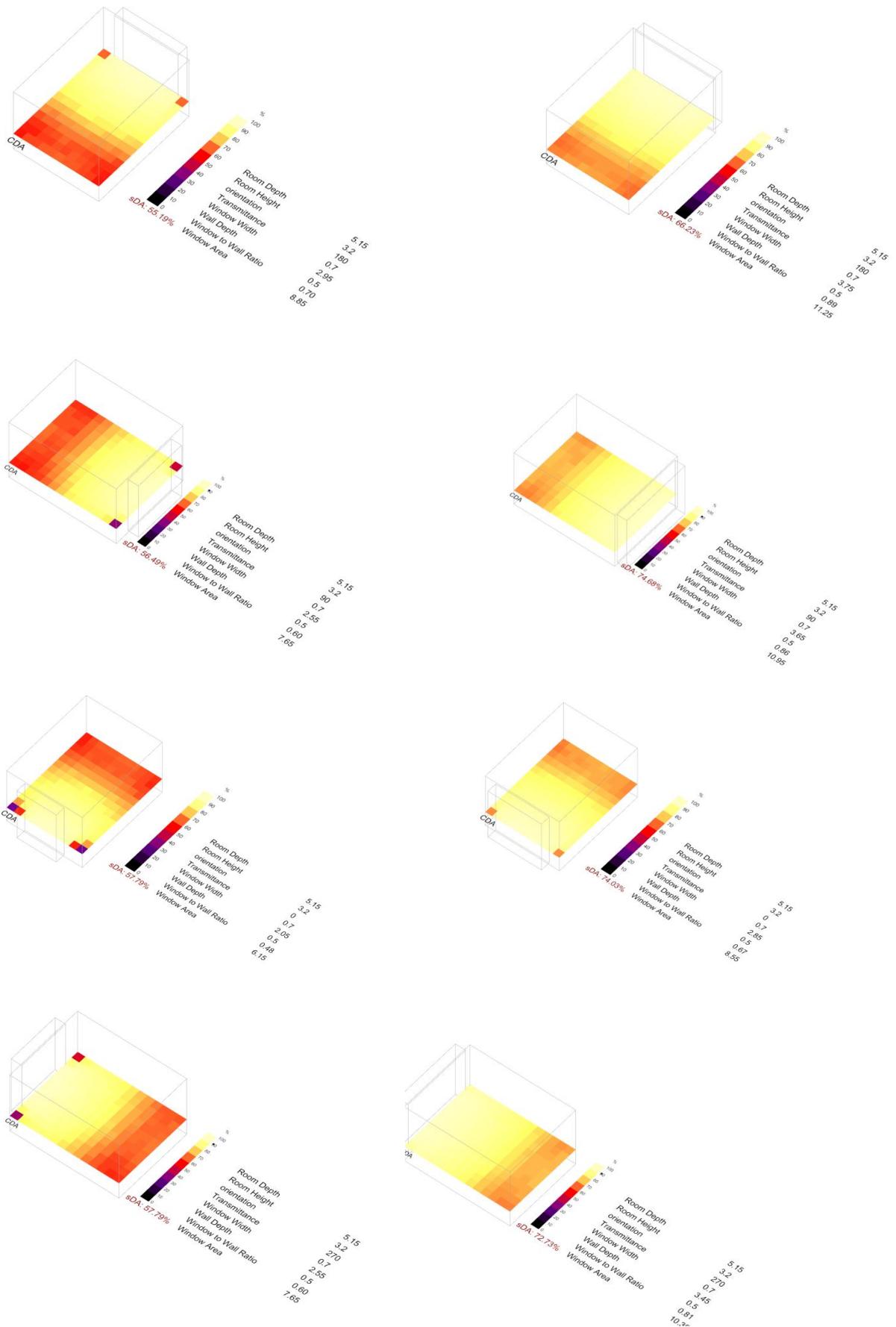


Abbildung 15_a-h_Darstellung Verteilung Tageslicht min.-max. je nach Orientierung N,S,W,O; t=0,7

4.4 Auswertung thermische Simulation

Das Augenmerk der Studie liegt auf den Auswirkungen der Fassade auf das Raumklima. Die aktuell geforderten Mindeststandards an der wärmetechnischen Qualität der primären Außenhaut - bestehend aus transparenten und geschlossenen Bauteilen - weisen ein hohes Maß an Schutz vor Transmissionswärmeverlusten auf, dass sich die Frage stellt, in welchem Maß ergänzende technische Maßnahmen zur Schaffung eines behaglichen Raumklimas nach den geltenden Regeln der Technik grundsätzlich notwendig sind. Die Validierung des Einflusses jedes gewählten passiven Parameters erfolgt mittels thermisch dynamischen Simulationen in den Arbeitsschritten III + IV. Ausgewertet werden neben Raumklima und Energiebedarf (bei Einsatz von Systemen) die Robustheit der einzelnen Parameter.

4.4.1 Auswertung Raumklima und Energie

4.4.1.1 Arbeitsschritt III – Untersuchung rein passive Komponenten

Übersicht Parameter Arbeitsschritt III

	Zusammenfassung	Physikalische Kennwerte / Charakteristika	Anzahl
Klima	Potsdam extrem	TRY_2011_dwd_4x_170EW_81m	1
Geometrie	Standardraum	Grundfläche 3,95 m*5,15 m Raumhöhe 3,20 m	1
Belegungsdichte	2 Personen Büro	Nutzerprofil „Büronutzung“	1
Lüftung	Ziel: Auswirkungen Lüftungsverhalten mit thermischer Masse Innenraum; Auswirkungen Jahreslastgang	Szenario 1- 4 (Kapitel 4.1.4)	4
Orientierung	Betrachtung des Modellraums Raum mit Südorientierung ; mit max. passiven gewinnen in den Wintermonaten	Kennwerte Einstrahlung Süden	1
FFA	Fensterflächenanteil 60% konstant	$12,64\text{m}^2 * 0,6 = 7,58 \text{m}^2$	1
Glasqualität	Ziel Auswertung: Einfluss Glasqualität auf Heiz- und Kühllast im Jahres- und Tagesverlauf	$t= 0,7 / t=0,5$	2
Baukonstruktion AW	Konstante Außenkonstruktion AW 1a	$U= 0,27 \text{W/m}^2\text{K}$	1
Eigenverschattung	Verschattung entsprechend Konstruktion		1

Thermische Masse	Ziel Auswertung Einfluss der Speichermassen in Kombination mit verschiedenen Lüftungsszenarien	Innenausbauszenarien: alle Umschließungsflächen massiv Decke und Boden massiv; Innenwand Leichtbau Decke massiv; Boden aufgeständert Innenwand Leichtbau Decke abgehängt und Boden aufgeständert Innenwand Leichtbau	4
Aktive Systeme	- keine -		0

Vorgehensweise bei der Auswertung der Ergebnisse Arbeitsschritt III:

Ziel der Auswertung ist die Validierung von Raumtemperaturen in Abhängigkeit der Speichermassen im Innenraum und der Lüftungsszenarien. Die Ergebnisse dienen als Grundlage einer Empfehlung hinsichtlich der Fragestellung, welche operativen Raumtemperaturen sich ohne jegliche aktiven technischen Systeme in einem Büroraum einstellen. Hierfür wird in Abhängigkeit der 4 Lüftungsszenarien die jährliche Häufigkeit der operativen Raumtemperaturen ausgewertet:

Lüftung Szenario 1: Infiltration + 30 m³/Pers.

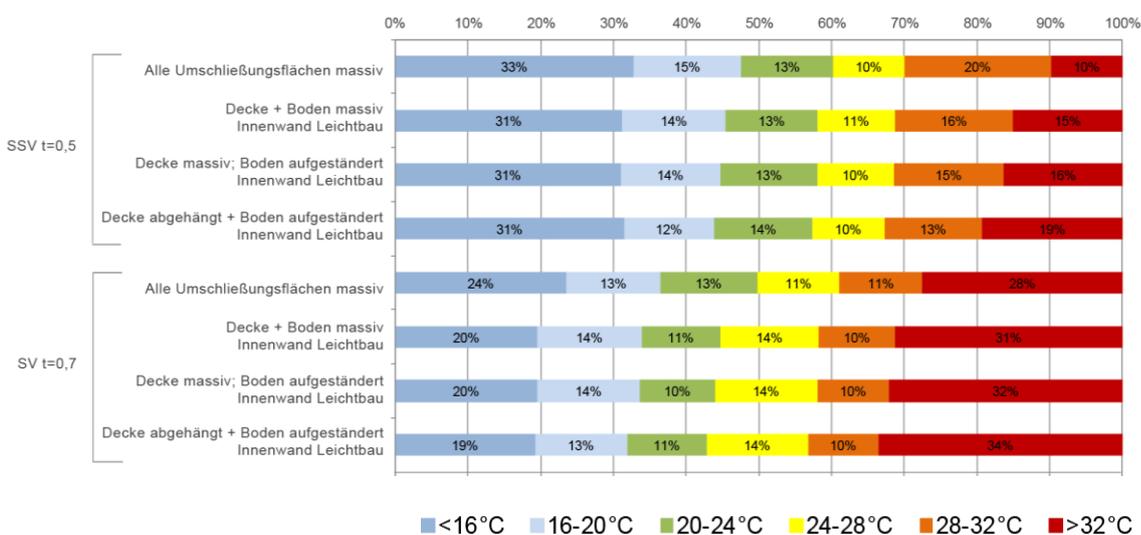


Abbildung 16_Verteilung operative Temperaturen_Lüftungsszenario 1

Lüftungsszenario 2 – reine Infiltration 0,16/h

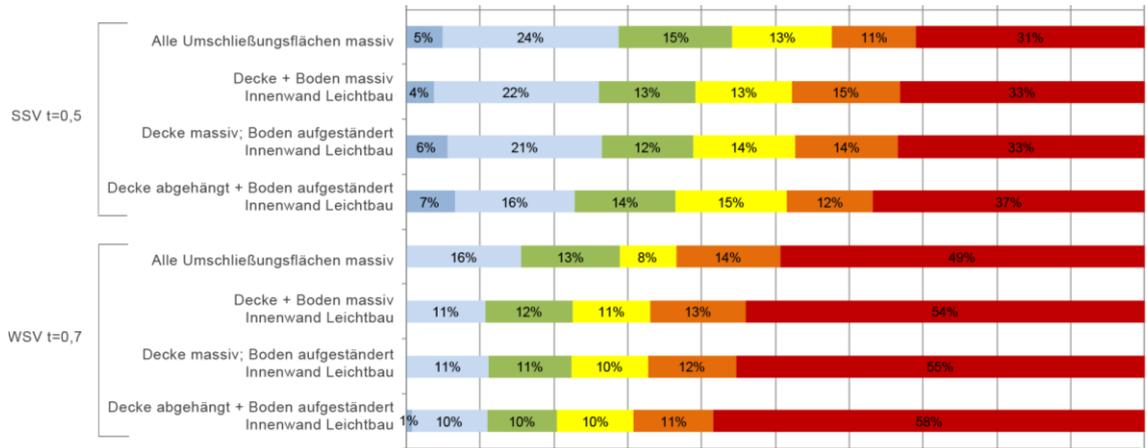


Abbildung 17_ Verteilung operative Temperaturen_Lüftungsszenario 2 + CO₂

■ <16°C ■ 16-20°C ■ 20-24°C ■ 24-28°C ■ 28-32°C ■ >32°C

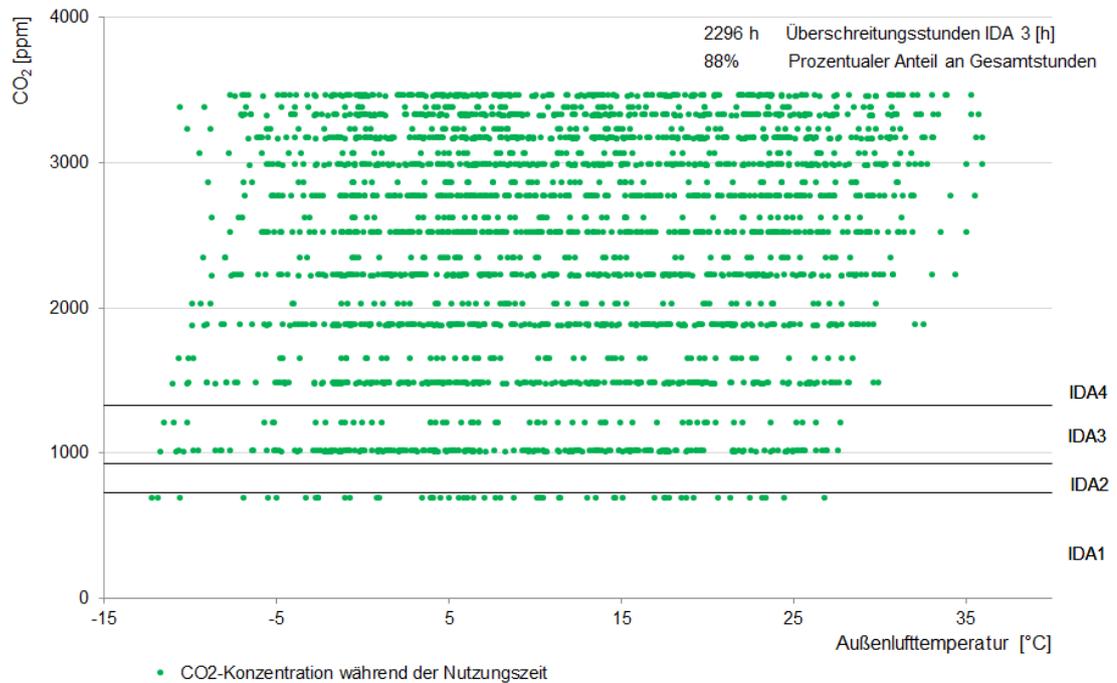


Abbildung 18_ Verteilung CO₂_Lüftungsszenario 2

Lüftung Szenario 3: Infiltration + 30 m³/Pers. + Entwärmung

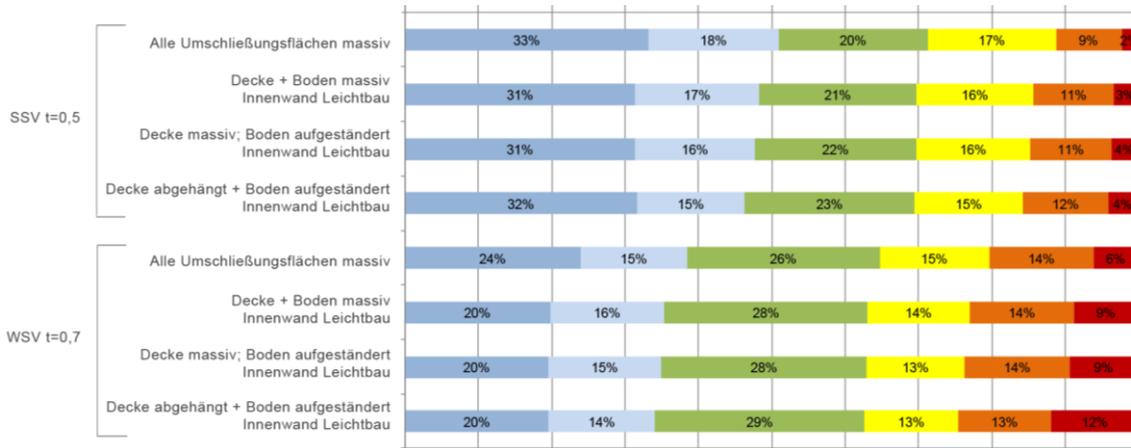


Abbildung 19_ Verteilung operative Temperaturen_Lüftungsszenario 3

■ <16°C ■ 16-20°C ■ 20-24°C ■ 24-28°C ■ 28-32°C ■ >32°C

Lüftung Szenario 4: Infiltration + 30 m³/Pers. + Entwärmung + Nachtspülung

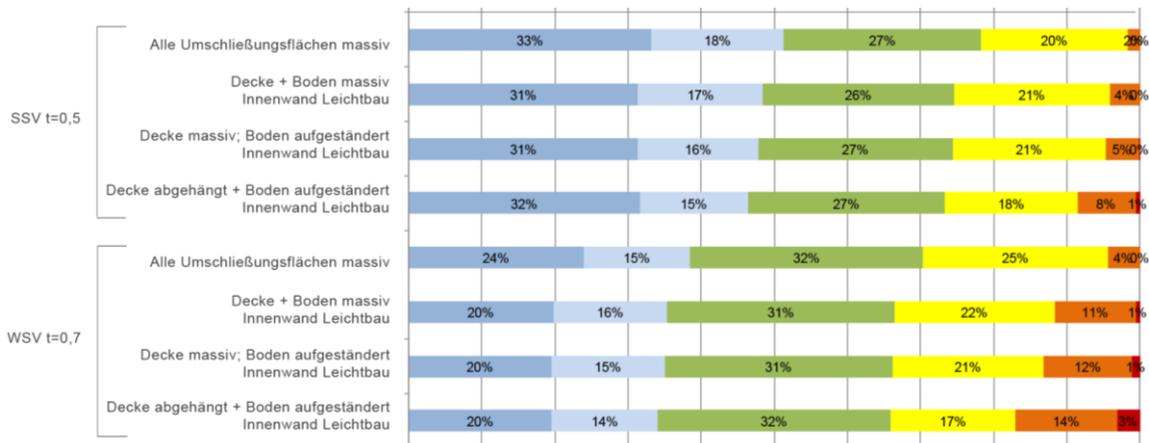


Abbildung 20_ Verteilung operative Temperaturen_Lüftungsszenario 4

■ <16°C ■ 16-20°C ■ 20-24°C ■ 24-28°C ■ 28-32°C ■ >32°C

Fazit Arbeitsschritt III

Die Ergebnisse des ersten Simulationsschritts, welcher überwiegend zur Abbildung des Einflusses von Speichermassen sowie zur Evaluierung der CO₂ Konzentrationen unterschiedlicher Lüftungsszenarien dient, zeigt, dass die Einbindung von Speichermassen für das sommerliche Verhalten ausschlaggebend ist. Dabei ist der Unterschied zwischen einem umschließenden massiven Ausbau gegenüber einem leichten Ausbau mit offenliegenden Speichermassen an den Decken nicht erheblich. Die Projektbetrachtungen (s. Kapitel 3 + Anlage I) zeigen, dass ein Aufgeständerter Boden zur Medienführung oder eine abgehängte Decke eine hohe Flexibilität und Funktionalität aufweist. Lüftungsszenario 2 verdeutlicht, dass trotz der internen Lasten der Nutzer und der Geräte, die in den anerkannten Regeln der Technik eine Temperatur von 20°C im Raum garantiert sehen, nicht immer erreicht werden kann. Sehr geringe Transmissionswärmeverluste sowie sehr kalte Außentemperaturen mit Auswirkungen auf die Infiltration führen zu wenigen Stunden unter 20°C im Raum, ohne Einhaltung eines hygienischen Mindestluftwechsels. Grundsätzlich zeigt diese Auswertung, dass im Jahresverlauf lange Perioden die Verluste soweit reduziert sind, dass während der Betriebszeiten der Nutzer durch die eigene Wärmeleistung und die Abgaben der Medien im Raum, seinen Lüftungswärmebedarf selber in den Raum einbringt. Die Grafik zeigt, dass bei geschlossenen Fenstern der Anteil der Betriebsstunden mit Raumtemperaturen zwischen 16 und 20°C stark reduziert werden können. Die Darstellung der CO₂ Konzentration belegt jedoch, dass dieses Szenario ohne Einsatz einer mechanischen Lüftung keine akzeptablen hygienischen Verhältnisse erreicht.

4.4.1.2 Arbeitsschritt IV – Gesamtparameterstudie

Vorgehensweise Arbeitsschritt IV

Aufgrund der o.g. Erkenntnisse der Simulation in Arbeitsschritt III hinsichtlich der zu erwartenden winterlichen raumklimatischen Verhältnisse, wird in den weiteren Betrachtungen vom Einbau eines Heizsystem ausgegangen.

Ausgewertet werden der Einfluss der Parameter innerhalb der vier unterschiedlichen Grundkonzepte auf das sommerliche Verhalten sowie der Energiebedarf.

Die Auswertung der Simulationsergebnisse zum **sommerlichen Wärmeschutz** erfolgt mittels eines adaptiven Komfortmodells. Der Komfortraumtemperaturbereich wurde gemäß DIN 15251:2012-12, S. 5 [29] nach folgenden Kriterien definiert:

$$T_{air} = 18 \text{ °C} + 0,25 * T_{amb}$$

mit

T_{air} = Raumlufttemperatur

T_{amb} = Außenlufttemperatur

Ebenso wird die zulässige Sollwertabweichung vom Komfortbereich für die Einhaltung der Klasse II nach DIN 15251:2012-12 [29], S. 6 und 43, Tab. G.1 mit: $0,5 * (\text{Nutzungszeit} * \text{Nutzungstage}) * 2 \text{ K [Kh/a]}$ definiert. Für das den Simulationen zugrunde liegende Nutzungsprofil ergeben sich damit folgende zulässige Kelvinstunden im Jahr:

$$0,5 * 10 \text{ h/d} * 261 \text{ d/a} * 2 \text{ K} = \mathbf{261 \text{ Kh/a}}$$

Der nach Norm zulässige Toleranzwert (Tabelle G.1 DIN 15251:2012-12 [29]) wird bei der o.g. Berechnung mit 5 % angesetzt, da kurzzeitige Abweichungen der Temperaturen, wie z.B. durch Fensteröffnen zulässig sind, und dem angesetzten Grundkonzept entsprechen.

Der zweite Evaluierungswert bezieht sich auf den **Energiebedarf** für Heizung bei allen 4 Konzepten und ergänzend bei den Konzepten „Mechanische Lüftung“ und „Betonkernaktivierung“ auf die Hilfsenergie bzw. den Energiebedarf zur Kältebereitstellung. Zur Vergleichbarkeit wurde der Energiebedarf in elektrischer Energie ausgewertet. Bei der Wärmeerzeugung wurde ein COP von 3 und der Kälteerzeugung ein COP von 6 angesetzt.

Übersicht Parameter Arbeitsschritt IV:

	Zusammenfassung	Physikalische Kennwerte / Charakteristika	Anzahl
Klima	a) Potsdam normal b) Potsdam extrem	TRY_2011_dwd_4y_170EW_81m TRY_2011_dwd_4x_170EW_81m	2
Geometrie	Standardraum	Grundfläche 3,95 m*5,15 m Raumhöhe 3,20 m	1
Belegungsdichte	a) 2 Personen Büro b) 6 Personen Seminar	Nutzerprofil Büronutzung Nutzerprofil Seminar	2

Lüftung	Natürliche Lüftungsstrategie: Infiltration + 30m ³ /Pers. + Entwärmung + Nachtspülung	1,08/ h bis 6/h bei Nachtlüftung	1
Orientierung	Alle Orientierungen	Kennwerte Einstrahlung: Süden= 0 Westen= 90 Norden= 180 Osten= 270	4
FFA	Fensterflächenanteile gem. Auswertung Tageslichtsimulation	sDA 55% - 75%	129
Glasqualität	a) 3 Scheiben WSV b) 3 Scheiben SSV	t= 0,7 / g=0,5 t=0,5 / g= 0,26	2
Baukonstruktion AW	Außenwandkonstruktionen AW1 - AW3	U= 0,14 – 0,28 W/m ² K	5
Eigenverschattung	Verschattung entsprechend Konstruktion	0,25m – 0,5m	2
Thermische Masse	Einfluss Speichermassen Decke	Decke massiv; Boden aufgeständert Innenwand Leichtbau Decke abgehängt und Boden aufgeständert; Innenw. Leichtbau	2
<u>Aktive Parameter</u>			
Heizung	Idealer Heizer	Begrenzung Leistung 44 W/m ²	1
Sonnenschutz	Variabler Sonnenschutz gesteuert	Grenzwert 200 W/m ² , fc= 0,3	1
Mechanische Lüftung	Konstante Versorgung während der Nutzungszeit + ergänzt um Entwärmung + Nachtspülung	Auslegung 18°C konstant; n= 1,5/h	1
Betonkern-aktivierung	Kühlung über die Decke	Begrenzung 50 W/m ² ; Temp. VL = 18°C; Set Point 24°C	1

Auswertung Simulationsergebnisse Arbeitsschritt IV:

a) Validierung Einfluss Wetterdatensatz:

Das Klima spielt als unsichere Randbedingung eine entscheidende Rolle zur Definition von Robustheit. Daher wurde zur Validierung einmal mit Klimadatensatz Potsdam ext-

rem gerechnet und im Vergleich der Datensatz Potsdam normal eingesetzt. Am Beispiel der folgenden Diagramme zeigt sich der deutliche Einfluss des Klimas auf die Ergebnisse hinsichtlich sommerlichem Verhalten und Energiebedarf im Gebäude.

Darstellung der Auswirkungen unterschiedlicher Klimadatenätze:

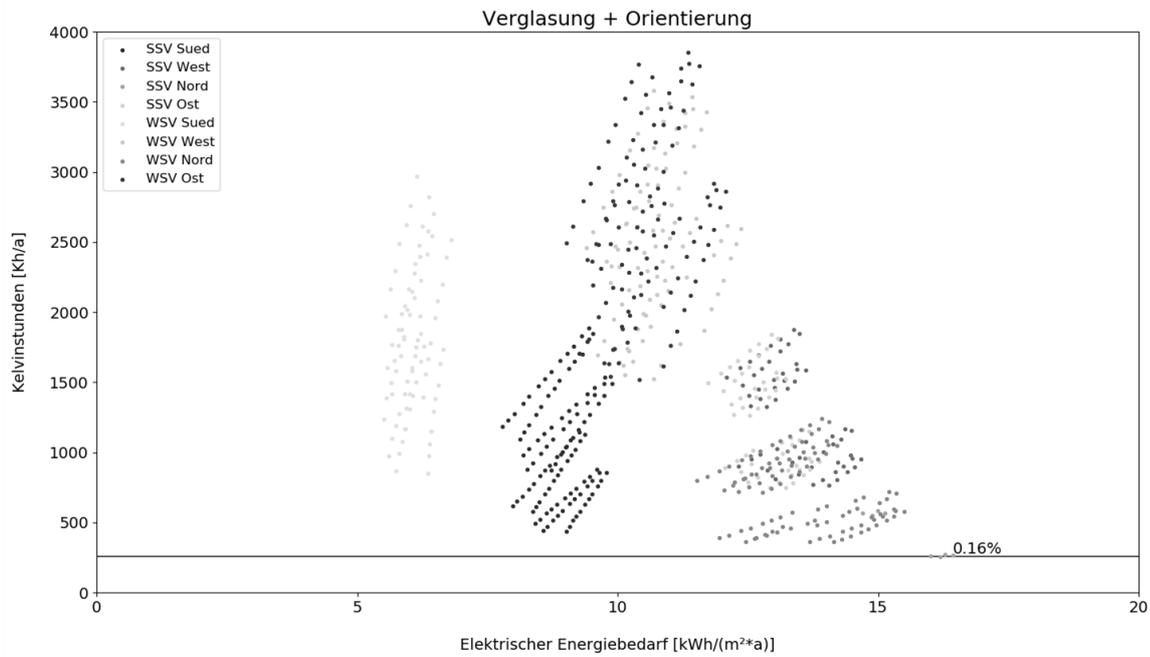


Abbildung 21_ Parameter Orientierung in Kombination mit unterschiedlichen Glasqualitäten; Klima: Potsdam extrem

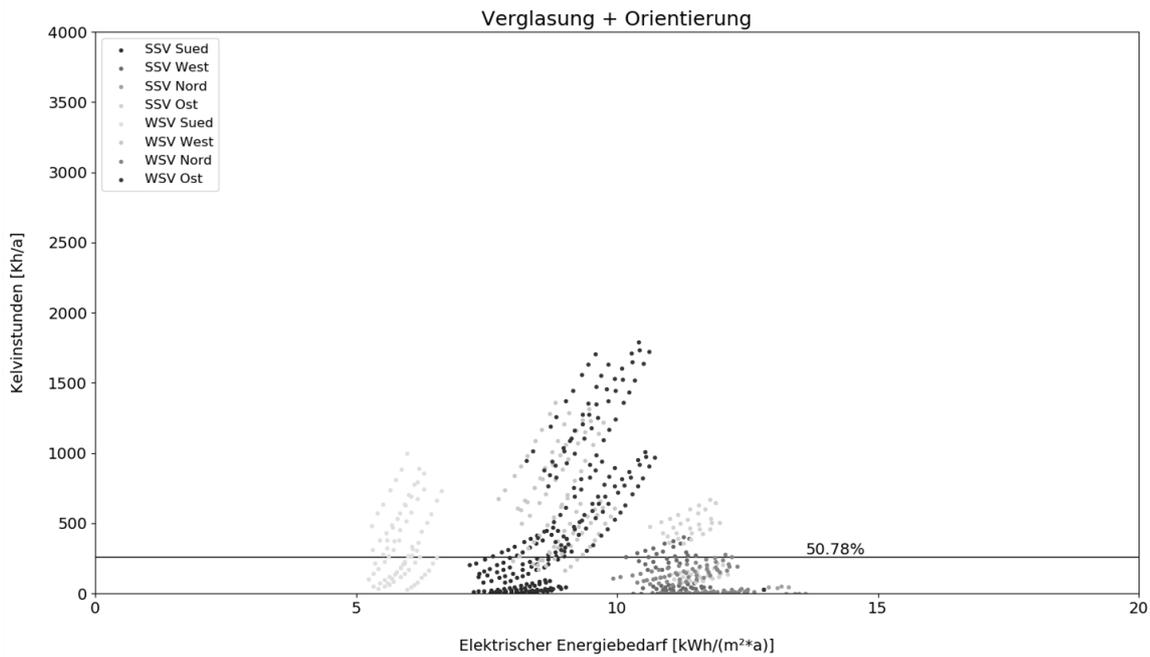


Abbildung 22_ Parameter Orientierung in Kombination mit unterschiedlichen Glasqualitäten; Klima: Potsdam normal

Fazit Vergleich Klimadatenansätze:

Im Vergleich der Randbedingung Klimadatenansatz, von Potsdam extrem und Potsdam normal hat sich gezeigt, dass sich erhebliche Unterschiede in der Einhaltung der zugelassenen K_h/a [%] ergeben. Während mit der Randbedingung Potsdam normal 50,78 % der gerechneten Varianten während der Nutzungszeit das Kriterium erfüllen, erreichen es lediglich 0,16 % der Varianten bei Änderung der Klimadaten.

Im Vergleich „Potsdam extrem gegenüber normal“ zeigt sich ein deutlicher Unterschied im sommerlichen Wärmeschutzverhalten mit einer Differenz von über 50 % der Varianten, die das Kriterium nicht einhalten. Dabei ist anzumerken, dass die Extremwetterdaten des Deutschen Wetterdienstes schon heute die Realität stark widerspiegeln. Zudem ist es das Ziel des Projektes, eine Bauweise für ein robustes Gebäudeverhalten zu evaluieren. Somit ist im weiteren Verlauf der Studie eine Betrachtung mit dem extremen Wetterdatensatz zwingen erforderlich.

b) Validierung Einfluss einzelne passive Parameter

Grundlage der Simulation ist das System *passiv+_aktiver Heizer*. Dabei wird gemäß vorheriger Untersuchungen ein rein passiver Gebäudebetrieb ergänzt durch ein aktives Heizsystem. Variiert wurden die sechs passiven Parameter Orientierung, Fensterflächenanteil, Verglasung, Außenwand, Laibung, und Decke. Untersucht wurde deren Einfluss auf den sommerlichen Wärmeschutz und den Energiebedarf für den Gebäudebetrieb.

Folgende Abbildung zeigt die resultierende Punktwolke aller kombinierten Varianten des Systems *passiv+_aktiver Heizer* nach Energiebedarf (x-Achse) und Kelvinstunden (y-Achse).

Ergebnisse Szenario: *Passiv +* _ aktives Heizsystem

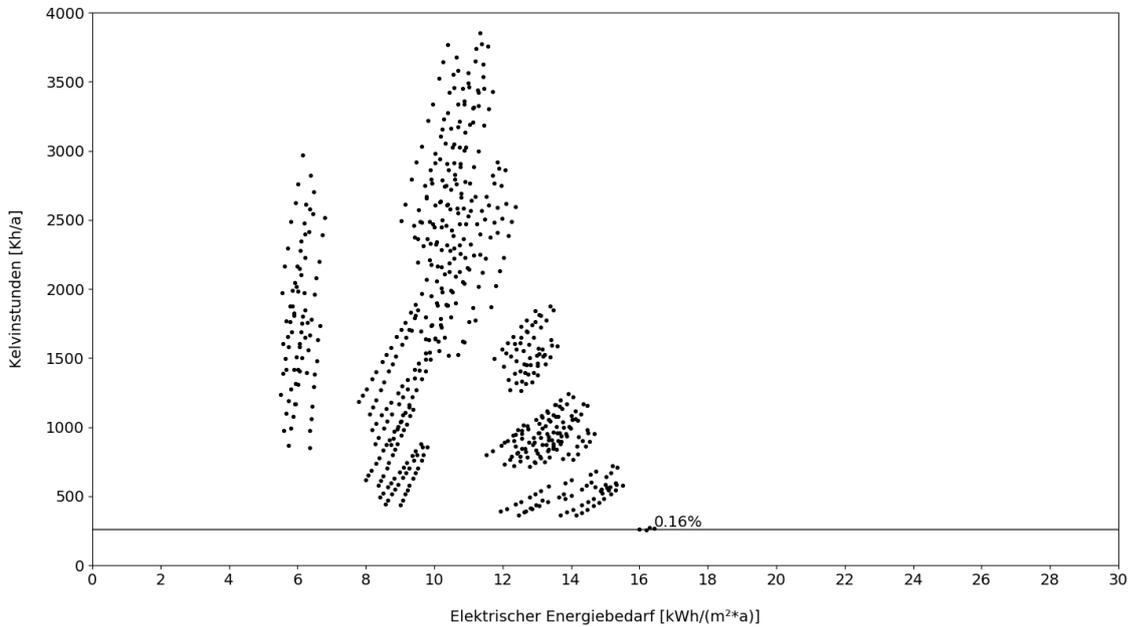


Abbildung 23_Punktwolke der Ergebnisse passiv+

Ergebnisse einzelne Parameter

Das Gesamtbild der resultierenden Punktwolken in den folgenden Grafen ist immer das gleiche. Durch die farbliche Anlegung werden jeweils die einzeln betrachteten Parameter visualisiert.

In der Darstellung der einzelnen Parameter wird neben den absoluten Ergebnissen je Parameter ein gemittelter Wert (Ermittlung nach Standardabweichung) angegeben. Dieser dient der Evaluierung hinsichtlich Robustheit (s.4.4.2). Durch die Relation der Punkte zueinander auf x-Achse bzw. y-Achse wird die Robustheit abgeleitet.

Orientierung

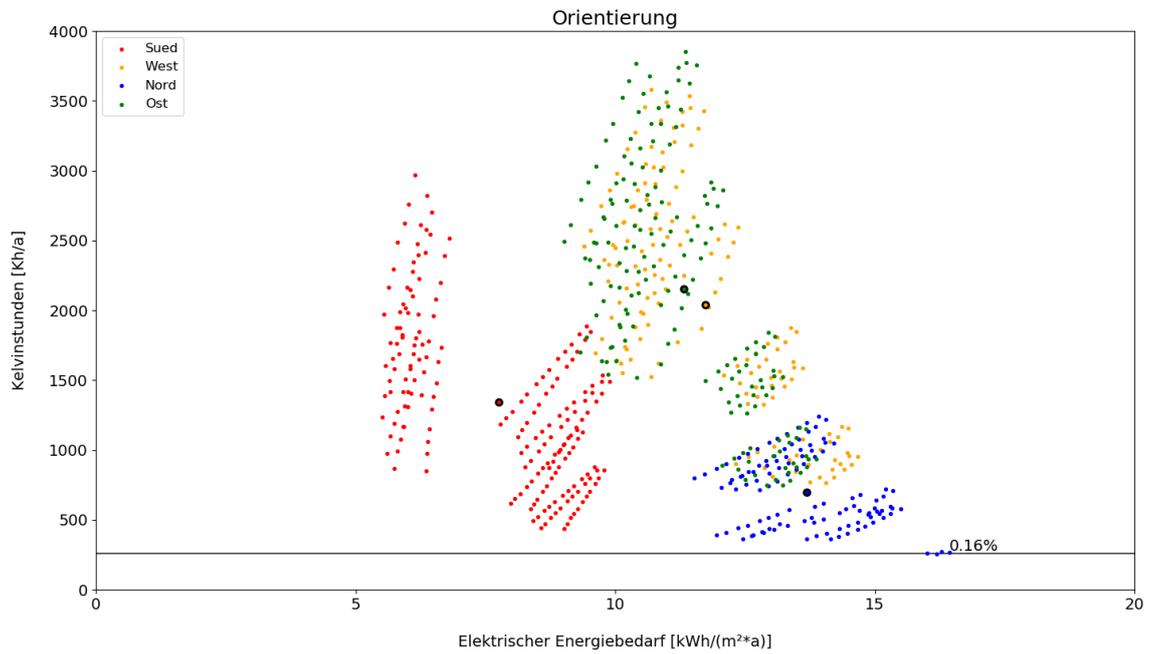


Abbildung 24_ Parameter Orientierung - passiv+;

Fensterflächenanteil

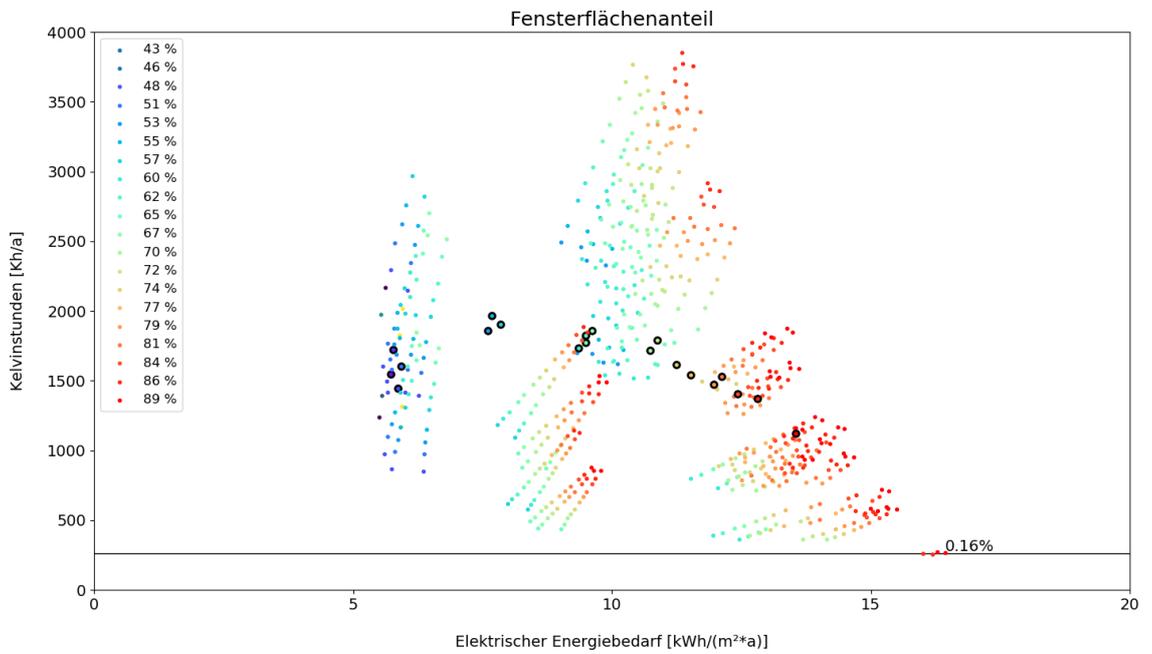


Abbildung 25_ Parameter Fensterflächenanteil - passiv+;

Glasqualität

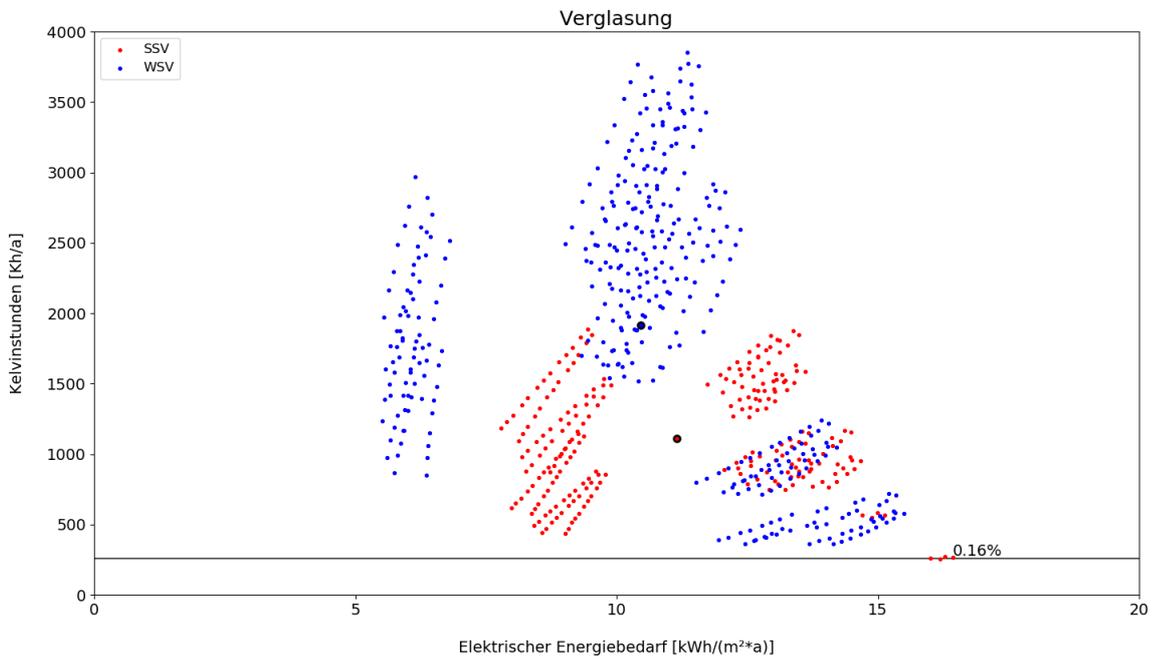


Abbildung 26_Parameter Glasqualität / Verglasung WSV – SSV - passiv+

Baukonstruktion Außenwand

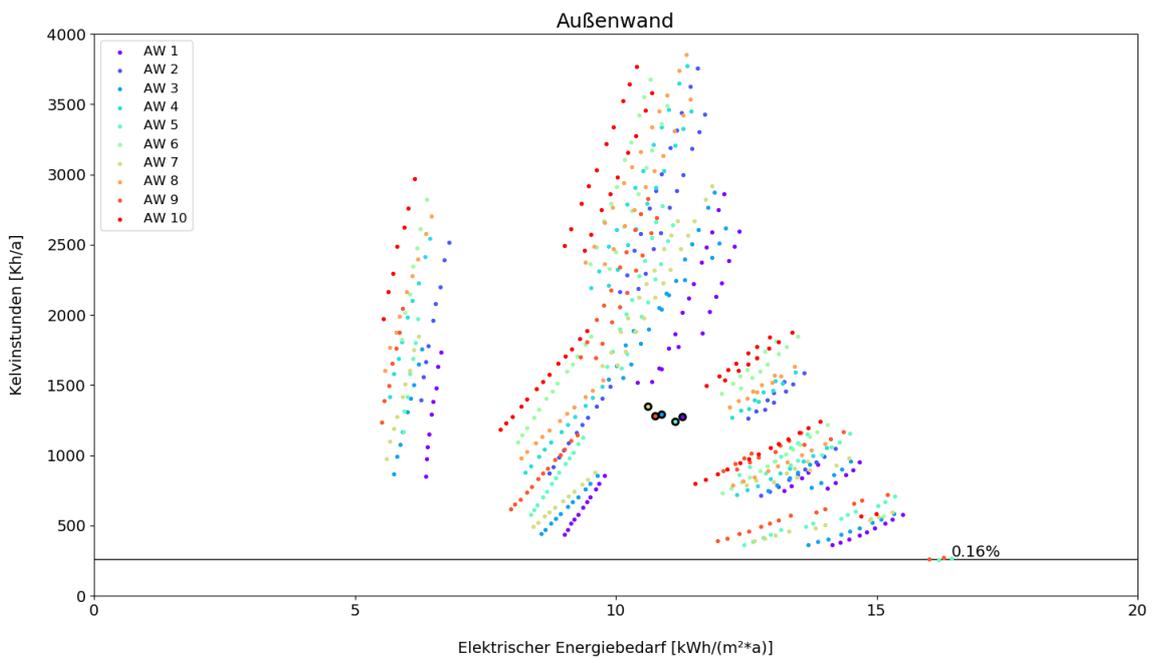


Abbildung 27_Parameter Baukonstruktion AW + thermische Masse Innenausbau - passiv+

Eigenverschattung / Laibung

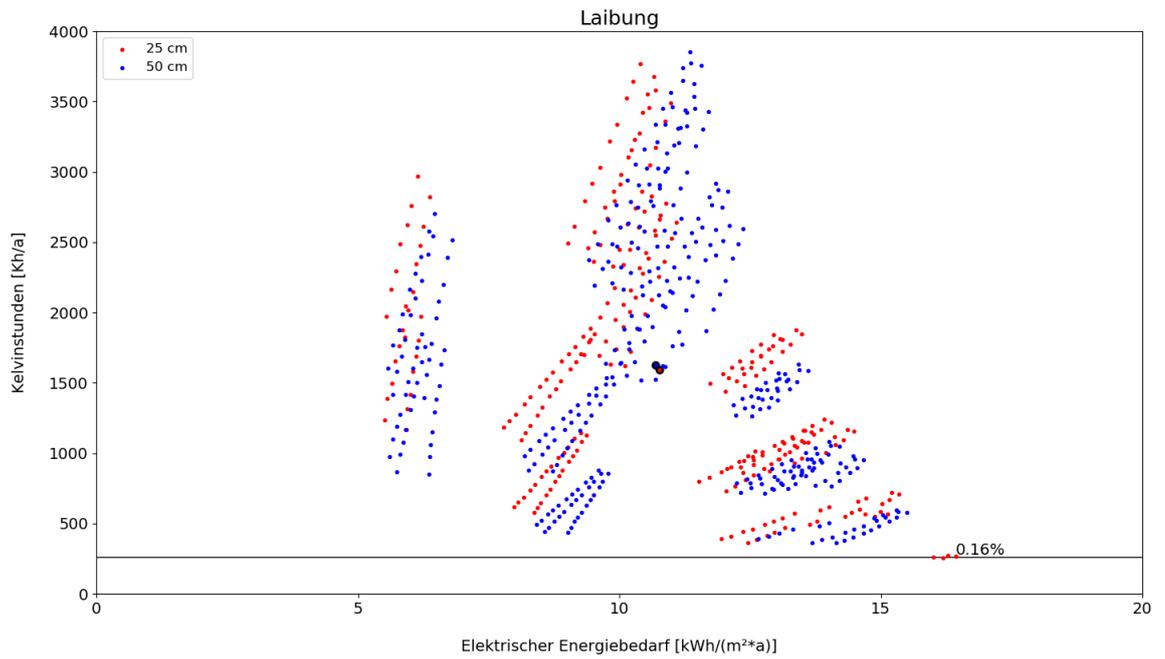


Abbildung 28_ Parameter Eigenverschattung / Laibung Innenausbau - passiv+

Thermische Speichermasse Innenraum

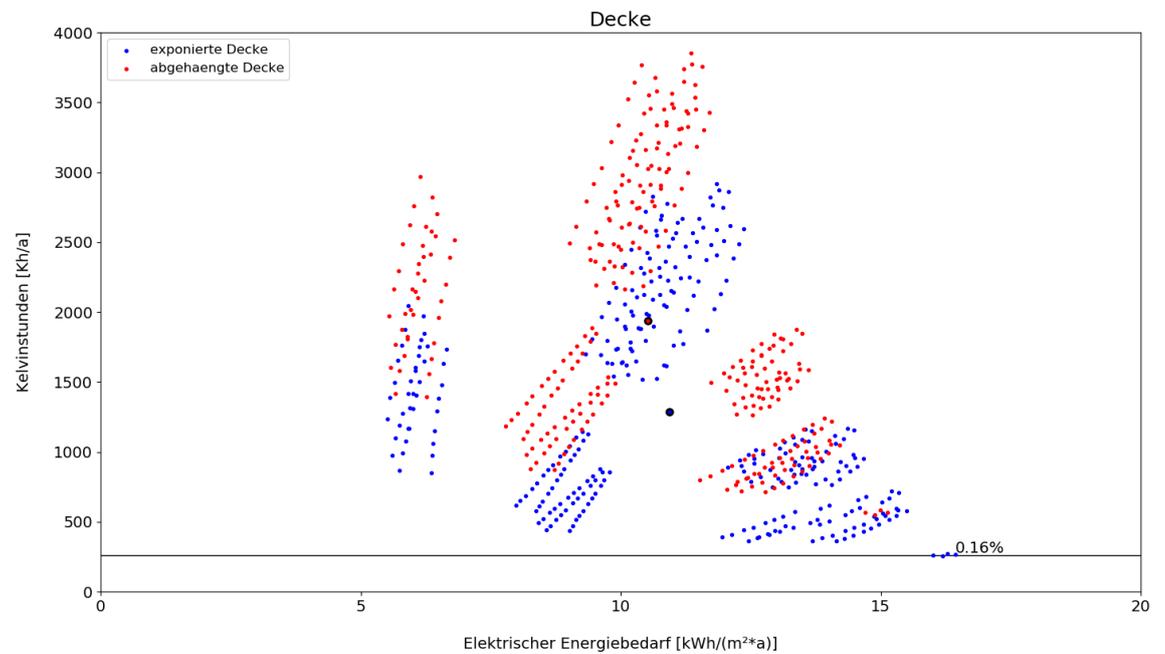


Abbildung 29_ Parameter Anteil wirksame thermische Speichermassen Decke - passiv+

Es zeigt sich, dass alle untersuchten Varianten – außer einzelne Varianten mit Nordorientierung – den nach DIN 15251 vorgegebenen sommerlichen Wärmeschutz nicht einhalten können. Wie zu erwarten, stellt sich die Ost- und Westorientierung sowie eine Konfiguration mit sehr großem Fensterflächenanteil als sehr kritisch dar. Konstruktive Verschattungselemente, wie in diesem Fall die erweiterte Laibung, verbessern das Ergebnis nur geringfügig. Eine Sonnenschutzbeschichtung zeigt eine deutliche Verbesserung, führt als singuläre Maßnahme jedoch nicht zu dem gewünschten Ergebnis – sofern man die Tageslichtqualität nicht einschränken will. Die betrachteten Außenwandkonstruktionen zeigen wenig Einfluss, was darauf zurückzuführen ist, dass im Bürobaubau die exponierte Deckenfläche im Verhältnis zur wirksamen Außenwandfläche deutlich größer ist. Zudem ist aufgrund ihrer Wärmedämmeigenschaften der thermische Einfluss auf den Raum gering. Dahingegen zeigt sich, dass der thermische Einfluss der massiven Decke sehr wesentlich ist. Dabei spielen auch eine Rolle, dass die Innenwände als Leichtbaukonstruktionen angesetzt wurden (Ergebnisse Simulation Arbeitsschritt 1)

Wie sich zeigt, ist das Ergebnis des sommerlichen Wärmeschutzes sehr unbefriedigend. Der kritische sommerliche Wärmeschutz schränkt gleichzeitig die Flexibilität in der Nutzung hinsichtlich zunehmender interner Wärmelasten durch Personen oder Geräte ein. Für ein robustes Verhalten ist es daher erforderlich, das passive System zu ergänzen. Hierzu wurden weitergehende Simulationen vorgenommen, wobei das rein passive System über das Heizsystem hinaus jeweils mit variablem außenliegendem Sonnenschutz, mechanischer Grundlüftung, sowie einer Betonkernaktivierung ergänzt wurde.

Einfluss ergänzende Systeme – passiv ++

Im Folgenden werden die Ergebnisse der weitergehenden Simulationen gezeigt. Das rein passive System wird über das Heizsystem hinaus entweder mit variablem außenliegendem Sonnenschutz, mechanischer Grundlüftung, oder Betonkernaktivierung ergänzt und im Weiteren folgend bezeichnet:

- Passiv ++ _ aktiver Heizer und variabler Sonnenschutz
- Passiv ++_aktiver Heizer und mechanische Lüftung
- Passiv ++_aktiver Heizer und Betonkernaktivierung

Ergebnisse Szenario:

Passiv ++_ aktives Heizsystem und variabler Sonnenschutz

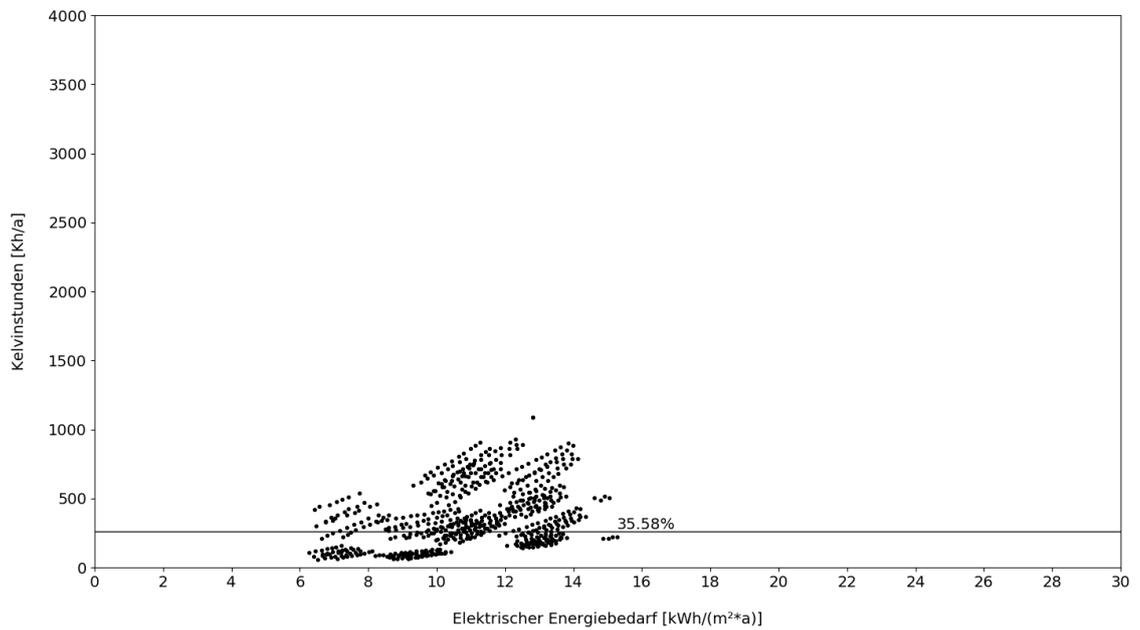


Abbildung 30_ Punktwolke der Ergebnisse passiv++ ergänzendes System Sonnenschutz

Ergebnisse einzelne Parameter mit Sonnenschutz

*Zur Verdeutlichung der Ergebnisse ändert sich gegenüber vorangegangenen Ergebnisdarstellung „passiv +“ die Skalierung. Die schwarz-weißen Darstellungen sind für alle Szenarien zum direkten Vergleich in einer Skalierung dargestellt.

Orientierung

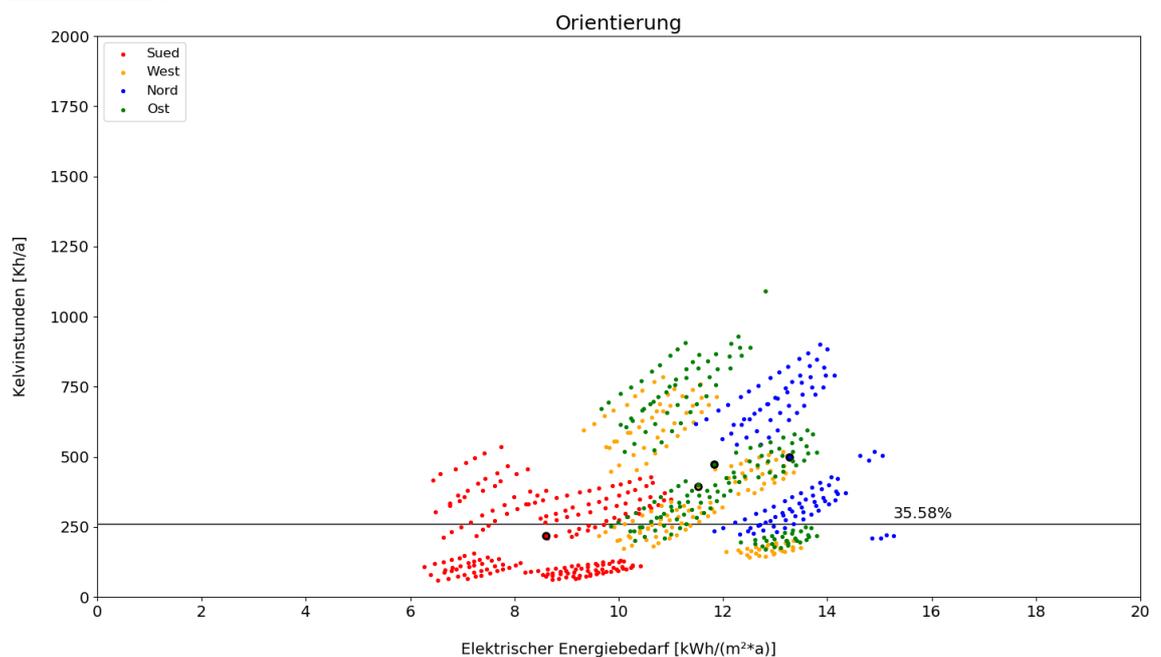


Abbildung 31_ Parameter Orientierung - passiv++ Sonnenschutz

Fensterflächenanteil

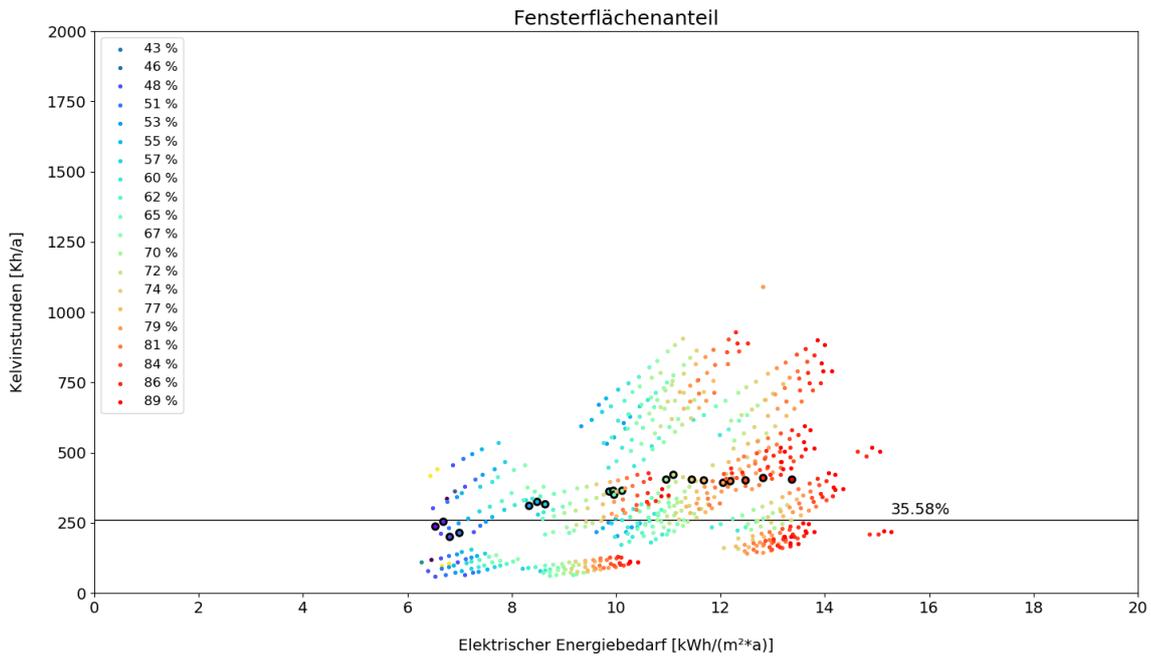


Abbildung 32_Parameter Fensterflächenanteil - passiv++ Sonnenschutz

Glasqualität

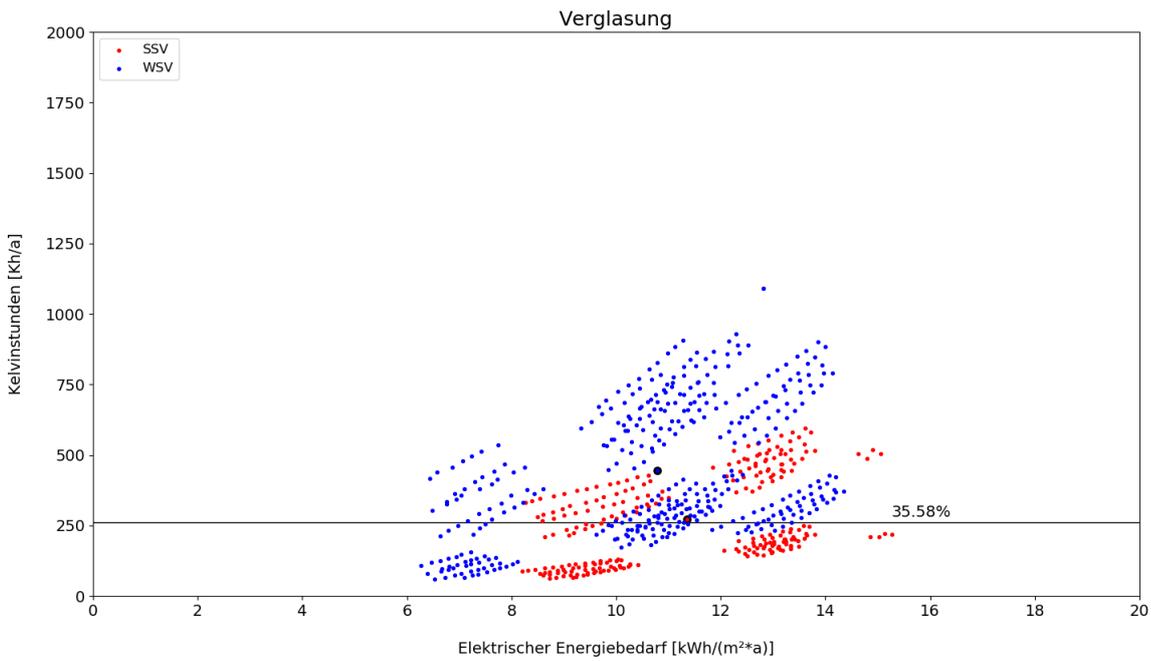


Abbildung 33_Parameter Verglasung - passiv++ Sonnenschutz

Baukonstruktion Außenwand

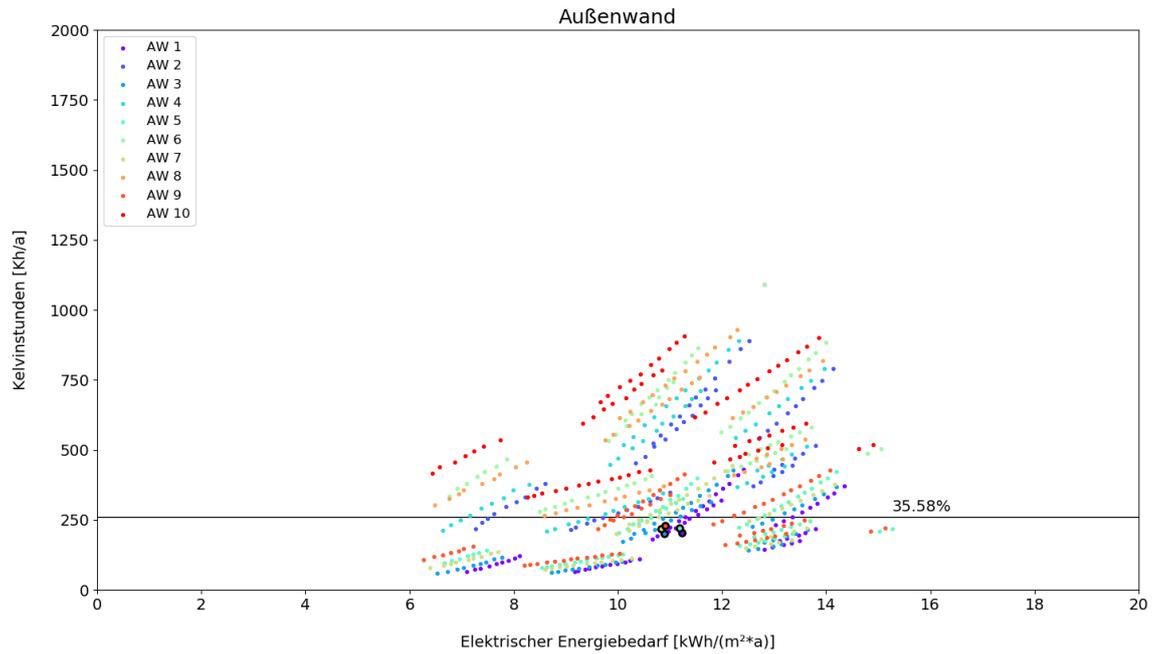


Abbildung 34_Parameter Baukonstruktion AW + thermische Masse Innenausbau - passiv++ Sonnenschutz

Eigenverschattung / Laibung

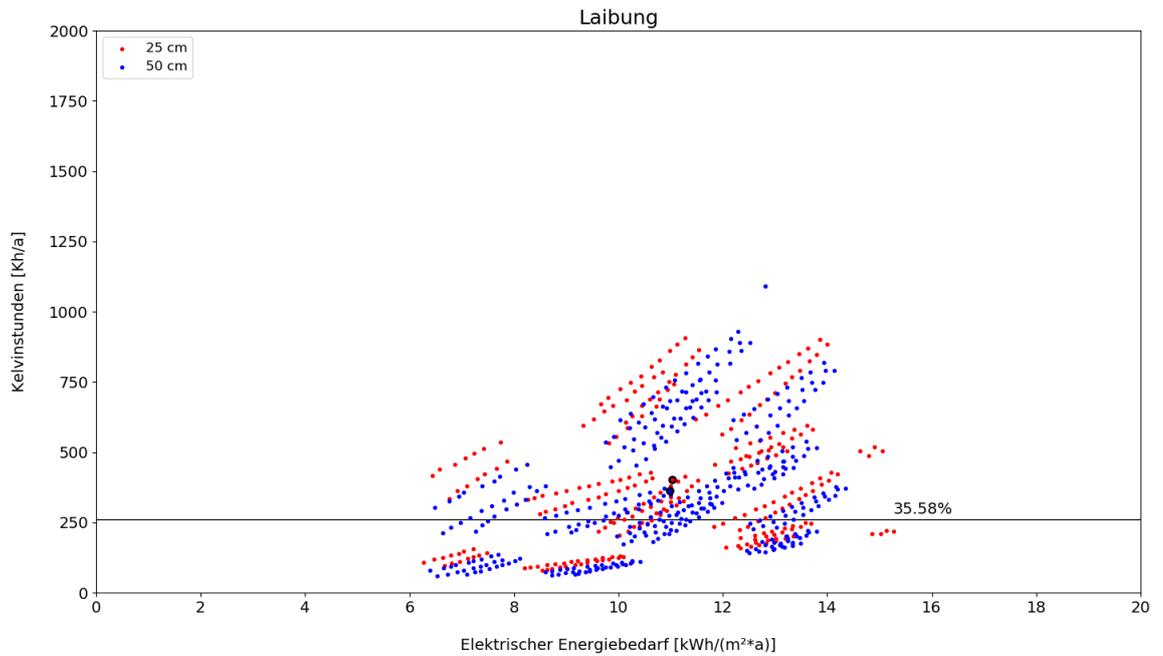


Abbildung 35_Parameter Eigenverschattung / Laibung - passiv++ Sonnenschutz

Thermische Speichermasse Innenraum

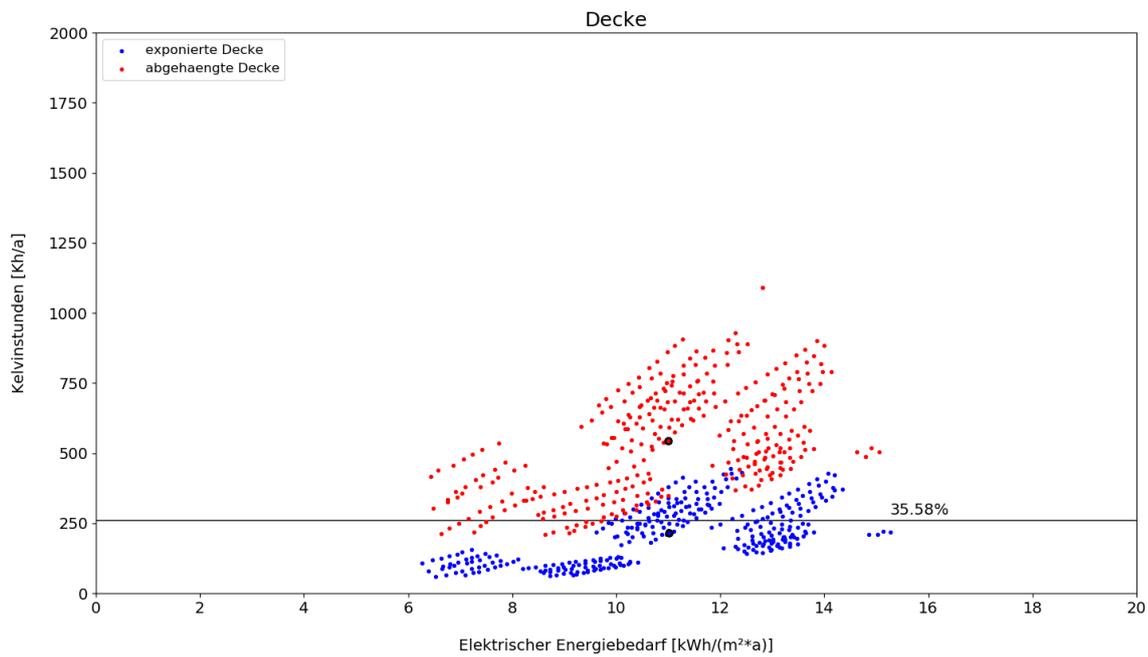


Abbildung 36_Parameter Thermische Speichermassen Decke - passiv++ Sonnenschutz;

Ergebnisse Szenario:

Passiv ++_ aktives Heizsystem und mechanische Lüftung

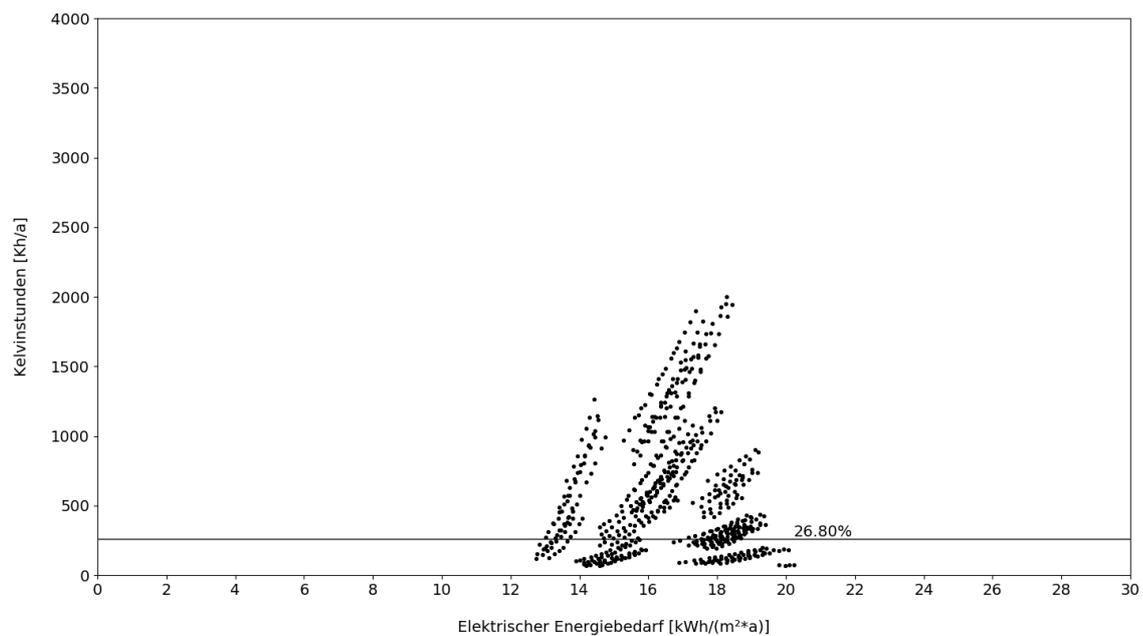


Abbildung 37_Punktwolke der Ergebnisse passiv++ ergänzendes System mechanische Lüftung

Ergebnisse einzelne Parameter mit mechanischer Lüftung

Orientierung

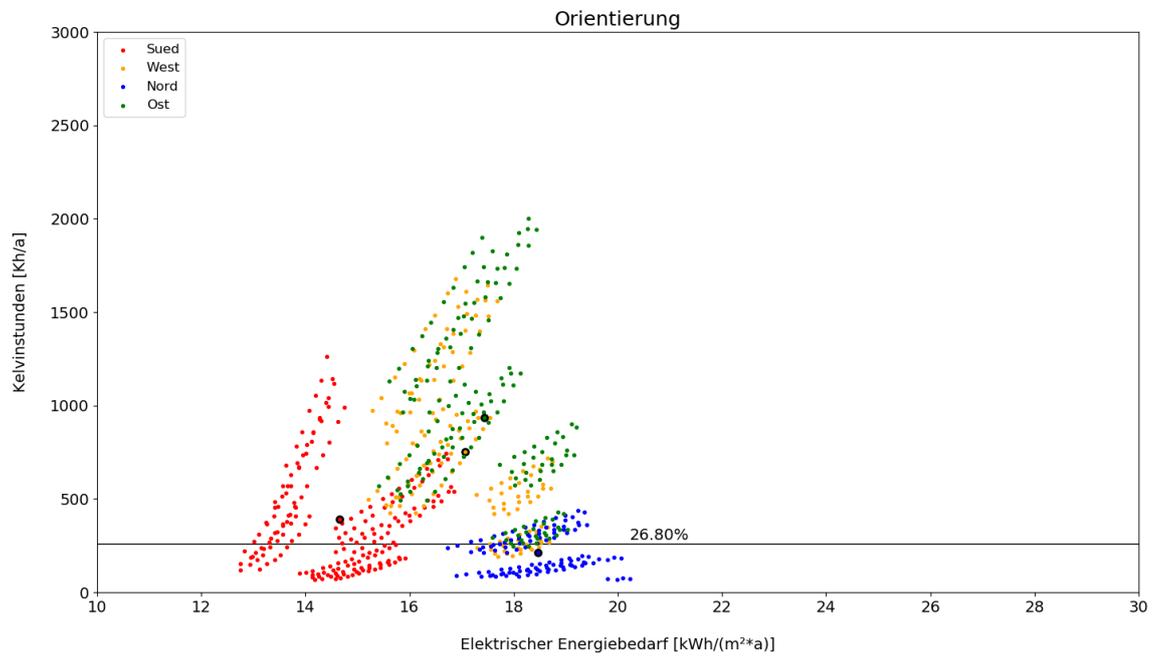


Abbildung 38_Parameter Orientierung - passiv++ mech. Lüftung

Fensterflächenanteil

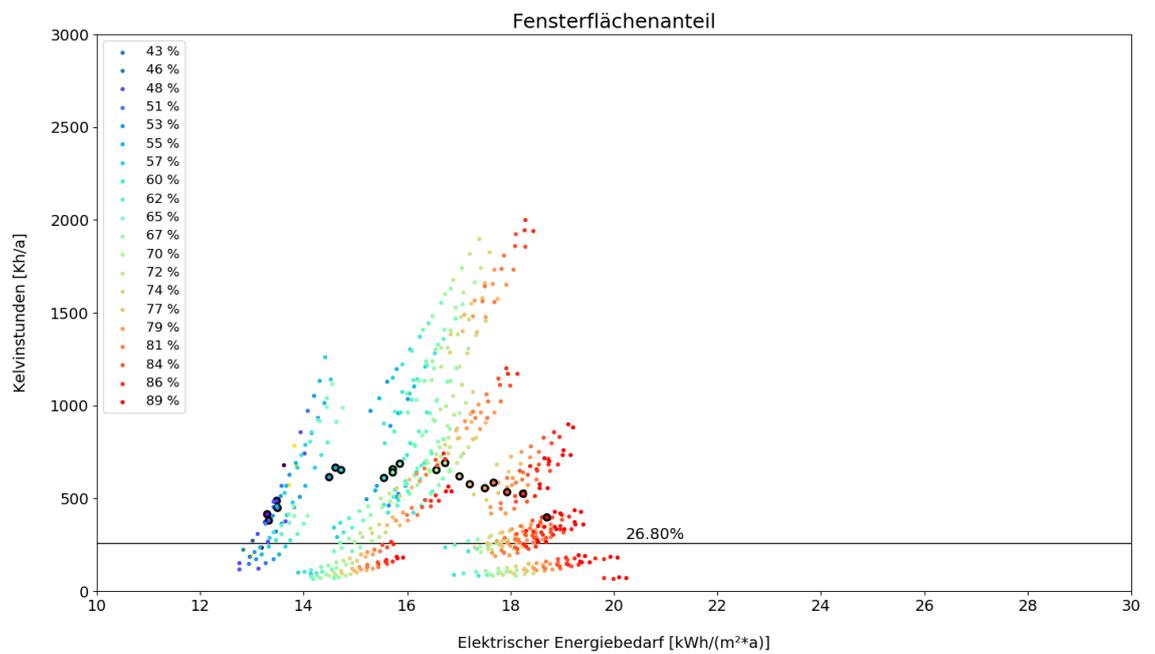


Abbildung 39_Parameter Fensterflächenanteil - passiv++ mech. Lüftung

Glasqualität

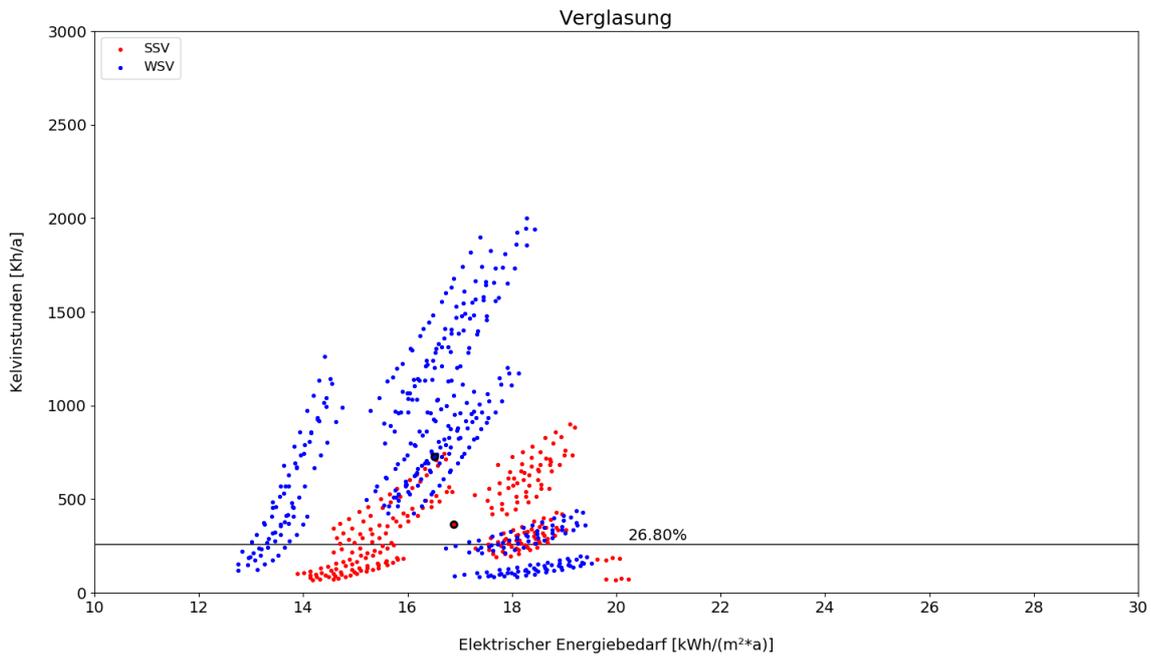


Abbildung 40_Parameter Glasqualität - passiv++ mech. Lüftung

Baukonstruktion Außenwand

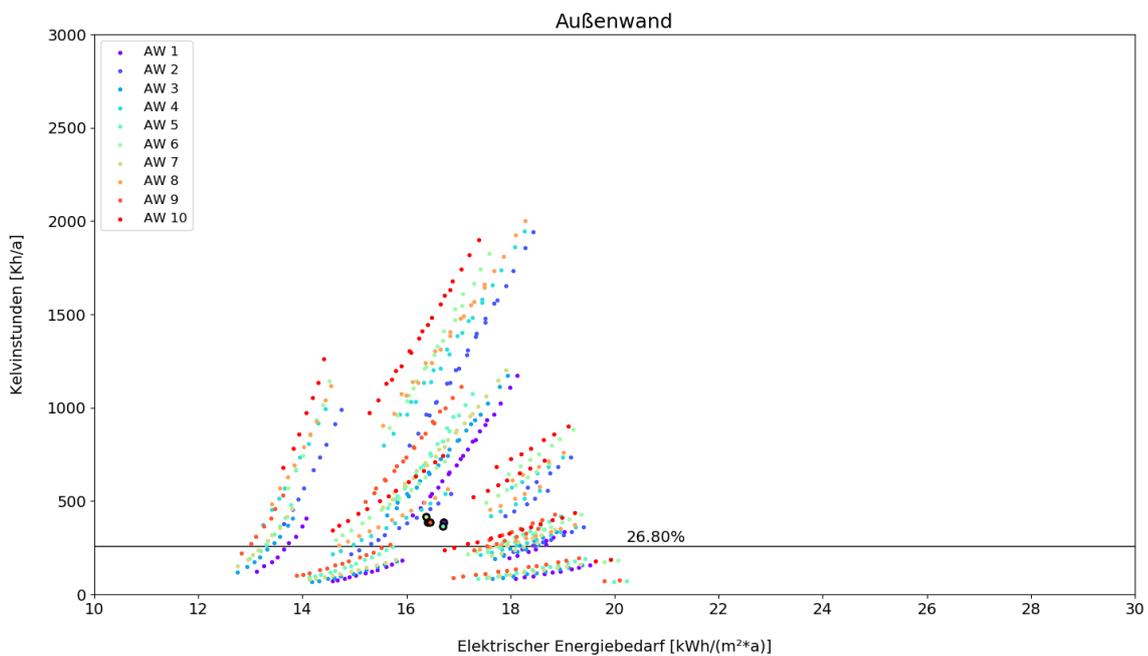


Abbildung 41_Parameter Baukonstruktion AW + thermische Masse Innenausbau - passiv++ mech. Lüftung

Eigenverschattung / Laibung

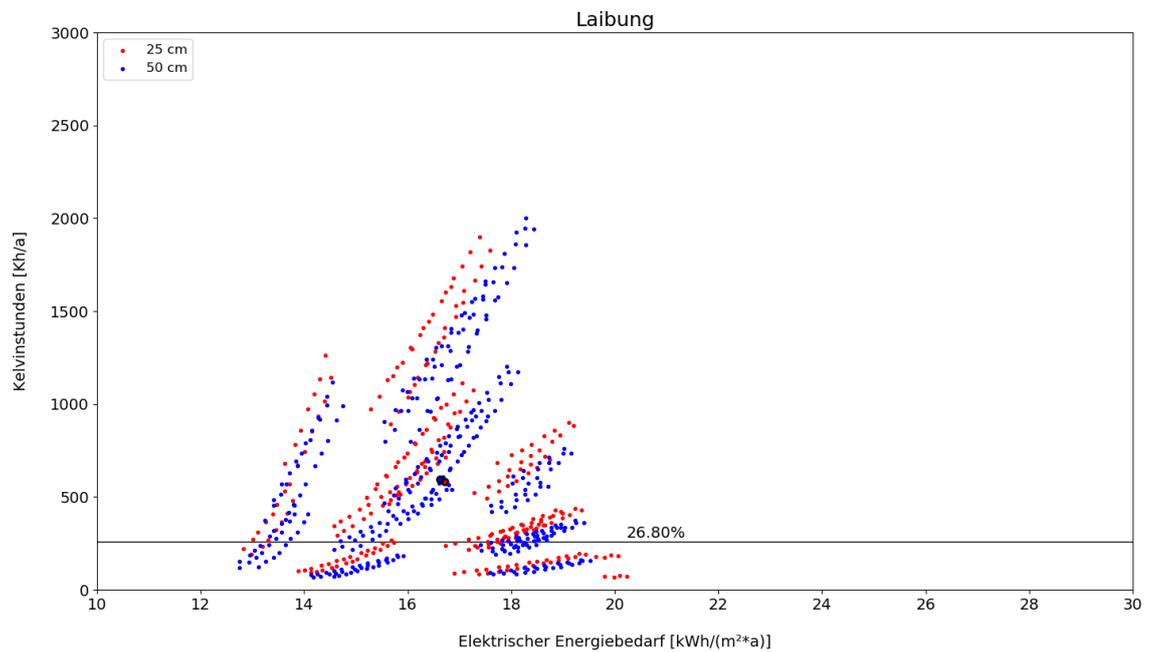


Abbildung 42_Parameter Eigenverschattung - passiv++ mech. Lüftung

Thermische Speichermasse Innenraum

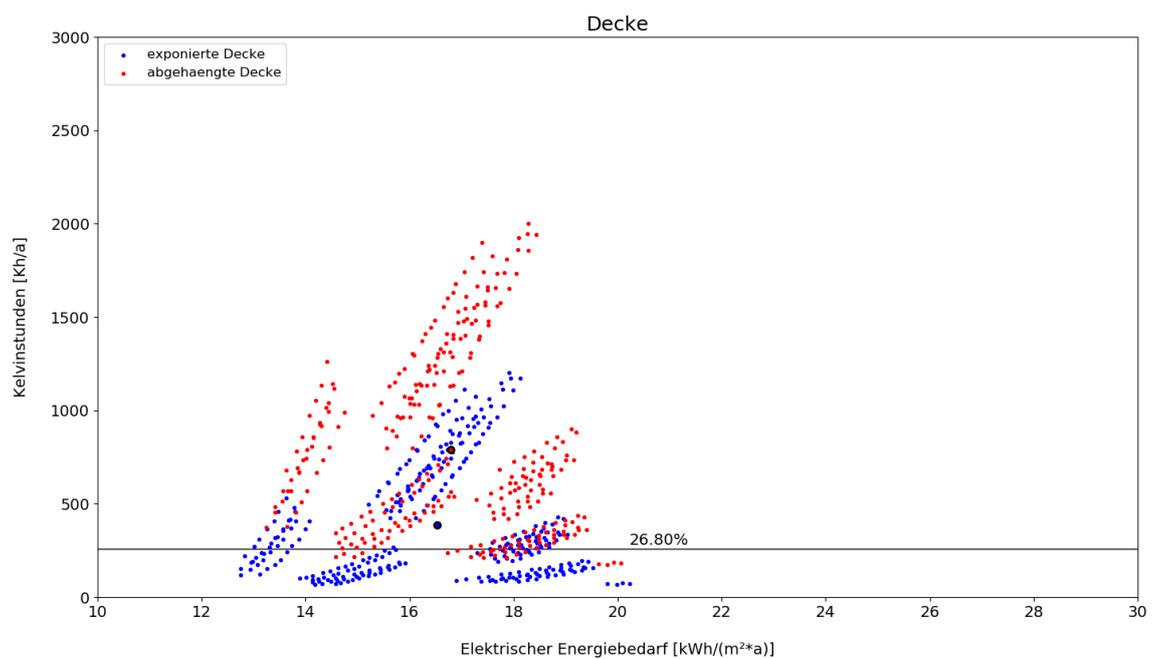


Abbildung 43_Parameter thermische Speichermassen Decke - passiv++ mech. Lüftung

Ergebnisse Szenario:

Passiv ++_ aktives Heizsystem und Betonkernaktivierung

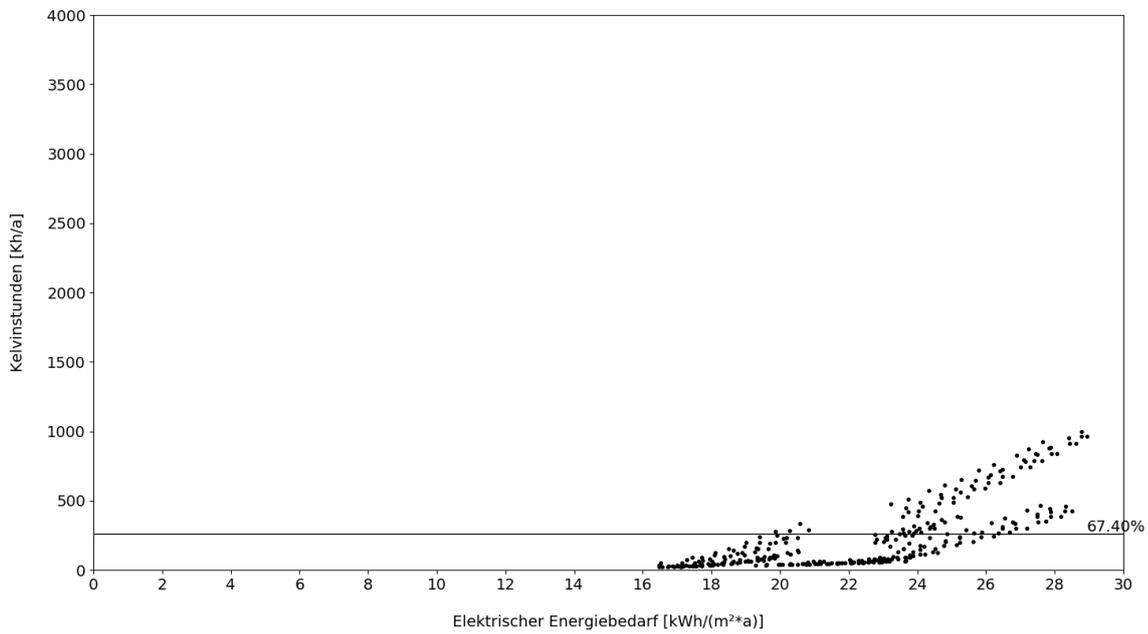


Abbildung 44_ Punktwolke der Ergebnisse passiv++ ergänzendes System Betonkerntemperierung BKT

Ergebnisse einzelne Parameter mit Betonkernaktivierung

Orientierung

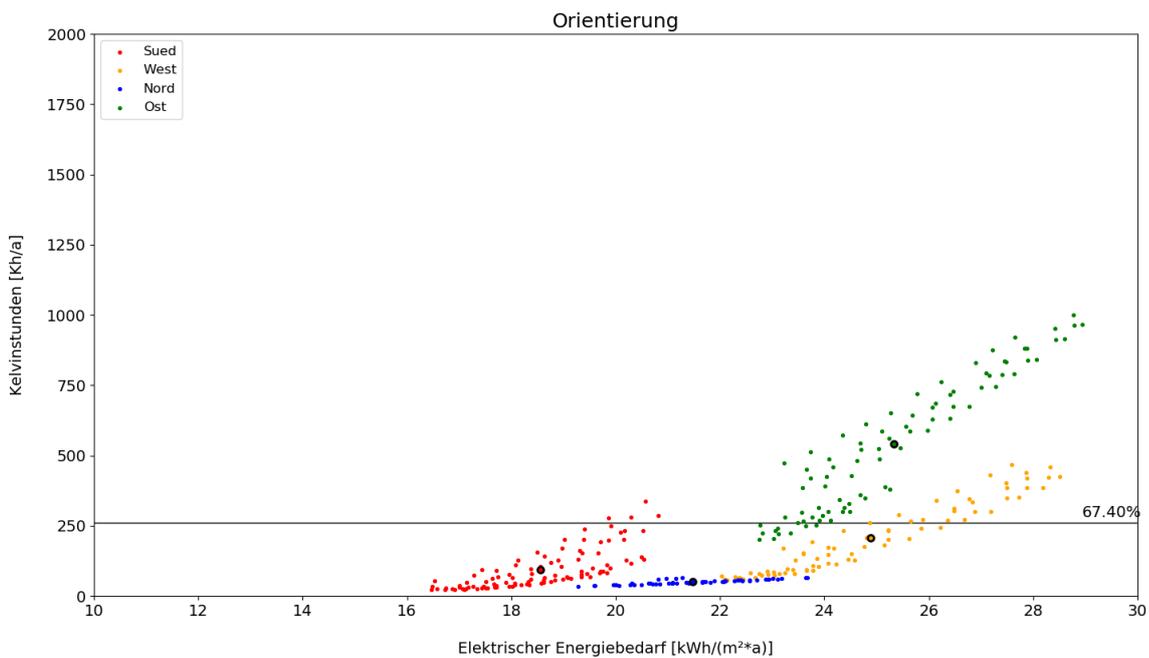


Abbildung 45_Parameter Orientierung - passiv++ BKT

Fensterflächenanteil

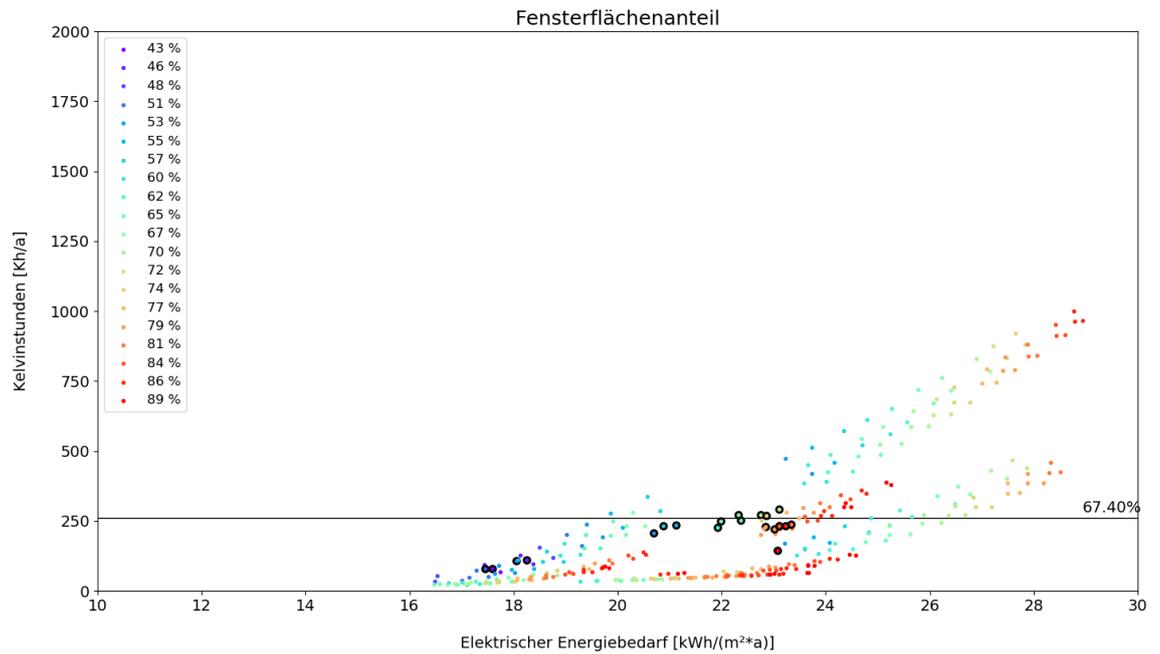


Abbildung 46_Parameter Fensterflächenanteil - passiv++ BKT

Glasqualität

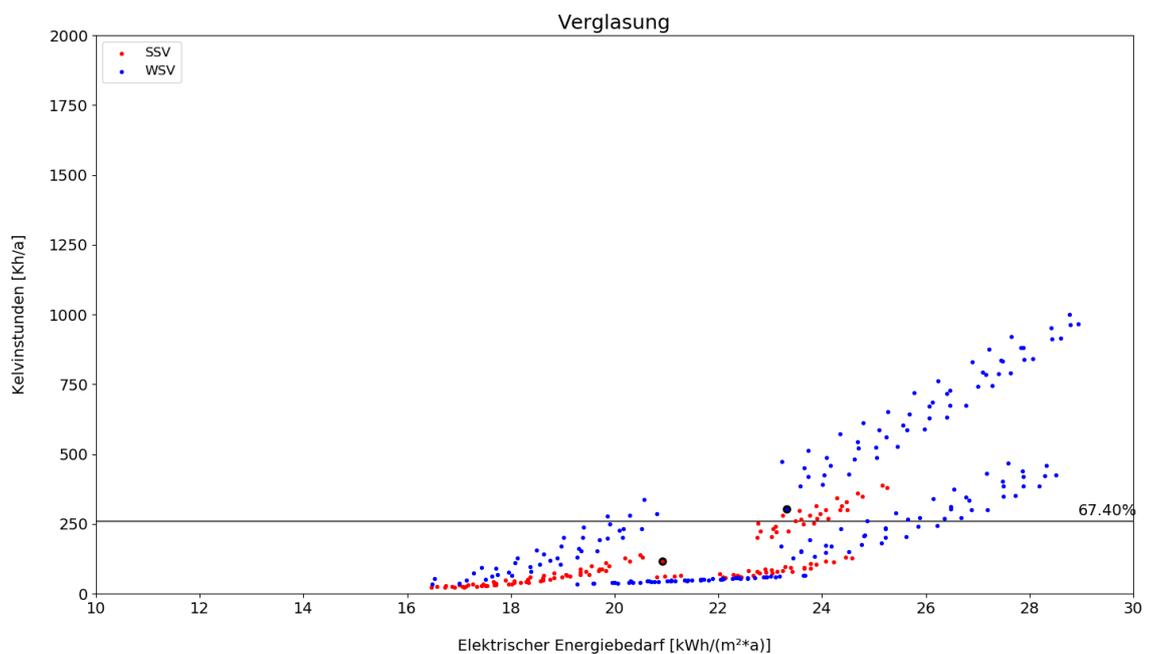


Abbildung 47_Parameter Glasqualität - passiv++ BKT

Baukonstruktion Außenwand

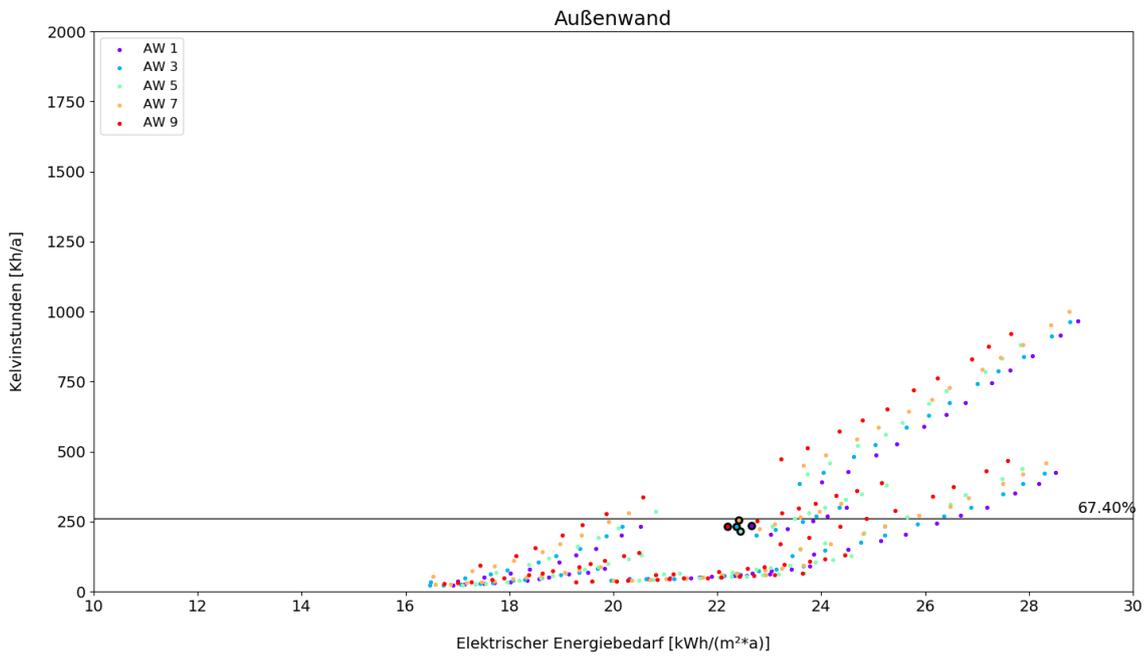


Abbildung 48_Parameter Baukonstruktion AW + thermische Masse Innenausbau - passiv++ BKT

* nur 5 Konstruktionen, da Abhangdecke im Konflikt mit dem System der Bauteilaktivierung steht und deshalb diese Varianten nicht berücksichtigt werden können.

Eigenverschattung / Laibung

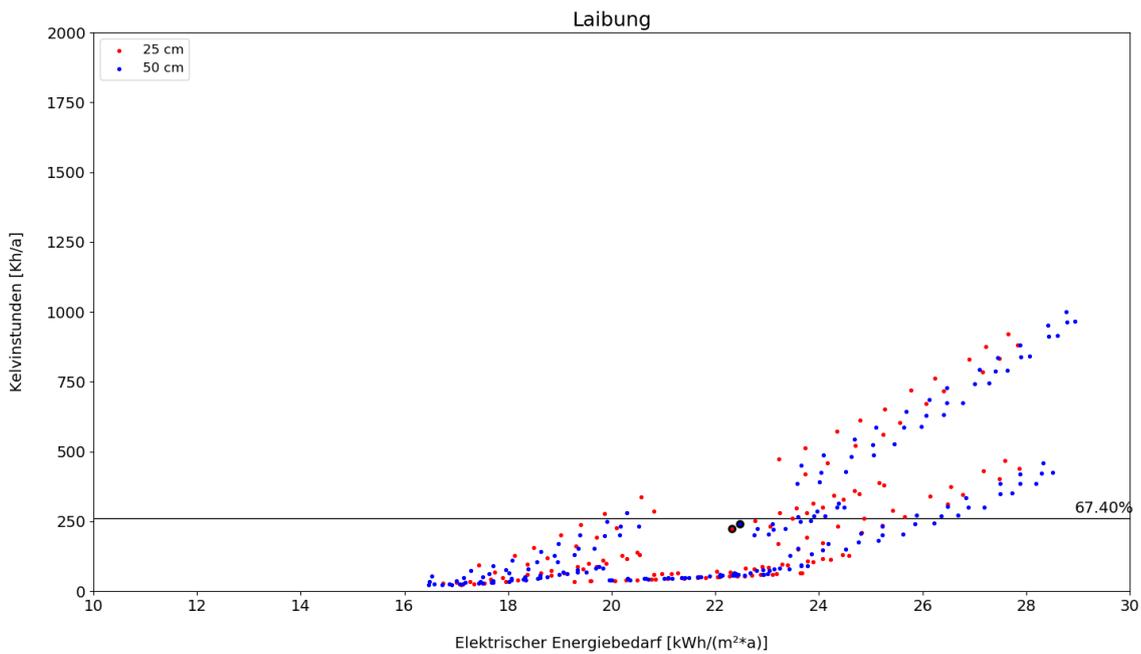


Abbildung 49_Parameter Eigenverschattung / Laibung - passiv++ BKT

Zusammenfassende Beobachtungen zu den Simulationsergebnissen

Als allgemeine Beobachtung ist festzustellen, dass sich bezüglich aller vier Szenarien die Punktwolken optisch in die sechs untersuchten und farblich dargestellten Parameter aufgliedern lässt. Beispielsweise unterteilt der Parameter „Orientierung“ die Punktwolke in vier Hauptgruppen, die wiederum durch andere Parameter wie „Außenwand“ oder „Laibung“ weiter spezifiziert werden. Dies lässt eine erste grobe Einschätzung zu, ob der der Haupteinfluss eines Parameters auf den sommerlichen Wärmeschutz oder den Energiebedarf fällt: Während der Verglasungstyp die Punktwolke hinsichtlich der y-Achse – also des sommerlichen Wärmeschutzes - beeinflusst, übt der Fensterflächenanteil seinen Haupteffekt auf den Energiebedarf aus (x-Achse). Für eine genaue Betrachtung und Gewichtung der Parameter wird im Späteren auf das Thema Robustheit eingegangen.

Folgende Grafen ergeben zusammen eine Vergleichsübersicht der Punktwolken aller vier Szenarien:

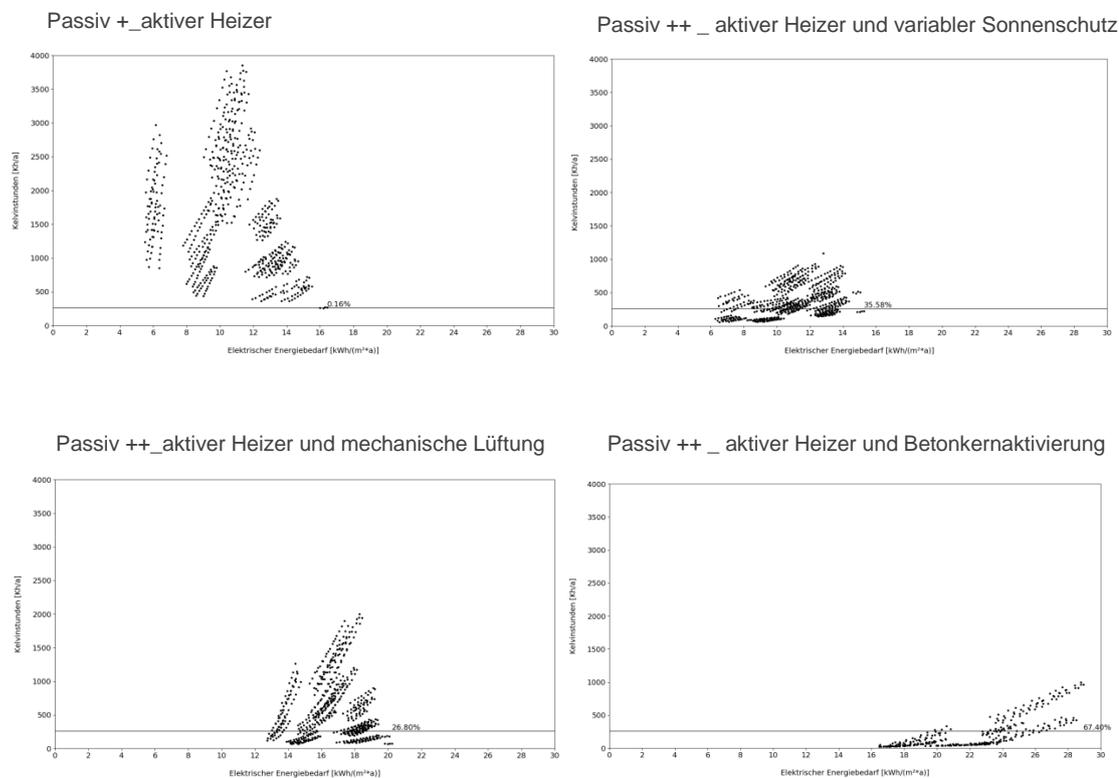


Abbildung 50_Übersicht Punktwolken der unterschiedlichen Randbedingungen passiv + und passiv ++

Es zeigt sich, dass die Addition einer Komponente den sommerlichen Wärmeschutz deutlich verbessert. Gleichzeitig erhöht die Addition mechanischer Komponenten den Energiebedarf.

Hinsichtlich des sommerlichen Wärmeschutzes zeigt sich in allen Varianten mit zusätzlichen Systemen, dass sich die Standardabweichung vom Mittelwert reduziert, bzw. im Umkehrschluss sich die Robustheit erhöht. Dahingegen zeigt der Vergleich zwischen rein passivem Betrieb und Betonkernaktivierung, dass sich die energetische Standardabweichung deutlich erhöht, bzw. die Robustheit bezogen auf den Energiebedarf abnimmt.

Exkurs: Auswertung Belegungsänderung – Profil Seminar

Da die internen Wärmeeinträge im Nutzungsszenario „Seminar“ deutlich höher sind als bei der Bürobelegung, ist davon auszugehen, dass die Variante passiv+ mit lediglich einem Heizer zu einem deutlichen Anstieg der Übertemperaturstunden führt. Daher wurde das Nutzungsszenario „Seminar“ ausschließlich mit den Varianten passiv ++ gerechnet. Das Ergebnis der Simulationen zur Auswirkung einer veränderten Belegungsdichte erfolgt repräsentativ über die Darstellung der Grafik des Parameters Orientierung

Belegung Seminar mit Sonnenschutz

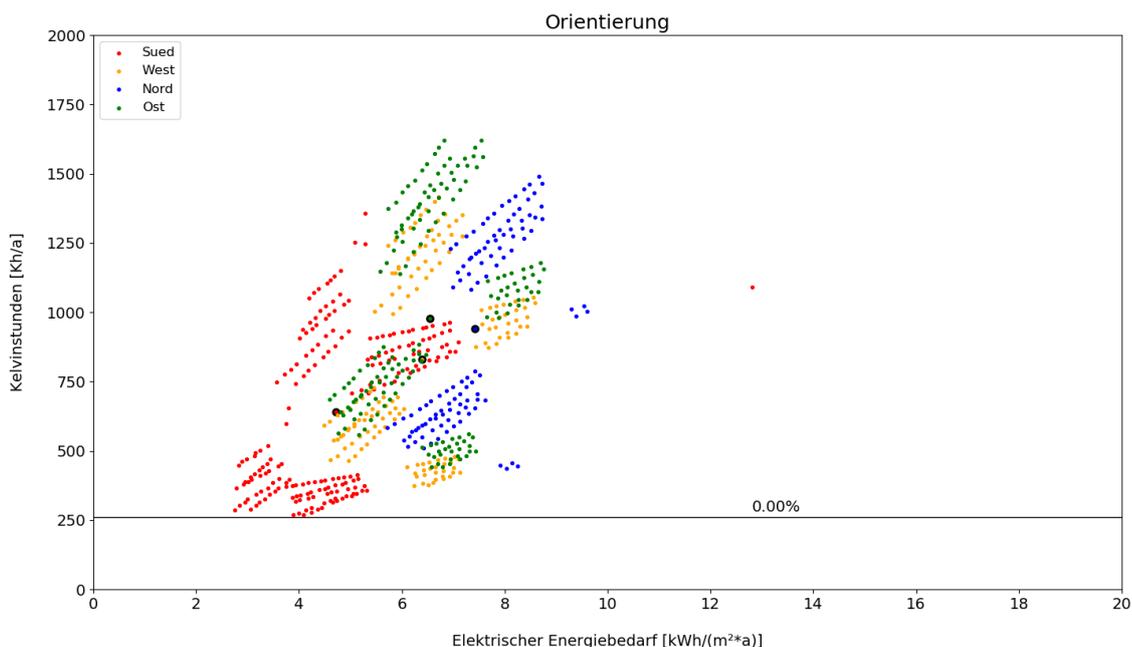


Abbildung 51_Parameter Orientierung - passiv ++ Sonnenschutz_SEMINAR

Belegung Seminar mit mechanischer Lüftung

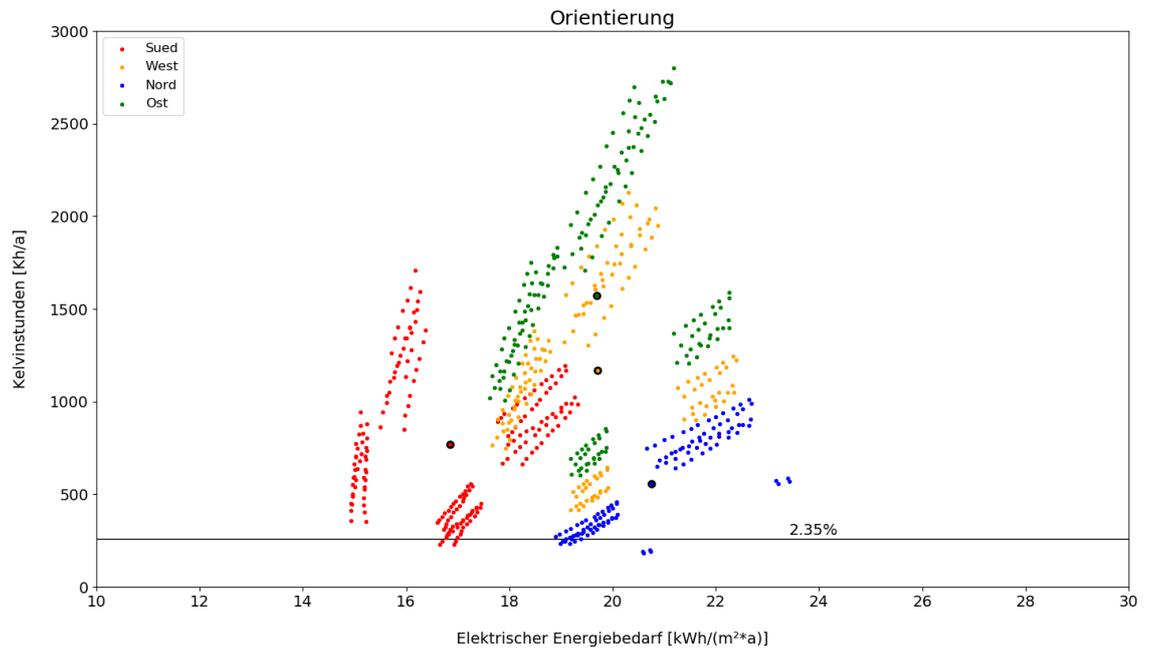


Abbildung 52_Parameter Orientierung - passiv ++ mech. Lüftung_SEMINAR

Belegung Seminar mit BKT

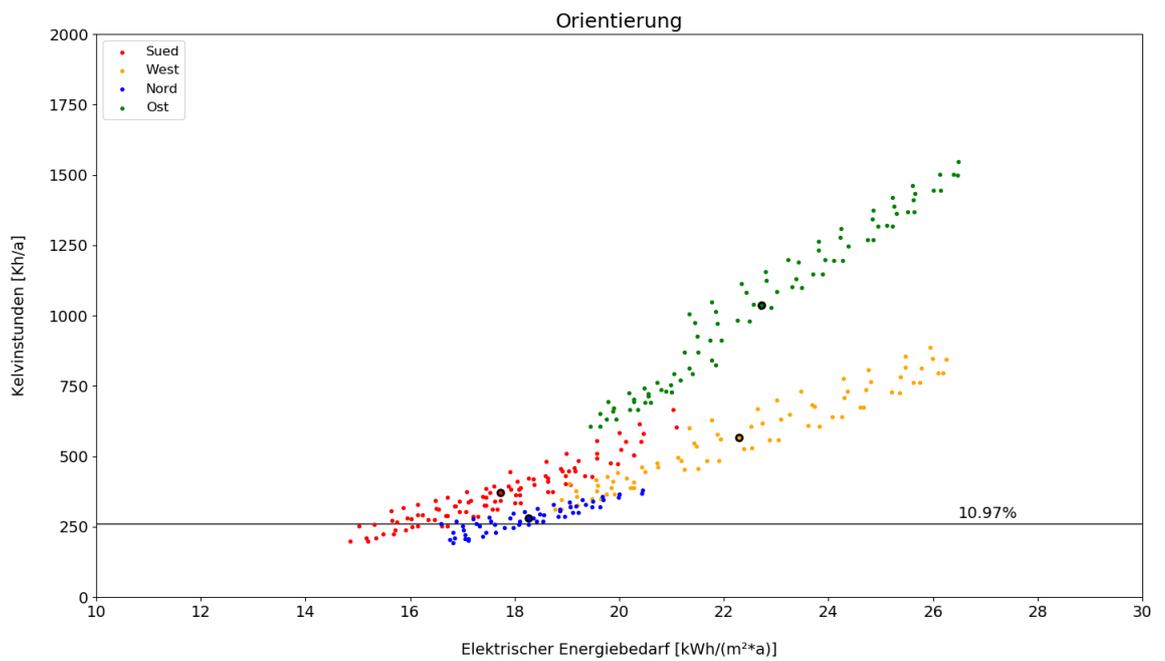


Abbildung 53_Parameter Orientierung - passiv ++ BKT_SEMINAR

Qualitative Auswertung der untersuchten Maßnahmen / Konzepte

Passiv ohne System	Pro	Contra
	<ul style="list-style-type: none"> - keine Investitions- und Wartungskosten für technische Systeme - keine Fehlerquellen durch Fehlbetrieb 	<ul style="list-style-type: none"> - keine Steuerfähigkeit des Gebäudes gegenüber unsicherer Randbedingungen - Mindestanforderungen 20°C kann im Winter nicht in allen Fällen garantiert werden, selbst wenn die Luftqualität vernachlässigt wird (unrealistisch im Betrieb) - Frischluft kommt unkonditioniert und/oder abgebremst in den Raum (Zugluftrisiko) - Witterungs- und Einbruchsschutz für Nachspülung notwendig
Passiv + nur Heizer	<ul style="list-style-type: none"> - Minimale Kosten für Investition, Wartung und Betrieb (VDI 2067) [30] - Minimaler Steuerungsaufwand bei einfacher Systemwahl z.B. Heizkörper 	<ul style="list-style-type: none"> - Luftqualität und Raumklima nutzerabhängig - Frischluft kommt unkonditioniert und/oder abgebremst in den Raum (Zugluftrisiko) - Sommerlicher Wärmeschutz ist nicht bzw. minimal eingehalten - Steuerfähigkeit des Gebäudes bedingt möglich im Winter - Witterungs- und Einbruchsschutz für Nachspülung notwendig
Passiv ++ Sonnenschutz	<ul style="list-style-type: none"> - Steuerfähigkeit / Adaptivität in der Fassade – Reaktionsmöglichkeit auf unterschiedliche Außenklimatische Verhältnisse gegeben - Je nach Ausführung keine Blendenschutz innen erforderlich - Sommerliche Verhältnisse gegenüber passiv+ optimiert - Variabler g-Wert durch Sonnenschutz mehr Tageslicht und solare Gewinne 	<ul style="list-style-type: none"> - Erhöhter Steuerungsaufwand bei automatischer Regelung zur max. effizienten Nutzung - Nutzerabhängig v.a. im Sommer - Kalte Frischluft kommt unkonditioniert und/oder abgebremst in den Raum (Zugluftrisiko) - Witterungs- und Einbruchsschutz für Nachspülung notwendig - Witterungs- und Einbruchsschutz für Nachspülung notwendig
Passiv ++ mech. Lüftung	<ul style="list-style-type: none"> - garantierte Luftqualität - Hoher Komfort Winter - Wärmerückgewinnung möglich 	<ul style="list-style-type: none"> - Ggf. trockene Luft im Winter durch garantierten Luftwechsel wie z.B. 1,5/h - Installationsaufwand Gebäude - Platzbedarf Technikzentralen sowie vertikale und horizontale Verteilung bei zentralen Systemen - Je nach Ausbau Wegfall und Minimierung von wirksamen Speichermassen - Investitions- und Wartungskosten bei dezentralen Systemen durch Anzahl der Anlagen erhöht - Energiebedarf Hilfsenergie - Witterungs- und Einbruchsschutz für Nachspülung notwendig

Passiv ++ BKT	<ul style="list-style-type: none"> - Niedrige Investitions- und Wartungskosten - Einfache Einbindung von Low-Ex Wärmequellen möglich - Gebäude hinsichtlich sommerlichem Wärmeschutz steuerbar - Einbindung Gebäude in Lastmanagement möglich - Hohe Lebensdauer System [VDI 2067] 	<ul style="list-style-type: none"> - Gegenüber Variante „passiv+“ entstehen Investitions- und Wartungskosten - Energiebedarf für Kühlung vorhanden - Keine individuelle oder Einzelraumregelung möglich
--------------------------	---	--

4.4.2 Auswertung Robustheit

Vorgehensweise

Wie bereits erwähnt, wurde aus der Vielzahl der untersuchten Parametern Mittelwerte für den sommerlichen Wärmeschutz und den Energiebedarf für den Gebäudebetrieb ermittelt. Aus diesen Mittelwerten lässt sich die Standardabweichung ableiten. Eine große Standardabweichung eines bestimmten Parameters zeigt ein sensibles Gebäudeverhalten, bzw. im Umkehrschluss eine geringe Robustheit. Über die Standardabweichung lässt sich damit auf ein robustes Verhalten schließen.

Am Beispiel der Verglasung (Abb.26) lässt sich das Vorgehen zur Evaluierung von Robustheit veranschaulichen. Der Abstand der beiden Werte auf der x-Achse zueinander ist gering, damit ist auch der Einfluss der beiden unterschiedlichen Gläser für den Energiebedarf gering. Auf der y-Achse jedoch zeigt sich eine größere Abweichung zwischen den Mittelwerten – damit ist der Einfluss auf das sommerliche Verhalten groß. Setzt man diese Werte $1/x$ und $1/y$ in Relation ergibt sich der Wert der Robustheit dieses Parameters hinsichtlich der Kriterien sommerlicher Wärmeschutz und Betriebsenergie.

Aus dieser Methodik heraus wurden die Parameter evaluiert und nach Einfluss sortiert. Im Folgenden zeigen je Szenario zwei Balkendiagramme getrennt für sommerlicher Wärmeschutz und Betriebsenergie den Parametereinfluss:

Ranking passiven Parameter – **passiv+**

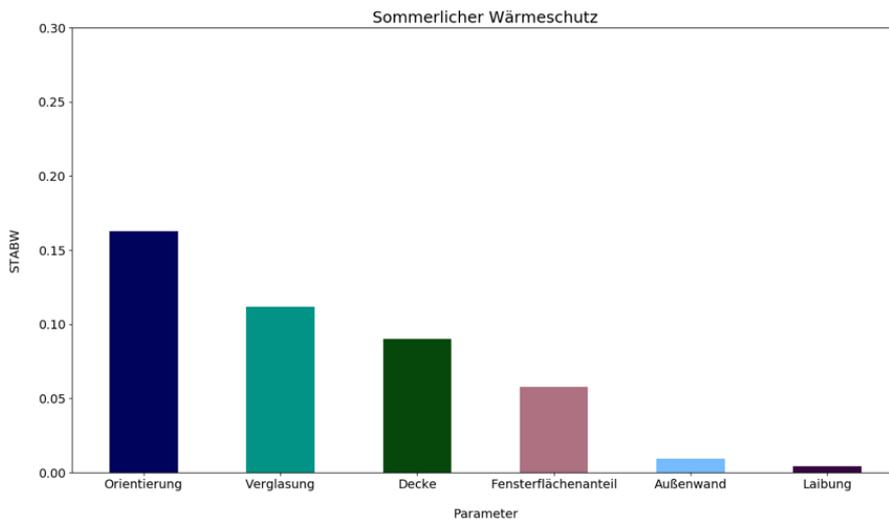


Abbildung 54_Ranking der einzelnen passiven Parameter sommerliches Verhalten
Variante **passiv+**

Wie zu erwarten zeigt die Grafik, dass die Parameter Orientierung und Verglasung den größten Einfluss auf dem sommerlicheren Wärmeschutz haben. Entgegen der Erwartungen, folgt darauf der Einfluss der thermischen Masse auf die Geschosdecke. Der Einfluss des Fensterflächenanteils folgt erst dann an vierter Position des Rankings.

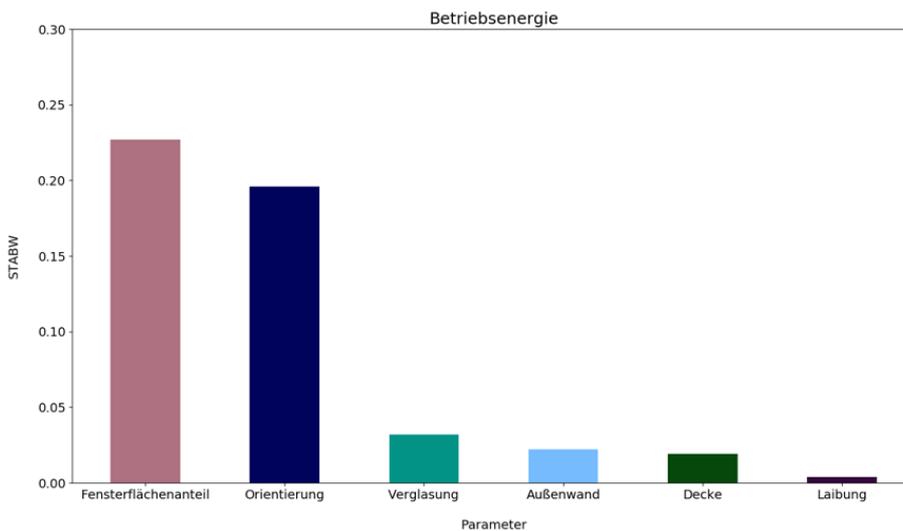


Abbildung 55_Ranking der einzelnen passiven Parameter Betriebsenergie

Variante **passiv+** * Betriebsenergie bezieht sich auf Heizsystem

Hinsichtlich des Energiebedarfs für den Gebäudebetrieb haben im Wesentlichen der Fensterflächenanteil und die Orientierung den größten Einfluss. Dem gegenüber sind die anderen Parameter nahezu vernachlässigbar.

Ranking Parameter – passiv++ mit Sonnenschutzsystem

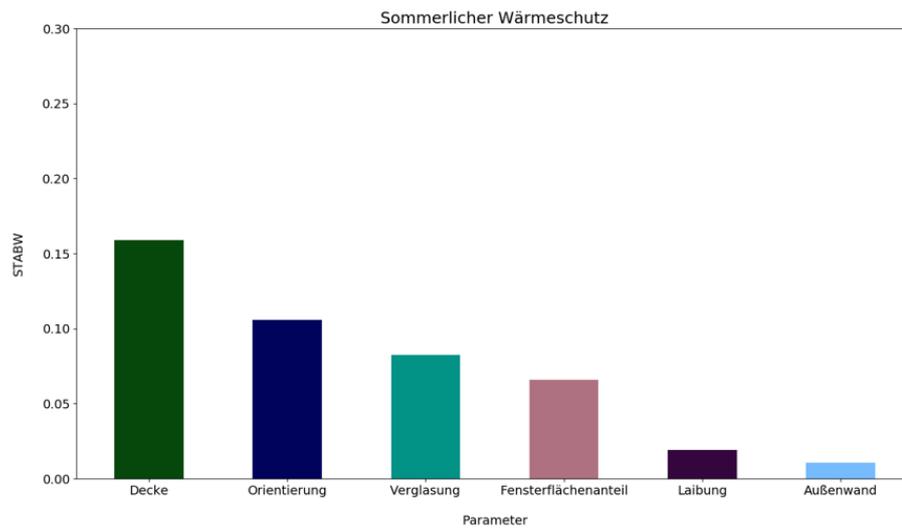


Abbildung 56_Ranking der einzelnen passiven Parameter sommerliches Verhalten
Variante passiv++ mit Sonnenschutzsystem

Ein Fassadensystem mit außenliegendem variablem Sonnenschutz reduziert den Einfluss der Orientierung, der Verglasungsart, und des Fensterflächenanteils, sodass der Einfluss der thermischen Masse am höchsten ist.

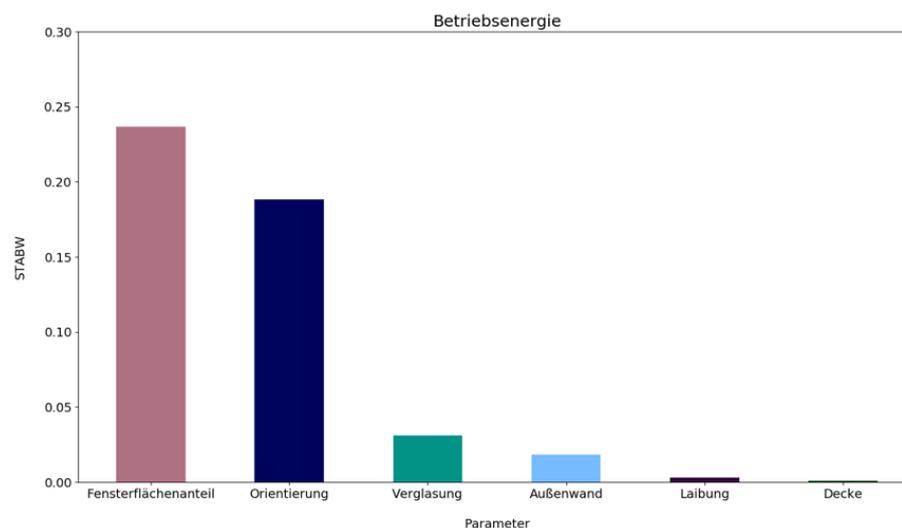


Abbildung 57_Ranking der einzelnen passiven Parameter Betriebsenergie
Variante passiv++ mit Sonnenschutz * Betriebsenergie bezieht sich auf Heizsystem

Ranking Parameter – passiv++ mit mechanischer Lüftung

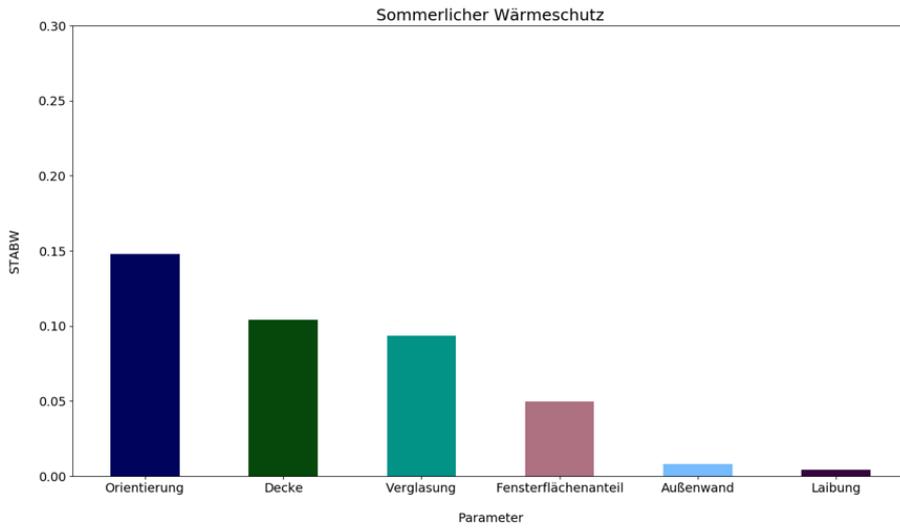


Abbildung 58_ Ranking der einzelnen passiven Parameter sommerliches Verhalten

Variante passiv++ mit mechanischer Lüftung

Wie zu erwarten, wird die Orientierung wieder relevanter, wenn auf einen außenliegenden Sonnenschutz verzichtet wird.

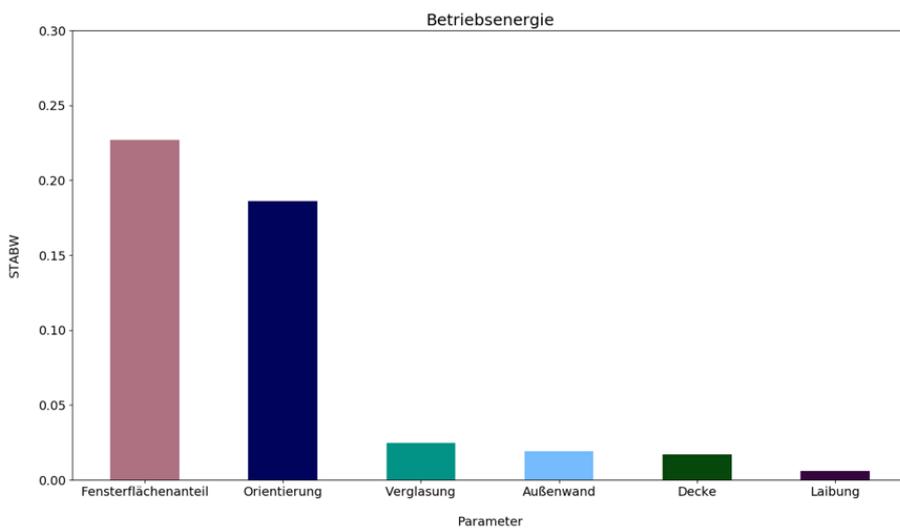


Abbildung 59_ Ranking der einzelnen passiven Parameter Betriebsenergie

Variante passiv++ mit mech.Lüftung * Betriebsenergie bezieht sich auf Heizsystem + Lüftung

Ranking Parameter – passiv++ mit Betonkernaktivierung

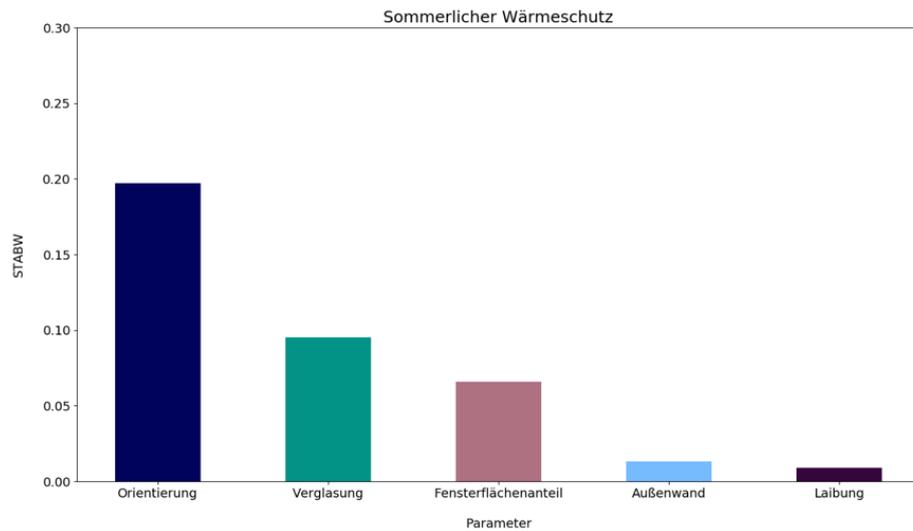


Abbildung 60_ Ranking der einzelnen passiven Parameter sommerliches Verhalten
Variante passiv++ mit BKT

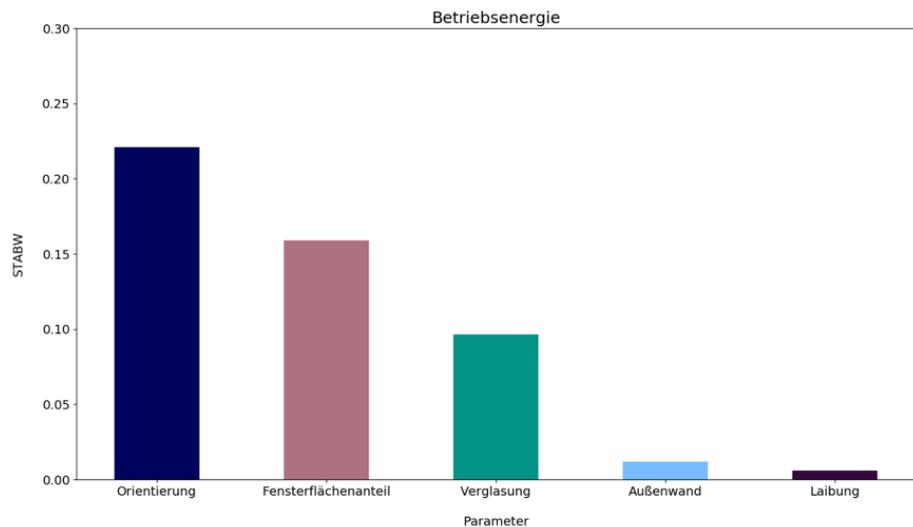


Abbildung 61_ Ranking der einzelnen passiven Parameter Betriebsenergie
Variante passiv++ mit BKT * Betriebsenergie bezieht sich auf Heizsystem + BKT

Eine Betrachtung der Standardabweichung zeigt die Sensibilität bzw. die Umkehrung der Robustheit einzelner Parameter auf den sommerlichen Wärmeschutz bzw. den Energiebedarf für den Gebäudebetrieb. Interessant ist, dass sich das Ranking einzelner Parameter in Abhängigkeit der eingesetzten Systeme verändert.

4.5 Auswertung LCA – Varianten Baustoffe Außenkonstruktion

4.5.1 Vorgehensweise

Ausgewertet werden die Umwelteinflüsse der in den Simulationen betrachteten Außenwandkonstruktionen (s. Seite 21 ff.). Dabei sind einerseits der CO₂ Aufwand für die Herstellung ausgewertet worden, als auch der Einfluss am Ende des Lebenszyklus – angesetzt auf 50 Jahre. Basis der Berechnungen sind die Angaben der „Öko-Baudat“ [31].

4.5.2 Ergebnisdarstellung

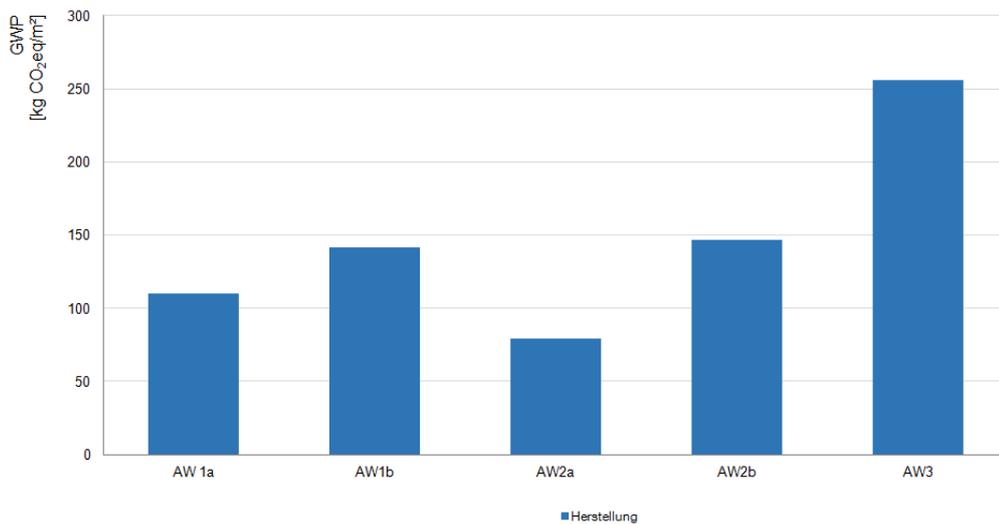


Abbildung 62_Außenwandkonstruktionen GWP je m² – Herstellung

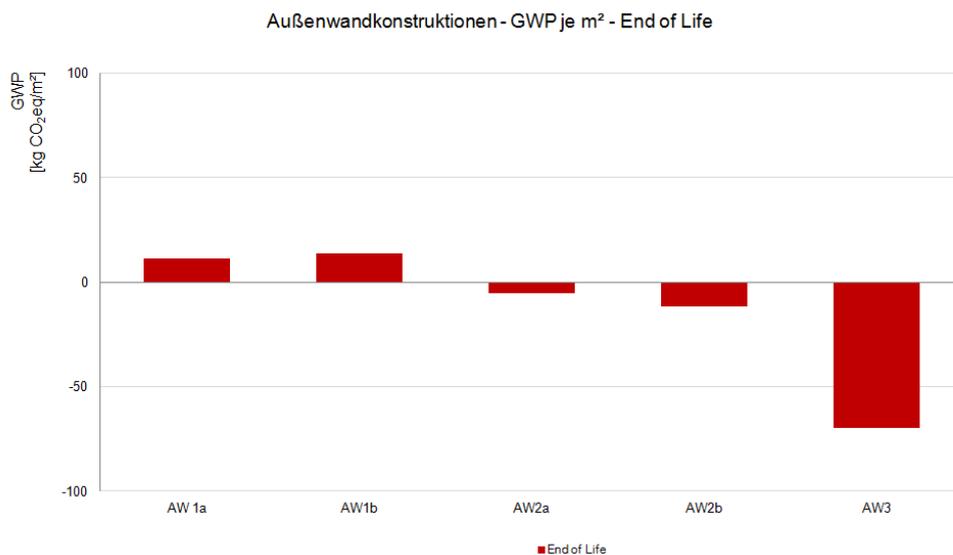


Abbildung 63_ Außenwandkonstruktionen GWP je m² – End of Life

Die Ergebnisse zeigen, dass der Mehraufwand -ausgedrückt in CO₂ äquivalent - in der Herstellung der wärmetechnisch optimierten Außenwandkonstruktionen erhöht ist. Dies ist gegenüber des Optimierungspotentiales des U-Wertes mit zunehmender Baustoffdicke kritisch zu betrachten [32]. Ebenso zeigt sich, dass die leichte Konstruktion der AW 3 einen hohen Umwelteinfluss in der Herstellung aufweist, jedoch nach 50 Jahren in der „End of live“ Auswertung die besten Ergebnisse erzielt. Die Ursache hierfür liegt an der Annahme, dass große Anteile der verwendeten Materialien wiederverwendet werden können und nicht am Ende ihres Lebenszyklus sind. Ob dies in der Praxis umsetzbar ist und angewendet wird bleibt zu hinterfragen. Die Ziegel weisen in der Herstellung wie in der „End of Life“ Auswertung gute Ergebnisse aus. Neben des geringsten GWP Potentials mit ENEV konformen U-Werten, weisen sie auch ein hohes Potential an Wiederverwertung auf, zudem ist die Lebensdauer des Materials grundsätzlich als hoch einzustufen. Der durchschnittlich moderate Energiebedarf in den Simulationsergebnissen und die o.g. steigenden Einflüsse in Bezug auf die graue Energie zeigt auf, dass eine Optimierung der geltenden Referenzwerte der ENEV vor dem Hintergrund der Gesamtbeurteilung der Ressourcen zu hinterfragen ist. Vielmehr ist vor dem Hintergrund der Reduzierung aktiver technischer Systeme die Optimierung hin zu speicherfähigen Materialien an den Fassaden zu empfehlen.

5 Zusammenfassung und Fazit

Begriffe wie „Low-Tech“ oder auch „Einfach Bauen“ haben bislang keinerlei wissenschaftlich fundierte Definition. Dies führt zu einer subjektiven Wahrnehmung des Begriffs. Auch rein passiv betriebene Gebäude nutzten meist moderne Regelungstechnik bzw. moderne „High-Tech“ Materialien. Eine Reduktion auf die Gewerke Heizung, Lüftung und Kühlung ist ebenfalls nicht zielführend, da allzu oft die MSR-Technik die Komplexität und Kosten erhöht, fehlerbehaftet ist, und die Nutzerakzeptanz mindert. Die Untersuchungen zeigen, dass die Robustheit von Gebäuden ein zentraler Parameter ist. Eine robuste Optimierung, unter Berücksichtigung unsicherer Randbedingungen, ist in vielen Industriezweigen Stand der Technik, hat jedoch im Bauwesen noch keinen Einzug gefunden. Gleichzeitig bestehen gerade im Gebäudesektor eine Vielzahl unsicherer Randbedingungen. Unsicherheiten ergeben sich beispielsweise aus dem Nutzerverhalten, nicht optimal betriebenen Systemen, oder auch dem Klimawandel, der zwangsläufig - vor allem in Städten - zu einer Veränderung der klimatischen Randbedingungen führen wird.

Am Beispiel der vorliegenden Ergebnisse zeigt sich, dass der Verzicht auf sämtliche mechanischen Komponenten in der Haustechnik und der Fassadentechnik den Innenraumkomfort gegenüber der anerkannten Regeln der Technik einschränkt bzw. die anerkannten Regeln der Technik nicht eingehalten werden können. Der Verzicht auf sämtliche technische Einrichtungen führt dazu, dass im Winter die Luftqualität und der thermische Komfort nicht unabhängig voneinander sichergestellt werden können. Die letzte Entscheidung darüber obliegt natürlich dem Bauherrn, für die Einhaltung der geltenden Normen ist dementsprechend zumindest ein Heizsystem erforderlich. Ebenso ist die Robustheit hinsichtlich unsicherer Randbedingungen wie Klimaänderung oder Belegungsdichten definierbar und bei radikalem Verzicht auf technische Systeme limitiert. Durch den Verzicht auf technische Systeme zur Raumkonditionierung und Steuerungstechnik in der Hüllkonstruktion für Sonnenschutz und natürliche Lüftungsstrategien wächst der Einfluss der Fassadengestaltung und des Nutzers auf das herrschende Raumklima.

In der singulären Betrachtung der Systeme zeigt sich, dass durch die Implementierung bereits einer Komponente deutliche Optimierungen v.a. für die Behaglichkeit im Sommer zu erreichen sind. Diesbezüglich wurden unabhängig voneinander ein außenliegender Sonnenschutz, eine maschinelle Grundlüftung und eine Bauteilaktivierung untersucht.

Die Systeme wurden in der Simulation so ausgelegt, dass sie im Betrieb mit einem Minimum an Steuerungstechnik betrieben werden. Dies ist für die Robustheit der Systeme entscheidend. Wird nach VDI 2067 die Lebensdauer der o.g. Komponenten der Steuerungstechnik mit durchschnittlich 10 Jahren bewertet, liegen diese Angaben für Flächen-temperierungen bei 50 Jahren bzw. bei bis zu 20 Jahren in der Lüftungstechnik.

Hinsichtlich der Ergebnisse für die einzelnen Fassadenkomponenten wird deutlich, dass der Einfluss der Orientierung, der Fensterflächenanteil sowie die Eigenschaften im Glas für die sommerlichen Verhältnisse ausschlaggebend sind. Eine Auswertung der grauen Energie zeigt, dass sich die wärmetechnische Ertüchtigung der Fassadenkonstruktionen - über die Mindestanforderungen der EnEV hinaus - im Verhältnis zur Reduzierung des Wärmebedarfs selbst bei extrem Klimata nicht darstellen lässt (bezogen auf die untersuchten monolithischen Aufbauten). Der Einfluss auf die CO₂ Bilanz des Gebäudes ist hingegen sehr hoch. Hier ist über die Reduzierung in der Planung von Bürogebäuden nachzudenken bzw. der geltende Standard völlig ausreichend.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass bei heutigem Entwicklungsstand der Hüllkonstruktionen das winterliche Raumklima eine untergeordnete Rolle einnimmt. Der sommerliche Wärmeschutz jedoch sowie der visuelle Komfort durch die Gestaltung der Gebäudehülle steuerbar ist. Trotzdem erreichen lediglich Räume mit Nordorientierung - mit ausschließlich passiven Systemen bei einer Betrachtung mit Extremklimata - die geforderten Ziele der geltenden Anforderungen. Diese Betrachtungsgrenze stellt aufgrund des Klimawandels für ein robustes Gebäude eine notwendige Randbedingung dar. Einen erheblichen Einfluss neben Fensterflächenanteil und Wahl der Verglasung haben v.a. Speichermassen im Gebäude.

Es zeigt sich auch, dass bei einem rein passiven Betrieb der Nutzer in der Diskussion um Low-Tech Gebäude eine entscheidende Rolle einnimmt. Sein Einfluss auf das Raumklima ist bei Verzicht auf technische Komponenten entscheidend. Neben diesem Faktor Mensch, der wiederum eine unsichere Randbedingung darstellt, zeigt sich auch, dass die Robustheit des Raumklimas bereits durch die Implementierung von nur einer technischen Komponente entscheidend optimiert werden kann. Bei der Wahl des Systems ergeben sich immer Vor- und Nachteile und es gibt kein Richtig oder Falsch. Die resultierende Robustheit des Gebäudes hängt wiederum von den spezifischen Anforder-

rungen ab (z.B. Flexibilität hinsichtlich Umnutzung, Belegungsdichte, etc.). Es wird deutlich, dass eine passive Optimierung der Fassade die Robustheit der Gebäude stärken - ein rein passiver Betrieb die geltenden Anforderungen jedoch nicht erfüllt und nicht zwangsläufig zu einer robusten Optimierung führt. Daher wird Low-Tech im Bereich von Bürogebäuden nicht ohne jegliche technische Systeme zu definieren sein. Die Ergebnisse zeigen mit den eingesetzten Systemen, dass bereits der Einsatz einfacher Technologien hohes Optimierungspotential aufweisen.

Der Zweifel am Glauben an „High-Tech“ ist selbstverständlich berechtigt. Die Herausforderung besteht jedoch darin, dass durch das Zusammenspiel passiver und aktiver Systeme - auch bei unsicheren Randbedingungen - ein robustes Verhalten hinsichtlich Aufenthaltsqualität und Energiebedarf erzielt wird. In Zukunft wird es im ganzheitlichen Planungsprozess darum gehen, Fassaden zu generieren, die allein durch die Funktion als Schutzhülle gute raumklimatische Bedingungen schaffen und lediglich ein komponentenarmes Technikkonzept das Gebäude steuerfähig macht gegenüber äußerer und innerer Veränderungen.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1_Darstellung der Indexreihen „KG 300 – Bauwerk – Baukonstruktionen“ und „KG 400 – Bauwerk - Technische Anlagen“ im Vergleich zum VPI [4]	3
Abbildungen 2 a+b_Gebäude 2226 Lustenau (Bilder Elisabeth Endres)	4
Abbildung 3_Jahresverlauf Außen- und Innenraumtemperatur Gebäude 2226 [6]	5
Abbildung 4_Spannungsfeld passive Parameter – Nutzung.....	6
Abbildung 5_Betrachtungsschwerpunkte Studie.....	7
Abbildung 6_Außentemperatur + relative Feuchte	15
Abbildung 7_Globalstrahlung diffus / direkt	15
Abbildung 8_hx Diagramm	16
Abbildung 9_Grundriss Raummodell	16
Abbildung 10 a-c_Raumvolumen + lichtetes Raummaß.....	17
Abbildung 11_Sonnenstandsdiagramm [18]	20
Abbildung 12_Boxplot Ergebnis Fensterflächenanteil [%] Kriterium sDA 55%-75%	29
Abbildung 13_Boxplot Ergebnis sDA [%]	29
Abbildung 14_Boxplot Ergebnis absolut mögliche Bandbreite Fensterflächen [m ²]	29
Abbildung 15_a-h_Darstellung Verteilung Tageslicht min.-max. je nach Orientierung N,S,W,O; t=0,7	30
Abbildung 16_Verteilung operative Temperaturen_Lüftungsszenario 1.....	32
Abbildung 17_Verteilung operative Temperaturen_Lüftungsszenario 2 + CO ₂	33
Abbildung 18_Verteilung CO ₂ _Lüftungsszenario 2	33
Abbildung 19_Verteilung operative Temperaturen_Lüftungsszenario 3.....	34
Abbildung 20_Verteilung operative Temperaturen_Lüftungsszenario 4.....	34
Abbildung 21_Parameter Orientierung in Kombination mit unterschiedlichen Glasqualitäten; Klima: Potsdam extrem ..38	
Abbildung 22_Parameter Orientierung in Kombination mit unterschiedlichen Glasqualitäten; Klima: Potsdam normal ..38	
Abbildung 23_Punktwolke der Ergebnisse passiv+	40
Abbildung 24_Parameter Orientierung - passiv+;.....	41
Abbildung 25_Parameter Fensterflächenanteil - passiv+	41
Abbildung 26_Parameter Glasqualität / Verglasung WSV – SSV - passiv+	42
Abbildung 27_Parameter Baukonstruktion AW + thermische Masse Innenausbau - passiv+	42
Abbildung 28_Parameter Eigenverschattung / Laibung Innenausbau - passiv+	43
Abbildung 29_Parameter Anteil wirksame thermische Speichermassen Decke - passiv+	43
Abbildung 30_Punktwolke der Ergebnisse passiv++ ergänzendes System Sonnenschutz.....	45
Abbildung 31_Parameter Orientierung - passiv++ Sonnenschutz	45
Abbildung 32_Parameter Fensterflächenanteil - passiv++ Sonnenschutz	46
Abbildung 33_Parameter Verglasung - passiv++ Sonnenschutz	46
Abbildung 34_Parameter Baukonstruktion AW + thermische Masse Innenausbau - passiv++ Sonnenschutz	47
Abbildung 35_Parameter Eigenverschattung / Laibung - passiv++ Sonnenschutz	47

Abbildung 36_Parameter Thermische Speichermassen Decke - passiv++ Sonnenschutz;	48
Abbildung 37_Punktwolke der Ergebnisse passiv++ ergänzendes System mechanische Lüftung	48
Abbildung 38_Parameter Orientierung - passiv++ mech. Lüftung	49
Abbildung 39_Parameter Fensterflächenanteil - passiv++ mech. Lüftung	49
Abbildung 40_Parameter Glasqualität - passiv++ mech. Lüftung	50
Abbildung 41_Parameter Baukonstruktion AW + thermische Masse Innenausbau - passiv++ mech. Lüftung	50
Abbildung 42_Parameter Eigenverschattung - passiv++ mech. Lüftung	51
Abbildung 43_Parameter thermische Speichermassen Decke - passiv++ mech. Lüftung	51
Abbildung 44_Punktwolke der Ergebnisse passiv++ ergänzendes System Betonkerntemperierung BKT	52
Abbildung 45_Parameter Orientierung - passiv++ BKT	52
Abbildung 46_Parameter Fensterflächenanteil - passiv++ BKT	53
Abbildung 47_Parameter Glasqualität - passiv++ BKT	53
Abbildung 48_Parameter Baukonstruktion AW + thermische Masse Innenausbau - passiv++ BKT	54
Abbildung 49_Parameter Eigenverschattung / Laibung - passiv++ BKT	54
Abbildung 50_Übersicht Punktwolken der unterschiedlichen Randbedingungen passiv + und passiv ++	55
Abbildung 51_Parameter Orientierung - passiv ++ Sonnenschutz_SEMINAR	56
Abbildung 52_Parameter Orientierung - passiv ++ mech. Lüftung_SEMINAR	57
Abbildung 53_Parameter Orientierung - passiv ++ BKT_SEMINAR	57
Abbildung 54_Ranking der einzelnen passiven Parameter sommerliches Verhalten	60
Abbildung 55_Ranking der einzelnen passiven Parameter Betriebsenergie	60
Abbildung 56_Ranking der einzelnen passiven Parameter sommerliches Verhalten	61
Abbildung 57_Ranking der einzelnen passiven Parameter Betriebsenergie	61
Abbildung 58_Ranking der einzelnen passiven Parameter sommerliches Verhalten	62
Abbildung 59_Ranking der einzelnen passiven Parameter Betriebsenergie	62
Abbildung 60_Ranking der einzelnen passiven Parameter sommerliches Verhalten	63
Abbildung 61_Ranking der einzelnen passiven Parameter Betriebsenergie	63
Abbildung 62_Außenwandkonstruktionen GWP je m ² - Herstellung	64
Abbildung 63_Außenwandkonstruktionen GWP je m ² – End of Life	64

Quellenverzeichnis

- [1] EnEV 2014 | Abschnitt 4 | § 14 Verteilungseinrichtungen und Warmwasseranlagen
- [2] Verordnung über einen energiesparenden Wärmeschutz bei Gebäuden (Wärmeschutzverordnung – WärmeschutzV) – 11.08.1977
- [3] EnEV 2014 für Nichtwohngebäude | Novellierung 2016
- [4] „Bericht der Baukostensenkungskommission“; Bundesministerium für Umweltschutz, Bau und Reaktorsicherheit; Endbericht November 2015
- [5] „be 2226 Die Temperatur der Architektur“, Dietmar Eberle; Florian Aicher; Hueber Eduard; 01/2016; Birkhäuser Verlag
- [6] „Arquitectura Viva 11/2014“ - Lustenau
- [7] <http://www.grasshopper3d.com>
- [8] <http://www.ladybug.tools>
- [9] TRNLizard _ <http://www.trnsys.de>
- [10] DIN V 18599-10:2011-12 Energetische Bewertung von Gebäuden – Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwasser und Beleuchtung - Teil 10: Nutzungsrandbedingungen, Klimadaten; Beuth Verlag
- [11] + www.dwd.de/DE/leistungen/testreferenzjahre/testreferenzjahre.html
- [13] Testreferenzjahre von Deutschland für mittlere, extreme und zukünftige Witterungsverhältnisse; Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR) in Zusammenarbeit mit der Climate & Environment Consulting Potsdam GmbH und dem Deutschen Wetterdienst (DWD); September 2014
- [12] Schwierigkeiten bei der Verwendung der TRY Daten 2011 für Deutschland in der Thermischen Simulation; Lam J., Hiller M.
- [14] + Technische Regeln für Arbeitsstätten - ASR A1.2 "Raumabmessungen und Bewegungsflächen"; GMBI September 2013 mit Änderungen 2017
- [16]
- [15] DIN 4543-1:1994-09 – Büroarbeitsplätze Flächen für Aufstellung und Benutzung von Büromöbeln; Beuth Verlag
- [17] DIN EN 15251:2012-12 - Eingangsparameter für das Raumklima zur Auslegung und Bewertung der Energieeffizienz von Gebäuden - Raumluftqualität, Temperatur, Licht und Akustik; Beuth Verlag
- [18] https://www.stadtklima-stuttgart.de/index.php?klima_sonnenstand
- [19] DIN 4108-2:2013-02 - Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden - Teil 2: Mindestanforderungen an den Wärmeschutz; Beuth Verlag
- [20] ClimaSkin: Konzepte für Gebäudehüllen, die mit weniger Energie mehr leisten; Hausladen, Liedl, Saldaha; Callwey Verlag 12/2006
- [21] EnEV 2014 für Nichtwohngebäude | Novellierung 2016
- [22] <https://www.schlagmann.de/de/Produkte/Perlitgefueellte-Ziegel/POROTON-S9> (Angaben lt. Produktinformation 27.02.2018)

- [23] <https://wienerberger.at/produkte/porotherm-38-plan> (Angaben lt. Produktinformation 27.02.2018)
- [24] SIA-Effizienzpfad Energie; Schweizerischer Ingenieur und Architektenverein;
- [25] DIN 4108-2:2013-02 - Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden - Teil 2: Mindestanforderungen an den Wärmeschutz; Beuth Verlag
- [26] Forschungsbericht: „Gebäude als intelligenter Baustein im Energiesystem - Lastmanagement-Potenziale von Gebäuden im Kontext der zukünftigen Energieversorgungsstruktur in Deutschland“; Auer; Hamacher; Wagner – Technische Universität München Juli 2017
- [27] Technische Regeln für Arbeitsstätten - ASR A3.4 "Beleuchtung"; GMBI September 2011
- [28] DIN 5034-1:2011-07; Tageslicht in Innenräumen - Teil 1: Allgemeine Anforderungen; Beuth Verlag
- [29] DIN EN 15251:2012-12 - Eingangsparameter für das Raumklima zur Auslegung und Bewertung der Energieeffizienz von Gebäuden - Raumluftqualität, Temperatur, Licht und Akustik; Beuth Verlag
- [30] VDI 2067 - Wirtschaftlichkeit gebäudetechnischer Anlagen; Verein Deutscher Ingenieure; September 2012
- [31] <http://www.oekobaudat.de>; Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (Aufruf/Stand Dezember 2017)
- [32] KlimaDesign: Lösungen für Gebäude, die mit weniger Technik mehr können; Hausladen, Saldanha, sager, Liedt; Callwey Verlag 2005