HeatResilientCity

Hitzeresiliente Stadt- und Quartiersentwicklung in Großstädten –
Bewohnerorientierte Wissensgenerierung und Umsetzung in Dresden und Erfurt

Wissenschaftliches Konzept zur Optimierung des sommerlichen Wärmeschutzes eines Gründerzeit-Mehrfamilienhauses der Erfurter Oststadt (zugehörig zur Liegenschaftsverwaltung Brechmann)

Arbeitspaket 3.2: Innovativer Gebäude(um)bau

Erstellt von:

IÖR	David Schiela
	Christoph Schünemann
	Leibniz-Institut für ökologische Raumentwicklung e. V., Weberplatz 1, 01217 Dresden
HTW	Stefanie Kunze
	Hochschule für Technik und Wirtschaft Dresden, Friedrich-List-Platz 1, 01069 Dresden
LHE	Guido Spohr
	Landeshauptstadt Erfurt, Umwelt- und Naturschutzamt, Stauffenbergallee 18, 99085 Erfurt
LVB	Liegenschaftsverwaltung Bert Brechmann, Schillerstraße 62, 99096 Erfurt

Dresden, den 24.09.2020 *(korrigierte Version vom 03.11.2022)*

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis **2**

Abbildungsverzeichnis **3**

Tabellenverzeichnis **4**

1 Vorstellung des ausgewählten Gebäudes **5**

1.1 Allgemeine Objektbeschreibung 5
1.2 Gebäudestruktur 7
1.3 Baukonstruktionen 9

2 Analyse des sommerlichen Wärmeschutzes im IST-Zustand **11**

2.1 Standortbedingungen 11
2.2 Sonneneintragskennwerteverfahren 13
2.3 Dynamisch-thermische Gebäudesimulation 14

2.3.1 Allgemeines und Bewertungsgrundlagen 14
2.3.2 Simulationsrandbedingungen 15
2.3.3 Validierung des Simulationsmodells 18
2.3.4 Ergebnisse der Simulationsrechnungen 20

3 Entwicklung von Anpassungsmaßnahmen **22**

3.1 Vorbemerkungen 22
3.2 Strategie A: Minderung der Wärmeeinträge 23

3.2.1 Allgemeines 23
3.2.2 Sonnenschutz der Dachflächenfenster 23
3.2.3 Sonnenschutz der straßen- (Ost) und hofseitigen (West) Fenster 24

3.3 Strategie C: Optimierung des Luftwechsels 25
3.4 Weitere Anpassungsmaßnahmen 26
3.5 Finale Anpassungsmaßnahmen 27

4 Analyse der Wirksamkeit ausgewählter Anpassungsmaßnahmen **28**

5 Zusammenfassung **31**

Literaturverzeichnis **32**

Anlagenverzeichnis **33**

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Ostansicht (links) und Westansicht (rechts) des untersuchten Gründerzeithauses 5

Abbildung 2: Schnittdarstellung zum Referenzgebäude Rathenaustraße 15 (Schnitt A-A)..... 6

Abbildung 3: Grundriss 1. Ebene (oben links), Grundriss 2. Ebene (oben rechts), Grundriss 3. Ebene (unten links) und Grundriss 4. Ebene (unten rechts) 7

Abbildung 4: Grundriss Dachgeschoss (5. Ebene) (links) und Grundriss Maisonette (6. Ebene) (rechts) 8

Abbildung 5: Dachquerschnitt des Mehrfamilienhauses 10

Abbildung 6: Luftbild des untersuchten Mehrfamilienhauses..... 11

Abbildung 7: Verschattungssituation der östlichen Fassade zu ausgewählten Tageszeiten..... 12

Abbildung 8: Zusammenfassung des Sonneneintragskennwerteverfahrens..... 13

Abbildung 9: Auszug aus den angesetzten inneren Lasten durch Personen und Geräte 17

Abbildung 10: Lüftungsverhalten im Schlaf- und Wohnzimmer 18

Abbildung 11: Überblick über die Innenraummessungen 2019 19

Abbildung 12: Sommerlicher Wärmeschutz im IST-Zustand 20

Abbildung 13: Auszug aus den Befragungsergebnissen (Sinning & Baldin, 2019) 22

Abbildung 14: Übersicht über außen und innen liegende Sonnenschutzsysteme..... 23

Abbildung 15: Beispiel eines solarbetriebenen Rollladens für die westlichen Dachflächenfenster ... 24

Abbildung 16: Beispiel einer Senkrecht-Markise für die östlichen Fenster 25

Abbildung 17: Wirksamkeit von Einzelmaßnahmen und ausgewählten Maßnahmenkombinationen - Schlafzimmer Wohneinheit 8 28

Abbildung 18: Wirksamkeit von Einzelmaßnahmen und ausgewählten Maßnahmenkombinationen - Wohnküche Wohneinheit 8..... 30

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Wandeigenschaften des Untersuchungsobjekts 9

Tabelle 2: Vergleich der Wetterdatensätze mit Hilfe ausgewählter Merkmale..... 16

Tabelle 3: Ergebnis der Auswertung der Innenraummessungen 2019 19

Tabelle 4: Eigenschaften von ausgewählten Fenstern 24

Tabelle 5: Darstellung des finalen Maßnahmenportfolios 27

1 Vorstellung des ausgewählten Gebäudes

1.1 Allgemeine Objektbeschreibung

Im Rahmen des Verbundforschungsprojektes „HeatResilientCity – Hitzeresiliente Stadt- und Quartiersentwicklung in Großstädten“ wurde im Beispielquartier Erfurter Oststadt ein gründerzeitliches Mehrfamilienhaus ausgewählt, welches zum aktuellen Zeitpunkt von der Liegenschaftsverwaltung Bert Brechmann verwaltet wird. Im Gegensatz zu den ausgewählten Gebäuden im Beispielquartier Dresden-Gorbitz sind für dieses Gebäude aktuell keine Sanierungs- oder Modernisierungskonzepte vorgesehen (siehe Wissenschaftliches Konzept zur Optimierung des sommerlichen Wärmeschutzes im Gebäudebestand der Eisenbahner-Wohnungsbaugenossenschaft Dresden eG). Aufgrund dieser Tatsache werden in diesem Zwischenbericht die Wirkungen verschiedener Maßnahmen zur Optimierung des sommerlichen Wärmeschutzes ausschließlich auf der Grundlage des aktuellen IST-Zustandes untersucht.

In dem Projektgebiet gliedert sich das Untersuchungsobjekt in eine für die Erfurter Oststadt typische Blockrandbebauung ein. Die in diesem Konzept aufgeführten Ergebnisse können somit, unter Berücksichtigung einiger Randbedingungen, sowohl auf andere Gebäude in der Erfurter Oststadt als auch auf andere Städte mit ähnlichen Stadtstrukturen bzw. Gebäudetypen übertragen werden.

Kennzeichnend für die erweiterte Gründerzeit sind vor allem die mit vielfältigen Gestaltungselementen ausgeführten straßenseitigen Fassaden der Gebäude. So prägen in der Regel Gesimse und Gewände sowie Schmuckelemente das sichtbare Erscheinungsbild der Gebäude. Um den Fassaden darüber hinaus eine Struktur zu verleihen, sind diese oftmals symmetrisch gestaltet sowie mit Vor- und Rücksprüngen ausgebildet. Die Fassaden der Hinterhöfe sind im Vergleich dazu schlichter und mit weniger Stilelementen ausgeführt. Im Hinblick auf die Baukonstruktionen sind vor allem das Ziegelmauerwerk, in den Wohnetagen realisierte Holzbalkendecken sowie in den Fassaden integrierte Kastenfenster charakteristische Merkmale dieser Bauzeit. Im Laufe der Nutzungszeit wurden zudem bei vielen Gebäuden die teilweise ungenutzten Dachgeschosse nachträglich ausgebaut, um neuen Wohnraum zu schaffen (Weller, Fahrion, Horn, Naumann, & Nikolowski, 2016).

Abbildung 1: Ostansicht (links) und Westansicht (rechts) des untersuchten Gründerzeithauses

Bei dem ausgewählten Gebäude handelt es sich konkret um das im Jahr 1912 errichtete Mehrfamilienhaus in der Rathenaustraße 15 in 99085 Erfurt. Das Untersuchungsobjekt erhebt sich über einen annähernd quadratischen Grundriss auf insgesamt 4 Vollgeschosse, ist vollständig unterkellert und weist zwei für Wohnzwecke vollständig ausgebaute Dachgeschosswohnungen auf. Die Vollgeschosse weisen dabei eine lichte Raumhöhe von ca. 3 Metern auf. Die nachfolgende Abbildung 2 zeigt in diesem Zusammenhang einen Querschnitt vom untersuchten Objekt.

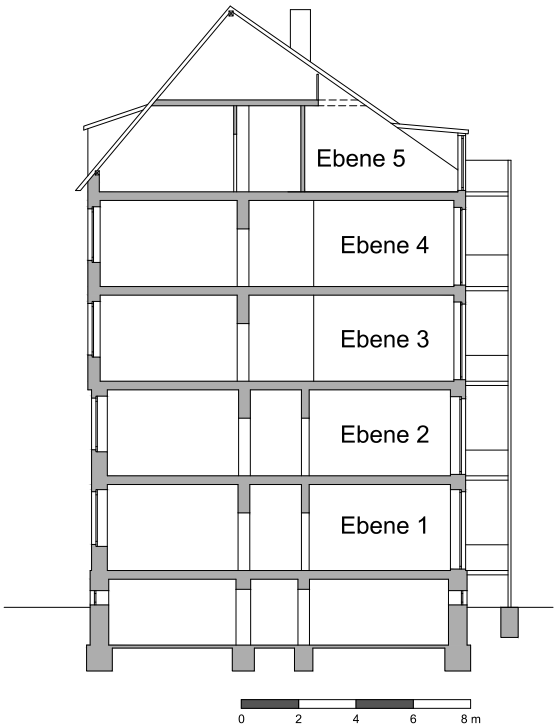


Abbildung 2: Schnittdarstellung zum Referenzgebäude Rathenaustraße 15 (Schnitt A-A)

Das Dach des Wohngebäudes hat die Form eines Satteldaches und ist als hölzernes Pfettendach konstruiert. Zur Aussteifung des Dachtragwerks ist die Geschossdecke im Dachgeschoss als statische Scheibe ausgebildet. Zusätzlich wird das Dach durch Schleppgauben, Dachflächenfenster und durch eine Giebelgaube charakterisiert. Die Dachflächen sind mit dunkelroten Dachziegeln eingedeckt. Darüber hinaus sind die Gaubenwangen außenseitig mit Naturschiefersteinen versehen.

Bei dem Referenzgebäude sind besonders die Fassaden mit den integrierten Fenstern von architektonischer und städtebaulicher Bedeutung. Die straßenseitige Fassade ist mit einem Glattputz und Werksteinen versehen. Außerdem sind Vor- und Rücksprünge ausgebildet, die der Fassade eine symmetrische Struktur verleihen. Der straßenseitige Sockel- und Eingangsbereich hebt sich durch eine Natursteinausbildung von den anderen Fassadenbereichen ab. Im Vergleich zur straßenseitigen Fassade ist die hofseitige Fassade in der Gestalt einer Klinkerfassade ausgebildet.

Durch den Projektpartner Landeshauptstadt Erfurt (LHE) wurde eine Archivrecherche im Bauaktenarchiv der Landeshauptstadt Erfurt durchgeführt. Die dort vorliegenden Unterlagen wurden gesichtet, eingescannt und den Projektpartnern zur weiteren Bearbeitung zur Verfügung gestellt. Aus den Unterlagen konnte entnommen werden, dass das Gebäude in den Jahren 2002 und 2003 umfangreich modernisiert und instandgesetzt wurde. Gegenstand der damaligen Baumaßnahme war u. a. der Ausbau des Dachgeschosses, die Instandsetzung der Fassaden inkl. Erneuerung der Fenster und die Errichtung der hofseitigen Balkonanlagen. Während der Bauausführung wurden außerdem Schäden an der Bausubstanz

festgestellt. Einige Bauteile waren partiell mit Echten Hausschwamm befallen, sodass zusätzlich zu den geplanten Baumaßnahmen eine umfangreiche Hausschwammsanierung durchgeführt werden musste.

1.2 Gebäudestruktur

Das Mehrfamilienhaus in der Rathenaustraße 15 gliedert sich in 8 Wohneinheiten, die im aktuellen IST-Zustand ausschließlich zu Wohnzwecken genutzt werden. Für die vertikale Erschließung ist eine zweiläufige, gegenläufige Treppe mit Zwischenpodesten im innenliegenden Treppenhaus realisiert. Die Treppen sind als Rechtstreppen ausgeführt und bestehen aus Betonwerksteinen, die auf Stahlträger gelagert sind. Einen Überblick über die Raumstrukturen der Vollgeschosse zeigen die in der nachfolgenden Abbildung 3 dargestellten Grundrisse.

Abbildung 3: Grundriss 1. Ebene (oben links), Grundriss 2. Ebene (oben rechts), Grundriss 3. Ebene (unten links) und Grundriss 4. Ebene (unten rechts)

Die Wohneinheiten 1 und 2 erstrecken sich jeweils als Fünfzimmerwohnungen von der ersten bis in die zweite Gebäudeebene und weisen eine Nutzfläche von 139,9 m² bzw. 130,8 m² auf. In der dritten und vierten Ebene sind im Vergleich dazu jeweils 1 Drei- und 1 Zweizimmerwohnung realisiert, die eine Nutzfläche von 78,2 m² bzw. 70 m² haben. Im Zuge der Sanierungsmaßnahmen in den Jahren 2002 und 2003 wurden im Dachgeschoss weiterhin zwei 93 m² bzw. 91 m² große Dreizimmerwohnungen realisiert. Die zwei Dachgeschosswohnungen sind ebenfalls als Maisonette ausgeführt.

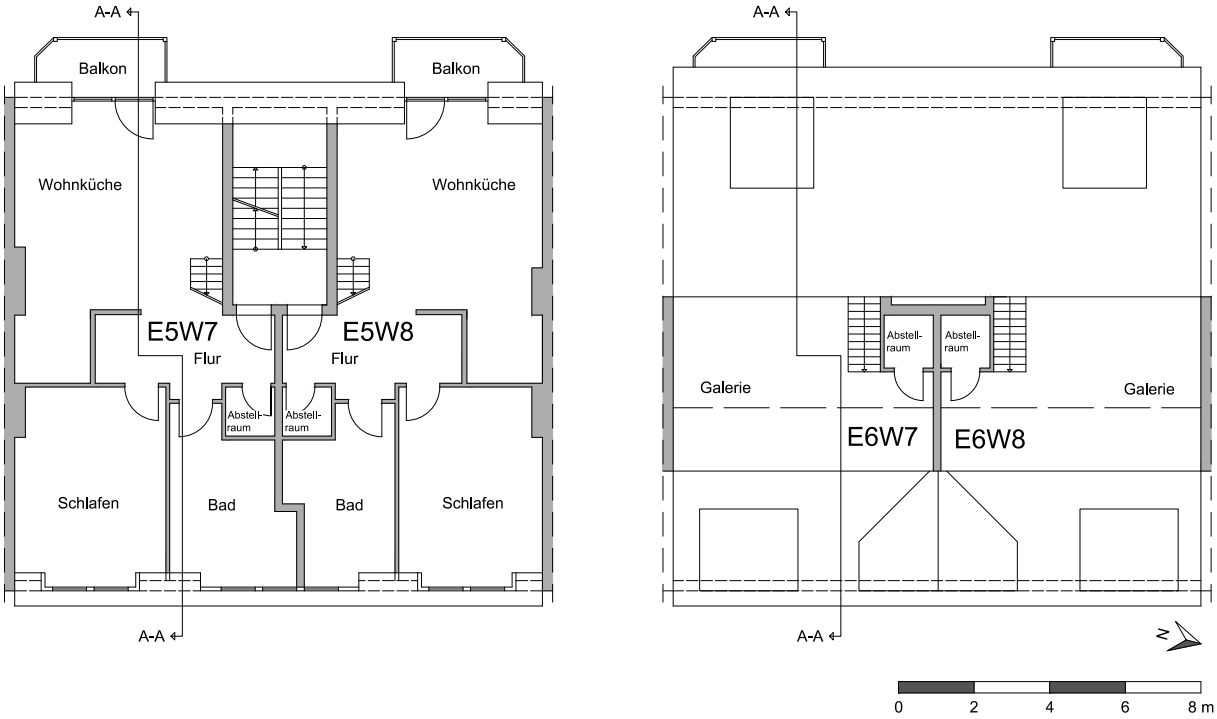


Abbildung 4: Grundriss Dachgeschoss (5. Ebene) (links) und Grundriss Maisonette (6. Ebene) (rechts)

In jeder Wohneinheit ist zunächst ein Flur angeordnet, von welchem aus alle anderen Räumlichkeiten zugänglich sind. Besonders die Wohnräume, wie Wohnzimmer, Wohnküche und Schlafzimmer haben einen großen Flächenanteil an den Wohnungen. Zudem sind in jedem dieser Zimmer Fenster vorhanden, sodass die Räume mit Tageslicht durchflutet werden und die Möglichkeit der Kipp-, Stoß- und Querlüftung besteht. Des Weiteren befinden sich im Kellergeschoss des Untersuchungsobjekts zu den Wohnungen zugeordnete Kellerräume, ein Raum für die Hausanschlüsse sowie ein Haustechnikraum. Das Gebäude ist an das städtische Gasnetz angeschlossen und verfügt im Hinblick auf die Gebäudetechnik über eine zentrale Wärme- und Warmwasserversorgung.

Ein besonderes Merkmal sind außerdem die an der westlichen Gebäudeseite vorgestellten Balkonanlagen. Durch die Konstruktionen wird zu bestimmten Tageszeiten eine Verschattung der dahinterliegenden Fenster bzw. Türen erreicht. Zusätzlich wurden von den Mietern der zwei Dachgeschosswohnungen im Bereich der Balkone Markisen angebracht, die ebenfalls eine Verschattung der dahinterliegenden Fenster bedingen. Hinsichtlich des sommerlichen Wärmeschutzes ist demzufolge zu überprüfen, inwiefern diese Verschattungen bereits im aktuellen IST-Zustand das Innenraumklima während anhaltend heißer Außentemperaturen beeinflussen.

1.3 Baukonstruktionen

a) Wandkonstruktionen

Die Außenwände des Gebäudes sind als Mauerwerkskonstruktionen ausgeführt und bestehen aus Vollziegeln mit einer angenommenen Rohdichte von 1400 kg/m³. Die verwendeten Ziegel entsprechen dabei dem Reichsformat (Länge x Breite x Höhe: 25 x 12 x 6,5 cm) und wurden in unterschiedlichen Mauerwerksverbänden angeordnet, sodass die Wände mit unterschiedlichen Stärken ausgeführt sind und sich mit Zunahme der Gebäudehöhe nach oben verjüngen:

Ebene	Ausrichtung	Wandstärke [cm]	U-Wert [W/(m²K)]
E01 und E02	Ost	51 cm inkl. Stoßfugen, zzgl. Innen- und Außenputz	0,92
	West	51 cm inkl. Stoßfugen, zzgl. Innenputz	0,94
E03 und E04	Ost	38 cm inkl. Stoßfugen, zzgl. Innen- und Außenputz	1,14
	West	38 cm inkl. Stoßfugen, zzgl. Innenputz	1,17

Tabelle 1: Wandeigenschaften des Untersuchungsobjekts

Die östliche und westliche Außenwand der Ebene 5 hat eine Stärke von 25 cm, ist mit einer 6 cm Innendämmung aus Polystyrolhartschaum und einer Gipskartonverkleidung versehen, sodass sich für diese Bauteile ein U-Wert von 0,42 W/(m²K) ergibt. Auch die Giebelwände in den Ebenen 5 und 6 wurden innenseitig gedämmt und mit Gipskarton verkleidet, da im Zuge der Sanierungsmaßnahmen davon ausgegangen wurde, dass die benachbarten Häuser im Dachgeschoss unbeheizt sind. Entsprechend der damals gültigen Energieeinsparverordnung wurde der U-Wert auf 0,45 W/(m²K) limitiert. Die Innenwände des Mehrfamilienhauses haben ein Stärke von 8 bis 41 cm und sind als Ziegelmauerwerk bzw. Fachwerk ausgeführt. Im ausgebauten Dachgeschoss sind darüber hinaus Trockenbauwände vorhanden.

In den Außenwandkonstruktionen sind Fenster bzw. Fenstertüren mit unterschiedlichen Formen und Strukturen integriert. Die Fenster wurden im Zuge der damaligen Sanierungsmaßnahme vollständig ausgetauscht und mussten teilweise nach historischem Vorbild erneuert werden. So prägen zum Beispiel profilierte Kämpfer und Sprossen das Erscheinungsbild der straßenseitigen Fenster. Bei einer baukonstruktiven Erkundung ausgewählter Wohnungen durch die Projektpartner IÖR, HTW, LHE sowie LVB konnten bei den Fenstern Informationen im Scheibenzwischenraum aufgenommen werden. Demzufolge sind die Fenster im Kellergeschoss mit einer 2-Scheibenverglasung (2x4 mm Floatglas) ausgeführt. Anhand der Fenster der oberen Geschosse wurde der Scheibenzwischenraum zwischen den zwei Glasscheiben mit einer Breite von 14 mm bestimmt. Da keine weiteren technischen Daten der Fenster der oberen Geschosse ermittelt werden konnten, wurden folgende Annahmen getroffen:

- Rahmenanteil der Fenster aus Fotos sowie Vor-Ort-Messungen bestimmt
- Wärmedurchlasswiderstand: U_w = 1,80 W/(m²K)
- Energiedurchlass: g = 0,6

Um in den nachfolgenden Untersuchungen auch die Wärmeleitung durch Wärmebrücken der Bauteile mit zu erfassen, wurde vereinfacht ein genereller, flächenbezogener Wärmebrückenkoeffizient von 0,10 W/(m²K) aufgeschlagen.

b) Geschossdecken

In den Wohngeschossen fungieren Holzbalkendecken mit Einschüben als Geschossdecken. Die Fußbodenkonstruktionen bestehen in der Regel aus einem Trockenestrich, der auf eine Wärme- bzw. Trittschalldämmung aufgebracht und mit verschiedenen Bodenbelägen versehen wurde. Die Kellerdecke ist als massive Trägerdecke konstruiert und im Zuge der Sanierungsmaßnahmen oberseitig mit einer Dämmung mit maximal möglicher Dämmstoffdicke (WLG 040), bei der keine Anpassung der Türhöhen erforderlich ist, instandgesetzt worden. Für die weiteren Betrachtungen wurden 60 mm WLG040 Dämmung angesetzt, sodass der resultierende U-Wert der Kellerdecke ca. 0,50 W/(m²K) beträgt.

c) Dach

Das Dach des Untersuchungsobjekts hat die Form eines Satteldaches und ist als hölzernes Pfettendach konstruiert. Zudem wird das Erscheinungsbild durch Schleppgauben, Dachflächenfenster und durch die straßenseitige Giebelgaube geprägt. Um auch hier den Anforderungen der damals gültigen Energieeinsparverordnung gerecht zu werden, wurde im Zuge der Sanierung eine Zwischensparrendämmung im Dachquerschnitt realisiert. Innenseitig wurden die Dachflächen mit Gipskarton verkleidet, sodass der Dachaufbau einen entsprechenden U-Wert von 0,30 W/(m²K) hat. Die nachfolgende Abbildung 5 zeigt den sanierten Dachaufbau des Gebäudes:

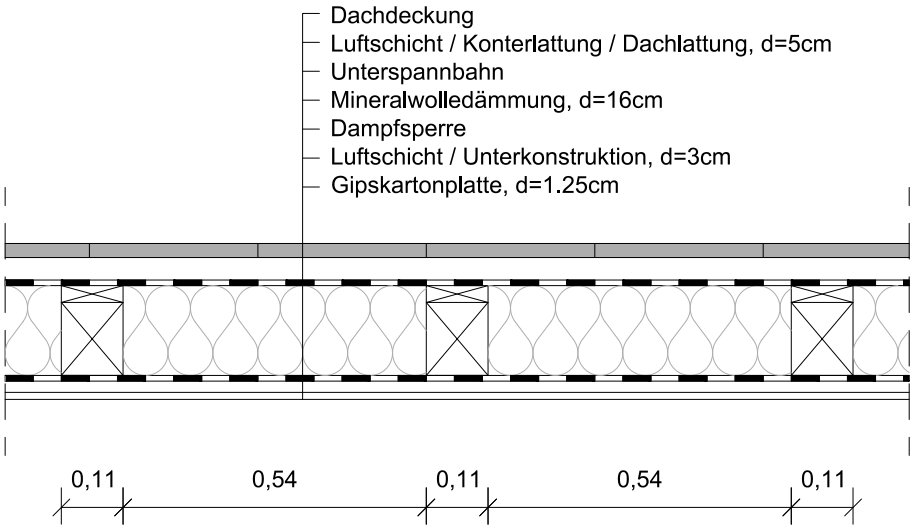


Abbildung 5: Dachquerschnitt des Mehrfamilienhauses

2 Analyse des sommerlichen Wärmeschutzes im IST-Zustand

2.1 Standortbedingungen

Zur Bewertung des sommerlichen Wärmeschutzes sind die vor Ort gegebenen Standortbedingungen zu berücksichtigen. Dementsprechend können z. B. Bäume oder Nachbargebäude, die sich in der Nähe befinden, das Gebäude oder einzelne Gebäudebereiche verschatten und somit einen erheblichen Einfluss auf das Innenraumklima während Hitzeperioden haben. Eine Übersicht über den Standort zeigt das in Abbildung 6 dargestellte Luftbild des Untersuchungsobjekts.

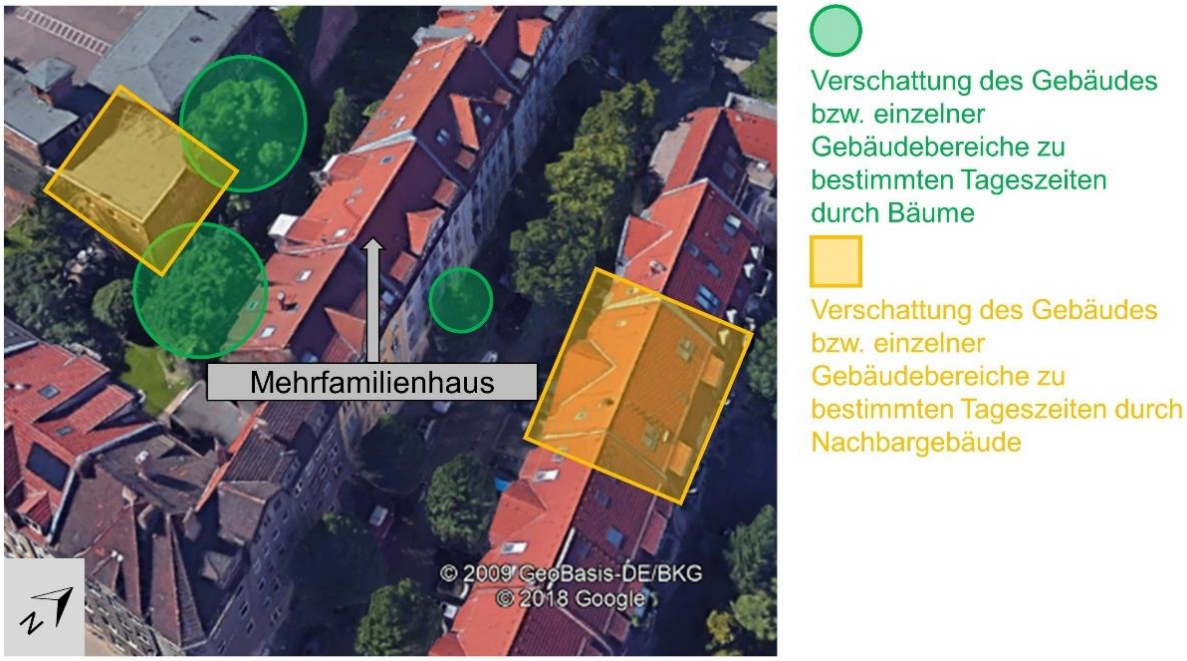


Abbildung 6: Luftbild des untersuchten Mehrfamilienhauses

Der Zugang in das Gebäude erfolgt von östlicher Richtung über die angrenzende Rathenaustraße. Eine Zufahrt auf das Grundstück ist nicht vorhanden. Der im westlichen Grundstücksbereich befindliche Hinterhof kann somit ausschließlich über das im Gebäudezentrum realisierte Treppenhaus und nur zu Fuß erreicht werden. Im Hinterhof sind u. a. eine Terrasse mit Sitzgelegenheiten für die Mieter und ein kleiner Kinderspielplatz errichtet.

Außerdem sind in dem Luftbild die Bäume und Nachbargebäude gekennzeichnet, die zu bestimmten Tageszeiten eine Verschattung des Untersuchungsobjekts bzw. einzelner Gebäudebereiche hervorrufen. Im Rahmen des Verbundforschungsprojektes wurde hierzu in einem ersten Schritt eine Animation zur Bewertung der Verschattungssituation durchgeführt, welche in Abbildung 7 exemplarisch für die östliche Fassade dargestellt ist. Dabei wurde beispielhaft der 10. Juni ausgewählt und die Situation für die Zeitpunkte 7.00 Uhr, 9.00 Uhr und 13.00 Uhr bewertet.

Abbildung 7: Verschattungssituation der östlichen Fassade zu ausgewählten Tageszeiten

Der in Abbildung 7 abgebildete Tagesverlauf vom 10. Juni verdeutlicht, dass die östlichen Fenster des Dachgeschosses ab ca. 7.00 Uhr und bis ca. 12.30 Uhr vollständig besonnt werden. Ab etwa 9.00 Uhr werden darüber hinaus auch die östlichen Fenster der Vollgeschosse von der Sonne beschienen. Ab ca. 13.00 Uhr ist dagegen die östliche Fassade komplett von der Sonne abgewandt. Im Vergleich dazu werden die westlichen Fenster des Dachgeschosses ab ca. 13.00 Uhr und bis zum Abend hin vollständig besonnt. Die westlichen Fenster der Vollgeschosse werden demgegenüber durch Bäume, Nachbargebäude und durch die vorgestellten Balkonanlagen zum größten Teil des Nachmittages verschattet. Die durch die Mieter der Dachgeschosswohnungen angebrachten Markisen im Bereich der Balkone wurden ausschließlich beim Abgleich von Simulationsergebnissen und Innenraummessungen (Siehe Abschnitt 2.3.3) berücksichtigt. In den weiteren Untersuchungen werden die Sonnenschutzvorrichtungen jedoch vernachlässigt, da diese nur manuell gesteuert werden können und die Konstruktionen sehr windanfällig sind. Es ist folglich davon auszugehen, dass die Markisen höchstens bei Anwesenheit der Mieter zum Einsatz kommen. Die Ergebnisse liegen somit auf der sicheren Seite.

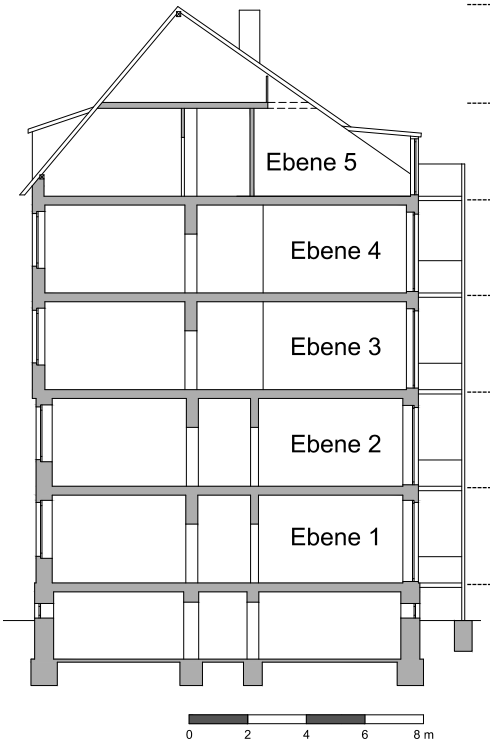
Die hier dargestellte Verschattung wurde in den nachfolgenden Untersuchungen, die mit Hilfe der dynamisch-thermischen Gebäudesimulation durchgeführt wurden, jeweils einheitlich in den einzelnen Simulationsvarianten vorausgesetzt, um realistische und vergleichbare Ergebnisse zu erzielen. Zudem war dieses Vorgehen erforderlich, um das erstellte Simulationsmodell in einem weiteren Arbeitsschritt mit Raumtemperaturmessungen im Referenzgebäude entsprechend validieren zu können. Damit wird abweichend von der Norm DIN 4108-2:2013-02 (DIN Deutsches Institut für Normung, 2013, S. 31) zusätzlich zu der baulichen Verschattung durch die Nachbargebäude auch der Einfluss von Bäumen berücksichtigt.

Die standortbedingte Verschattung des Mehrfamilienhauses durch die Nachbargebäude und die Bäume auf der Ost- und Westseite des Gebäudes stellt somit eine wichtige Randbedingung dar, die sowohl bei der Analyse des sommerlichen Wärmeschutzes als auch bei der Übertragbarkeit der Ergebnisse auf andere Gebäude desselben Gebäudetyps zwingend berücksichtigt werden muss.

2.2 Sonneneintragskennwerteverfahren

Zur ersten Einschätzung des sommerlichen Wärmeschutzes im IST-Zustand wurde das Sonneneintragskennwerteverfahren nach DIN 4108-2:2013-02 (DIN Deutsches Institut für Normung, 2013, S. 24ff.) für ausgewählte Räume bzw. Raumbereiche durchgeführt. Dabei wurden gezielt die Räume ausgewählt, für die aufgrund des hohen Fensterflächenanteils und / oder der geringen wirksamen Wärmespeicherkapazität eine hohe thermische Belastung während Hitzeperioden zu erwarten ist. Der Nachweis wurde je Etage für einen Raum an der Ostfassade und für einen Raum an der Westfassade geführt, um zusätzlich zu den unterschiedlichen Raumstrukturen auch die Orientierung der Fenster zu berücksichtigen. Die Ergebnisse sind in der Anlage 1 zusammengestellt.

In einem ersten Schritt erfolgte, aufgrund des geografischen Standortes in Erfurt, die Zuordnung zur Sommerklimaregion B nach DIN 4108-2:2013-02 (DIN Deutsches Institut für Normung, 2013, S. 21). Darüber hinaus wurden die geometrischen Randbedingungen zusammengestellt, die wirksamen Wärmekapazitäten der einzelnen Räume nach DIN EN ISO 13786:2008-04 (DIN Deutsches Institut für Normung, 2008, S. 16f.) berechnet und im Anschluss nach DIN 4108-2:2013-02 (DIN Deutsches Institut für Normung, 2013, S. 27) beurteilt. Im Ergebnis ist festzuhalten, dass die untersuchten Räume unterschiedliche Wärmekapazitäten aufweisen und dass vor allem das ausgebaute Dachgeschoss durch eine „Leichte Bauart“ charakterisiert ist. Die nachfolgende Abbildung 8 zeigt hierzu eine Zusammenfassung der wesentlichen Ergebnisse.



WE / Zimmer	Fenster-Orientierung	Wirksame Wärme-kapazität	Fensterflächen-anteil	S_{zul}	S_{vor}	Ausnutzungs-grad	Nachweis erfüllt bzw. nicht erfüllt
WE 8 Galerie	West	Leichte Bauart	4%	0,12	0,03	25%	Nachweis erfüllt
WE 8 Wohnküche	West	Leichte Bauart	10%	0,14	0,06	43%	Nachweis erfüllt
WE 8 Schlafzimmer	Ost	Leichte Bauart	9%	0,15	0,06	40%	Nachweis erfüllt
WE 6 Wohnküche	West	Mittlere Bauart	15%	0,17	0,09	53%	Nachweis erfüllt
WE 6 Schlafzimmer	Ost	Schwere Bauart	17%	0,19	0,10	53%	Nachweis erfüllt
WE 4 Wohnküche	West	Mittlere Bauart	15%	0,17	0,09	53%	Nachweis erfüllt
WE 4 Schlafzimmer	Ost	Schwere Bauart	17%	0,19	0,10	53%	Nachweis erfüllt
WE 2 Schlafzimmer	West	Schwere Bauart	18%	0,19	0,11	58%	Nachweis erfüllt
WE 2 Kinderzimmer	Ost	Mittlere Bauart	22%	0,15	0,13	87%	Nachweis erfüllt
WE 2 Wohnzimmer	West	Mittlere Bauart	18%	0,16	0,11	69%	Nachweis erfüllt
WE 2 Arbeitszimmer	Ost	Schwere Bauart	28%	0,17	0,17	100%	Nachweis erfüllt

Annahmen: g – Wert der Fenster: 0,6
F_c – Wert der Fenster: 1,0
Erhöhte Nachtlüftung n >= 2 h^{-1}
Sommerklimaregion B nach DIN 4108-2

Abbildung 8: Zusammenfassung des Sonneneintragskennwerteverfahrens

Die in Abbildung 8 dargestellte Tabelle zeigt weiterhin auf, dass die Nachweise für das Kinderzimmer der Wohneinheit 2 in der zweiten Gebäudeebene und für das Arbeitszimmer der Wohneinheit 2 in der ersten Gebäudeebene mit 87% bzw. 100% einen hohen Ausnutzungsgrad haben. Dies ist damit begründet, dass das Kinderzimmer und das Arbeitszimmer eine geringe Nutzfläche und gleichzeitig eine

hohe Fensterfläche haben. Im Vergleich dazu ergeben sich in den anderen Räumen keine nennenswerten Ausnutzungsgrade. Auch für die Räume im Dachgeschoss ist formal nach DIN 4108-2:2013-02 (DIN Deutsches Institut für Normung, 2013) der sommerliche Wärmeschutz nach dem standardmäßig anzuwendenden Sonneneintragskennwerteverfahren erfüllt.

Es wird jedoch darauf hingewiesen, dass das Sonneneintragskennwerteverfahren ein vereinfachtes Verfahren darstellt, um den sommerlichen Wärmeschutz nachzuweisen. Das genaue Nutzerverhalten zur Lüftung und zum Einsatz von Verschattungen kann beispielsweise in dem Nachweis nur bedingt berücksichtigt werden. Aus diesen Gründen wird an dieser Stelle der Nachweis des sommerlichen Wärmeschutzes mit Hilfe thermischer Gebäudesimulationen empfohlen.

2.3 Dynamisch-thermische Gebäudesimulation

2.3.1 Allgemeines und Bewertungsgrundlagen

Die dynamisch-thermische Gebäudesimulation stellt momentan das genaueste Instrument dar, um sowohl den sommerlichen Wärmeschutz und somit die thermische Behaglichkeit im Gebäudeinneren als auch die Wirksamkeit von Anpassungsmaßnahmen zur Optimierung des sommerlichen Wärmeschutzes zu überprüfen (Schünemann, Schiela, & Ortlepp, Upgrading potentials of founding epoch houses for heat waves intensified by climate change, 2020). Mit Hilfe einer thermischen Gebäudesimulation können Innenraumtemperaturen raumbezogen und in unterschiedlicher zeitlicher Auflösung sowie in Abhängigkeit von verschiedenen Rand- und Rahmenbedingungen berechnet werden. So besteht zum Beispiel die Möglichkeit den Tagesgang der Innenraumtemperatur unter dem dynamischen Einfluss der Außenlufttemperatur, der Solarstrahlung und des Nutzerverhaltens stundengenau darzustellen.

Für die hier beschriebenen Untersuchungen wurde das Simulationsprogramm IDA ICE 4.8 (IDA Indoor Climate and Energy) verwendet, welches vom schwedischen Unternehmen „EQUA Simulation AB“ entwickelt wurde (IDA Indoor Climate and Energy). Neben der Innenlufttemperatur wird in dem Simulationsprogramm auch die operative Innenraumtemperatur ausgegeben. Diese gibt den Mittelwert der Raumlufttemperatur und der flächenanteilig gemittelten Oberflächentemperatur der raumumschließenden Flächen an und dient als Grundlage für die Auswertung der in diesem Zwischenbericht dargestellten Ergebnisse (DIN Deutsches Institut für Normung, 2013, S. 9).

Zur Auswertung von Simulationsrechnungen können im Allgemeinen verschiedene Kriterien verwendet werden. Für die nachfolgenden Untersuchungen wurden einheitlich die folgenden drei Merkmale benutzt, um eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse sicherzustellen:

1. Maximalwert der operativen Temperatur
2. Übertemperaturgradstunden in Anlehnung an DIN 4108-2:2013-02 (DIN Deutsches Institut für Normung, 2013)
3. Überschreitungshäufigkeit zu den Bezugstemperaturen 26 °, 28 °C und 30 °C (Zeitraum: Juni bis September)

Bei der Bestimmung der Übertemperaturgradstunden ist zu beachten, dass nach der Norm DIN 4108-2:2013-02 (DIN Deutsches Institut für Normung, 2013, S. 28) eine Bezugstemperatur von 26° C maßgebend wird, da der geografische Standort des Mehrfamilienhauses in Erfurt ist und somit der Sommerklimaregion B zugeordnet werden kann. Nach der Norm ist außerdem für Wohngebäude ein Grenzwert der Übertemperaturgradstunden von 1200 Kh/a zu berücksichtigen. Dieser ist jedoch in den hier darge-

stellten Untersuchungen nur bedingt maßgebend, da abweichend von der Norm andere Randbedingungen angenommen wurden. Demzufolge wird ausschließlich ein Vergleich der Ergebnisse vorgenommen. Das dritte Kriterium der Überschreitungshäufigkeiten beschreibt den Anteil der Stunden innerhalb einer Periode, in der eine bestimmte Temperatur überschritten wird. Als Referenztemperaturen wurden in Anlehnung an DIN 4108-2:2013-02 (DIN Deutsches Institut für Normung, 2013, S. 28) die Temperaturen 26 °C, 28 °C und 30 °C gewählt.

2.3.2 Simulationsrandbedingungen

a) Wetterdatensatz

Für eine dynamisch-thermische Gebäudesimulation ist insbesondere die Wahl des Wetterdatensatzes als Eingangsparameter von hoher Bedeutung, da dieser einen signifikanten Einfluss auf die Hitzebelastung im Gebäude hat. In einem ersten Schritt wurden hierfür die in Tabelle 2 aufgeführten Datensätze mit Hilfe ausgewählter Merkmale verglichen. Bei den Datensätzen handelt es sich zum einen um das nach der Norm DIN 4108-2:2013-02 (DIN Deutsches Institut für Normung, 2013, S. 29) anzusetzende Testreferenzjahr (TRY) mit der Bezeichnung „TRY-2010-04-Jahr“. Dies ist ein synthetischer Wetterdatensatz, der die klimatischen Verhältnisse eines durchschnittlichen Jahres der Gegenwart für die Region Potsdam wiederspiegelt. Außerdem wurden die ortsgenauen Testreferenzjahre des Deutschen Wetterdienstes ausgewertet, die für die Bundesrepublik Deutschland in einer Auflösung von 1 km² zur Verfügung stehen und somit die Standortbedingungen des Mehrfamilienhauses (u. a. Geländehöhe, Stadt- und Landeffekt) annäherungsweise berücksichtigen (Deutscher Wetterdienst, 2017). Es handelt sich dabei um Datensätze, die die klimatischen Verhältnisse eines durchschnittliches Jahres und eines Jahres mit einem extremen Sommer sowohl für die Gegenwart als auch für die Zukunft beschreiben. Darüber hinaus wurde ein konkreter Wetterdatensatz für die Erfurter Oststadt für das Jahr 2019 aus Messdaten erstellt, der insbesondere für die Validierung des Simulationsmodells erforderlich war. Dieser musste dabei folgende meteorologische Größen in Stundenauflösung beinhalten, um in das Simulationsprogramm implementiert zu werden:

- Außenlufttemperatur in 2 m Höhe
- Relative Luftfeuchte in 2 m Höhe
- Windgeschwindigkeit und Windrichtung in 10 m Höhe
- Direkte und diffuse Solarstrahlung

Für die Wetterstation des Deutschen Wetterdienstes am Flughafen Erfurt sind zwar die wesentlichen meteorologischen Größen als Stundenwerte aufgelöst abrufbar, allerdings liegt der Standort dieser Station 200 m höher als die Erfurter Oststadt und beinhaltet zudem in den Temperaturmessungen nicht den Stadt- und Landeffekt. Entsprechend sind die Außenlufttemperaturen und Windmessungen nur bedingt für den Standort des Mehrfamilienhauses nutzbar. Zudem liefert diese Station keine Informationen zu direkter und diffuser Solarstrahlung. Aufgrund dieser Tatsachen wurde ein Datensatz aus folgenden Daten bzw. Informationen zusammengestellt:

- **Außenlufttemperatur und relative Luftfeuchte:** In den Sommermonaten 2019 wurden im Erfurter Projektgebiet zeitaufgelöste Temperatur- und Feuchtemessungen der Außenlufttemperatur durchgeführt. Die Messstation befand sich dabei auf einer schattigen Grünfläche und ca. 550 m zum Referenzgebäude entfernt.
- **Windgeschwindigkeit und Windrichtung:** Für die erforderlichen Daten zur Windgeschwindigkeit und Windrichtung wurden Messwerte der vom Thüringer Landesamt für Umwelt, Bergbau

und Naturschutz betriebenen Messstation „Bautzener Weg" in Erfurt verwendet (Thüringer Landesamt für Umwelt, Bergbau und Naturschutz, 2020). Die Station befindet sich 1,7 km nordöstlich des Untersuchungsobjekts und misst Windgeschwindigkeit und Windrichtung in 10 m Höhe.

- **Direkte und diffuse Solarstrahlung:** Zusätzlich zu den Außenlufttemperatur- und Windverhältnissen werden für die thermische Gebäudesimulation Daten zur direkten und diffusen Solarstrahlung mit einer Zeitauflösung von mindestens einer Stunde benötigt. Hierfür wurden die Wetterdaten einer Messstation am Thüringer Landesamt für Umwelt, Bergbau und Naturschutz in Jena-Göschwitz genutzt und innerhalb der Gebäudesimulation verwendet (Deutscher Wetter-Daten Server (DWDS), 2020). Der Standort dieser Station befindet sich 40 km westlich des Wohngebäudes.

Merkmal	TRY2010-04 Jahr	TRY2015 Jahr	TRY2015 Sommer	TRY2045 Jahr	TRY2045 Sommer	Datensatz Erfurt 2019
Jahresdurchschnittstemperatur [°C]	9,5	10,2	10,7	11,4	11,4	10,8
Durchschnittstemperatur im Sommer von Juni bis August [°C]	18,1	18,7	19,6	19,8	20,3	21,1
Maximaltemperatur [°C]	35,4	29,7	35,8	33,5	33,7	37,2
Anzahl heißer Tage (maximale Außentemperatur >30°C)	5	0	13	6	5	24
Anzahl Tropennächte (minimale Außentemperatur von 18-6 Uhr >20°C)	1	0	12	10	7	4
Jährliche Summe der direkten Strahlung [kWh/(m²a)]	532	505	529	538	575	704
Jährliche Summe der diffusen Strahlung [kWh/(m²a)]	542	584	565	572	573	432

Tabelle 2: Vergleich der Wetterdatensätze mit Hilfe ausgewählter Merkmale

Ein Vergleich der Datensätze zeigt, dass der Erfurter Wetterdatensatz für das Jahr 2019 sowohl mit 21,1 °C die höchste Sommerdurchschnittstemperatur als auch mit 24 Tagen die größte Anzahl an heißen Tagen aufweist. Lediglich mit 4 Nächten ist die Anzahl der Tropennächte gegenüber den ortsgenauen Testreferenzjahren (TRY2015 und TRY2045) gering. Das nach Norm anzusetzende Testreferenzjahr „TRY 2010-04-Jahr“ weist mit einer Durchschnittstemperatur im Sommer von 18,1 °C, 5 heißen Tagen und einer Tropennacht die geringsten Werte aller Datensätze auf. Mit Blick auf die ortsgenauen Testreferenzjahre ist festzustellen, dass von den gegenwärtigen zu den zukünftigen Klimabedingungen eine Zunahme der Sommerdurchschnittstemperatur von 18,7 °C um 1,6°C auf 20,3 °C zu verzeichnen ist. Auffällig ist jedoch, dass im Datensatz „TRY2015-Sommer“, der die klimatischen Verhältnisse eines extremen Sommers der Gegenwert beschreibt, mit 13 die Anzahl der heißen Tage und mit 12 die Anzahl der Tropennächte am höchsten ist. Selbst die Werte des projizierten durchschnittlichen Jahres der Zukunft (TRY2045-Jahr) und des projizierten Jahres mit einem extremen Sommer der Zukunft (TRY2045-Sommer) werden damit in diesen Merkmalen übertroffen.

Im Hinblick auf die Solarstrahlung weisen das ortsgenaue TRY-Sommer der Zukunft mit 1147 kWh/(m²a) und der Erfurter Wetterdatensatz für das Jahr 2019 mit 1136 kWh/(m²a) die höchste

solare Strahlung auf. Jedoch ist der Unterschied von 129 kWh/(m²a) in der direkten Strahlung zu beachten. Die anderen Datensätze weisen mit einer Spanne von 1075 bis 1110 kWh/(m²a) ähnliche Solarstrahlungswerte auf.

Der Vergleich verdeutlicht, dass in Abhängigkeit vom gewählten Auswertungskriterium ein anderer Wetterdatensatz die höchste Hitzebelastung aufweisen kann. Für die nachfolgenden Untersuchungen wurde der Erfurter Wetterdatensatz für das Jahr 2019 verwendet. Dieser weist neben der höchsten Sommerdurchschnittstemperatur auch die größte Anzahl an heißen Tagen auf. Die Ergebnisse liegen somit auf der sicheren Seite und sind vor allem für zukünftige Hitzeperioden mit sehr hohen Temperaturen von Bedeutung. Es wird jedoch darauf hingewiesen, dass in dem Datensatz die Temperaturen in der Nacht oft deutlich unter 20 °C sinken, sodass durch Fensterlüftung gezielt zur Nachtauskühlung der Räume beigetragen werden kann.

b) Innere Lasten

Neben den äußeren Wärmeeinträgen, die durch den zuvor beschriebenen Wetterdatensatz charakterisiert werden, sind in einer thermischen Gebäudesimulation auch die inneren Wärmeeinträge durch Personen, Geräte und Beleuchtung zu berücksichtigen. Hierfür wurden in Abhängigkeit von der Raumnutzung verschiedene Lastprofile erstellt, die sowohl die jeweilige Last (Anzahl Personen, Wärmeabgabe von Geräten in Watt) als auch den jeweiligen zeitlichen Verlauf über den Tag beinhalten. Lasten, die infolge der Beleuchtung entstehen, wurden an dieser Stelle vernachlässigt, da angenommen wird, dass die Beleuchtung während der Sommermonate nur geringfügig Anwendung findet. Einen Auszug aus den in Anlage 2 zusammengefassten Lastprofilen ist in nachfolgender Abbildung 9 exemplarisch für das Wohn- und Schlafzimmer dargestellt.

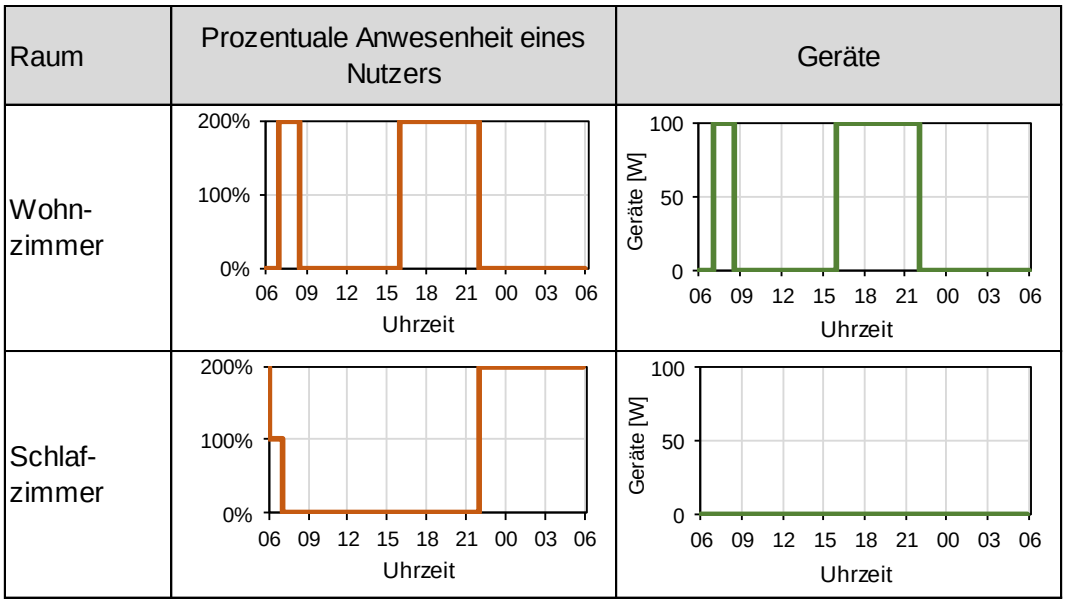


Abbildung 9: Auszug aus den angesetzten inneren Lasten durch Personen und Geräte

Es wird folglich davon ausgegangen, dass sich die Nutzer im Sommer tagsüber nur anteilig im Wohnzimmer aufhalten, sodass in der Zeit von 7.00 Uhr bis 8.30 Uhr bzw. 16.00 Uhr bis 22.00 Uhr insgesamt 100 W innere Wärmeeinträge durch Personen und Geräte angesetzt werden.

Für das Schlafzimmer wird festgelegt, dass sich zwei Personen in der Zeit von 22.00 Uhr bis 6.00 Uhr zu 100 % im Raum aufhalten. Dabei wird sowohl im Schlafzimmer als auch in den anderen Räumen ein

Aktivitätsgrad von 1 met bzw. 1,2 met und ein der Witterungsbedingungen angepasster Bekleidungsgrad angenommen. Innere Wärmelasten, die infolge Geräte entstehen, werden im Schlafzimmer vernachlässigt.

c) Lüftungsverhalten

Neben dem Wetterdatensatz und den inneren Wärmeeinträgen durch Personen und Geräte sind vor allem die Annahmen zum Lüftungsverhalten wichtige Eingangsparameter für eine thermische Gebäudesimulation. Hierfür wurde eine Befragung zum Lüftungsverhalten in den Projektgebieten in Dresden-Gorbitz und in der Erfurter Oststadt durchgeführt. Demnach haben viele Bewohner*innen ein dem sommerlichen Temperaturverlauf angepasstes Lüftungsverhalten, d.h. viele lüften vorwiegend in den frühen Morgen- und/oder Nachtstunden und halten das Fenster tagsüber geschlossen. Aus dieser Befragung wurden die in nachfolgender Abbildung 10 dargestellten Lüftungsprofile abgeleitet und innerhalb der Gebäudesimulation verwendet.

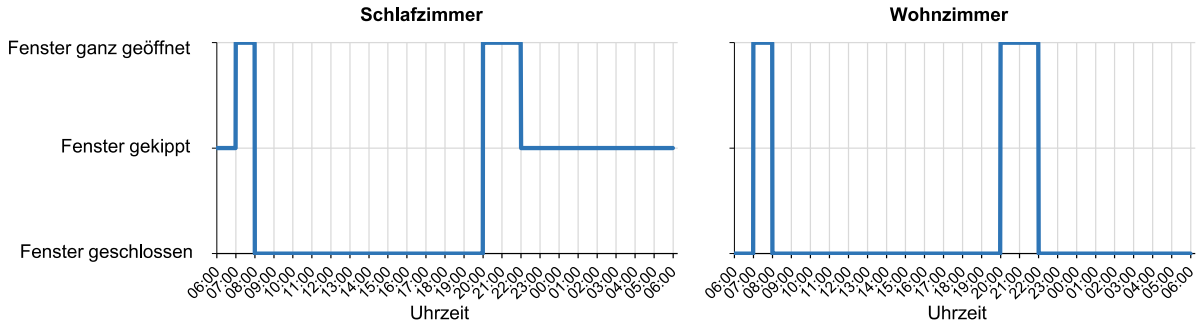


Abbildung 10: Lüftungsverhalten im Schlaf- und Wohnzimmer

Das Fenster wird demnach im Schlaf- und Wohnzimmer von 7:00 Uhr bis 8:00 Uhr und von 20:00 Uhr bis 22:00 Uhr jeweils ganz geöffnet. Des Weiteren wird für das Schlafzimmer zusätzlich angenommen, dass in der Nacht von 22:00 Uhr bis 7:00 Uhr das Fenster gekippt wird. Das oben dargestellte Lüftungsprofil des Schlafzimmers gilt ebenso für die Kinder-, Arbeits- und Badezimmer. Für die Küche wurde das Lüftungsprofil des Wohnzimmers verwendet. Um eine effektive Auskühlung der Räume zu gewährleisten, wurden die Profile außerdem nur dann angesetzt, wenn die Innenraumtemperatur größer ist als die Außenlufttemperatur und die Innenraumtemperatur gleichzeitig eine Temperatur von 23 C überschreitet. Die Innentüren wurden darüber hinaus jeweils geschlossen abgebildet, sodass in den nachfolgenden Untersuchungen keine Querlüftung in Erwägung gezogen wird. Die hier beschriebenen Randbedingungen gelten für jeden Tag eines Jahres, d. h. es werden keine Urlaubszeiten oder Feiertage berücksichtigt und keine Unterscheidung nach Wochentag vorgenommen.

2.3.3 Validierung des Simulationsmodells

Grundlage für die Validierung des Simulationsmodells bilden die vom 6. Juni bis 6. Oktober 2019 durchgeführten Innenraummessungen im Referenzgebäude. Dabei wurden zeitaufgelöst die Innenraumtemperatur, die relative Luftfeuchte und stellenweise der CO_2-Gehalt gemessen. Dementsprechend konnten wichtige Informationen zum thermischen Verhalten des Gebäudes und zum Nutzerverhalten, insbesondere zur Fensterlüftung, gewonnen werden.

Insgesamt wurden in 11 bewohnten Räumen von 4 Wohneinheiten Messungen durchgeführt. Aus datenschutzrechtlichen Gründen wird jedoch an dieser Stelle auf eine raumbezogene Darstellung des Temperaturverlaufs verzichtet und mit Hilfe der nachfolgenden Abbildung 11 bzw. Tabelle 3 ausschließlich ein allgemeiner Überblick über die Ergebnisse gegeben.

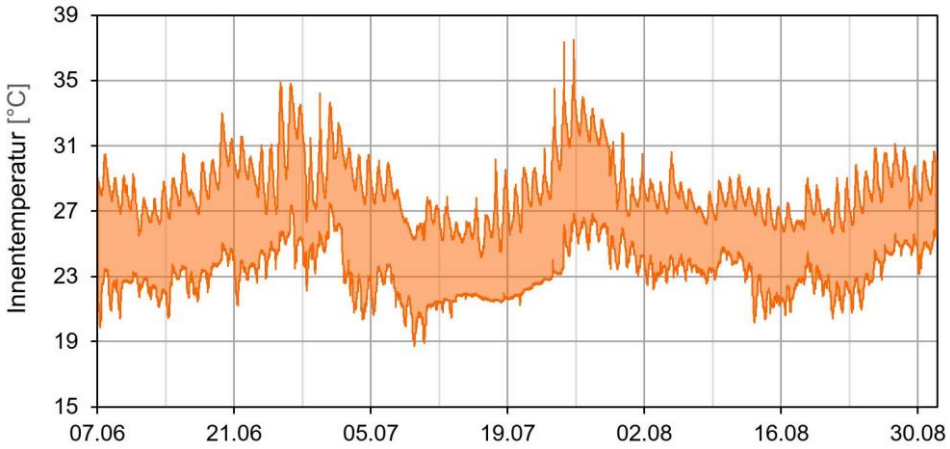


Abbildung 11: Überblick über die Innenraummessungen 2019

Das in Abbildung 11 dargestellte Diagramm zeigt den gemessenen Temperaturbereich mit den im gesamten Gebäude gemessenen minimalen und maximalen Innenraumtemperaturen zur jeweiligen Zeit. Unterschiede von bis zu 11,6 °C zwischen minimalen und maximalen Temperaturwert verdeutlichen, wie unterschiedlich die Hitzebelastung zur gleichen Zeit in dem Gebäude ist. Die nachfolgende Tabelle 3 zeigt darüber hinaus die gemessenen maximalen Innenraumtemperaturen sowie die in Anlehnung an die Norm DIN 4108-2:2013-02 (DIN Deutsches Institut für Normung, 2013) berechneten Übertemperaturgradstunden zur Bezugstemperatur von 26 °C.

Ebene / Wohneinheit	**Maximaltemperatur**		**Übertemperaturgradstunden**	
	Fensterorientierung: **West**	Fensterorientierung: **Ost**	Fensterorientierung: **West**	Fensterorientierung: **Ost**
5. Ebene / WE8	31,8 °C	30,7 °C	2.847 Kh	1.802 Kh
5. Ebene / WE7	37,5 °C	30,7 °C	3.597 Kh	1.169 Kh
4. Ebene / WE6	30,3 °C	29,4 °C	391 Kh	311 Kh
2. Ebene / WE2	30,1 °C	29,8 °C	223 Kh	429 Kh
1. Ebene / WE2	28,1 °C	28,1 °C	51 Kh	292 Kh

Tabelle 3: Ergebnis der Auswertung der Innenraummessungen 2019 (Die 37,5 °C in der WE 7 sind ein singuläres Ereignis verursacht durch Fensterlüftung in den frühen Abendstunden in denen außen noch knapp 40 °C vorlagen. Außerhalb dieses auf das Bewohnerverhalten zurückzuführende singuläre Ereignisses lag die maximale Innenraumtemperatur bei 35 °C)

Im gesamten Messzeitraum wurden in den Räumen Maximaltemperaturen von 28,1 °C bis 35 °C gemessen. Zudem ergibt sich bei der Ermittlung der Übertemperaturgradstunden ein Wertebereich von 51 – 3597 Kh. Bezogen auf die gesamte Sommerperiode verdeutlicht dieser große Bereich ebenfalls die unterschiedliche Hitzebelastung in dem Gebäude. Die höchste Hitzebelastung tritt dabei in den Räumen der beiden Dachgeschosswohnungen auf.

Ziel der Validierung war das Nachbilden der im Sommer 2019 gemessenen Innenraumtemperaturen mit Hilfe der thermischen Gebäudesimulation. Dazu wurde in einem ersten Schritt der Wetterdatensatz für die Erfurter Oststadt für das Jahr 2019 im Simulationsprogramm eingespielt. Im Anschluss wurden die Tage im Messzeitraum untersucht, in denen die Bewohner*innen des Referenzgebäudes abwesend, d. h. im Urlaub, waren. Somit konnte das thermische Verhalten des Gebäudes ohne Einfluss des Nutzers analysiert werden. Durch eine iterative Anpassung von einer Vielzahl an Randbedingungen (u. a.

Bauphysik, Türöffnungen, Sonnenschutz, innere Dauerlasten, Fensteröffnung) konnten die gemessenen Temperaturverläufe im Ergebnis qualitativ gut nachgebildet werden (Schünemann, Schiela, & Ortlepp, The complexity of realistic overheating assessment by thermal building simulation - revealing the user influence, 2020).

In einem zweiten Schritt wurden die gemessenen und simulierten Innenraumtemperaturen bei Anwesenheit der Bewohner*innen abgeglichen. Auch hier konnten durch iterative Anpassung des Nutzerverhaltens die gemessenen Temperaturverläufe qualitativ gut abgebildet werden. Dabei wurde insbesondere das Lüftungsverhalten und der Einsatz von Verschattungen (Markise Dachgeschoss, Innenliegender Sonnenschutz Ostfassade) in mehreren Simulationsvarianten vertieft untersucht (Schünemann, Schiela, & Ortlepp, The complexity of realistic overheating assessment by thermal building simulation - revealing the user influence, 2020).

2.3.4 Ergebnisse der Simulationsrechnungen

Nach der Implementierung der in den vorangegangen Abschnitten beschriebenen Randbedingungen wurde die operative Innenraumtemperatur für jeden Raum des Mehrfamilienhauses mit Hilfe der thermischen Gebäudesimulation berechnet. Anschließend wurde der Temperaturverlauf anhand der in Abschnitt 2.3.1 dargestellten Kriterien ausgewertet und der sommerliche Wärmeschutz entsprechend bewertet. Eine Auswahl der in Anlage 3 zusammengestellten Ergebnisse ist in nachfolgender Abbildung 12 dargestellt. Dabei handelt es sich um ausgewählte Räume, die sich in unterschiedlichen Ebenen des Gebäudes befinden und unterschiedliche Fensterorientierungen aufweisen.

IST-Zustand (Ost)		Maximalwert operative Temperatur	Übertemperatur-gradstunden	Überschreitungs-häufigkeit		
				26°C	28°C	30°C
Ebene / Wohneinheit	Raum	[°C]	[Kh]	[%]	[%]	[%]
5 / WE8	SchlaZi	31.4	1833	32%	13%	4%
4 / WE6	SchlaZi	30.1	1183	25%	8%	1%
3 / WE4	SchlaZi	29.3	507	13%	3%	0%
2 / WE2	KinZi	27.6	166	7%	0%	0%
1 / WE2	ArbZi	29.6	508	15%	3%	0%

IST-Zustand (West)		Maximalwert operative Temperatur	Übertemperatur-gradstunden	Überschreitungs-häufigkeit		
				26°C	28°C	30°C
Ebene / Wohneinheit	Raum	[°C]	[Kh]	[%]	[%]	[%]
5 / WE8	WoKü	34.1	2690	40%	18%	7%
4 / WE6	WoKü	30.1	981	20%	8%	0%
3 / WE4	WoKü	28.8	475	13%	2%	0%
2 / WE2	SchlaZi	27.9	240	9%	0%	0%
1 / WE2	WoZi	25.8	0	0%	0%	0%

Abbildung 12: Sommerlicher Wärmeschutz im IST-Zustand

Im Allgemeinen ist festzustellen, dass im aktuellen IST-Zustand die Hitzebelastung mit der Gebäudehöhe zunimmt. So beträgt die Differenz zwischen Ebene 5 und Ebene 1 in der maximalen operativen Temperatur 1,8 K im Osten bzw. 8,3 K im Westen und in den Übertemperaturgradstunden 1325 Kh im Osten bzw. 2690 Kh im Westen. Die Differenz der Überschreitungshäufigkeit (26 °C) ergibt sich zu 17 % im Osten und zu 40 % im Westen. Dementsprechend ist zu verzeichnen, dass der Unterschied in der Hitzebelastung für die Westseite größer ist als für die Ostseite. Die nach Westen orientierte Wohnküche

der Wohneinheit 8 weist dabei mit einer Maximaltemperatur von 34,1 °C, 2690 Kh Übertemperaturgradstunden und einer Überschreitungshäufigkeit (26 °C) von 40 % die höchste Hitzebelastung auf. Auch das Schlafzimmer der Wohneinheit 8 an der Ostfassade ist durch eine hohe Hitzebelastung mit 31,4 °C, 1833 Kh und 32 % (26 °C) geprägt. Neben den Räumen im Dachgeschoss weisen die Räume in der vierten Ebene (Vollgeschoss) ebenso mit 30,1°C und mit 1183 Kh bzw. 981 Kh vergleichsweise hohe Werte auf. Dies ist durch die Wärmeeinträge vom Dachgeschoss durch die Geschossdecke in die Räume der vierten Gebäudeebene bedingt. Dringender Handlungsbedarf zur Optimierung des sommerlichen Wärmeschutzes besteht somit für die westlichen und östlichen Räume des Dachgeschosses und teilweise auch für die der vierten Gebäudeebene. In den Räumen der Ebenen 1 bis 3 treten im Vergleich dazu keine nennenswerten Maximaltemperaturen, Übertemperaturgradstunden sowie Überschreitungshäufigkeiten auf. Auffällig sind jedoch die Übertemperaturgradstunden des östlichen Arbeitszimmers mit 508 Kh. Diese sind damit begründet, dass dieser Raum eine geringe Nutzfläche und gleichzeitig eine hohe Fensterfläche hat.

3 Entwicklung von Anpassungsmaßnahmen

3.1 Vorbemerkungen

Die Entwicklung von konkreten Hitzeanpassungsmaßnahmen für das Wohngebäude in der Rathenaustraße 15 basiert auf den 4 Anpassungsstrategien, die im Wissenschaftlichen Konzept zur Optimierung des sommerlichen Wärmeschutzes im Gebäudebestand der Eisenbahner-Wohnungsbaugenossenschaft Dresden eG definiert wurden. Dabei handelt es um (A) Minderung der Wärmeeinträge, (B) Optimierung der Wärmespeicherfähigkeit, (C) Optimierung der Lüftung und (D) Kühlung. Wie in Abschnitt 1.1 bereits beschrieben, sind für das ausgewählte Wohngebäude aktuell keine Sanierungs- bzw. Modernisierungsmaßnahmen vorgesehen. Auf eine Verbesserung des winterlichen Wärmeschutzes wird somit an dieser Stelle verzichtet (Energieeinsparverordnung, 2015). Im Folgenden wird der Fokus ausschließlich auf Maßnahmen dieser vier Anpassungsstrategien gelegt.

Bei der Planung ist zu beachten, dass die Maßnahmen nur dann ihre Wirkungen entfalten können, wenn die Bewohner*innen diese akzeptieren, korrekt anwenden und ein dem sommerlichen Temperaturverlauf angepasstes Lüftungsverhalten haben (Schiela & Schünemann, 2020). Zur Berücksichtigung der Nutzerakzeptanz von gebäudebezogenen Hitzeanpassungsmaßnahmen wurden vom Institut für Stadtforschung, Planung und Kommunikation der Fachhochschule Erfurt (ISP) Befragungen in der Sommerperiode 2018 in der Erfurter Oststadt durchgeführt. Ein wichtiger Bestandteil der Befragung war u. a. die Frage, welche Maßnahmen an und in Wohngebäuden die Teilnehmer*innen für sinnvoll halten. Die nachfolgende Abbildung 13 zeigt dazu eine Priorisierung von ausgewählten Maßnahmen.

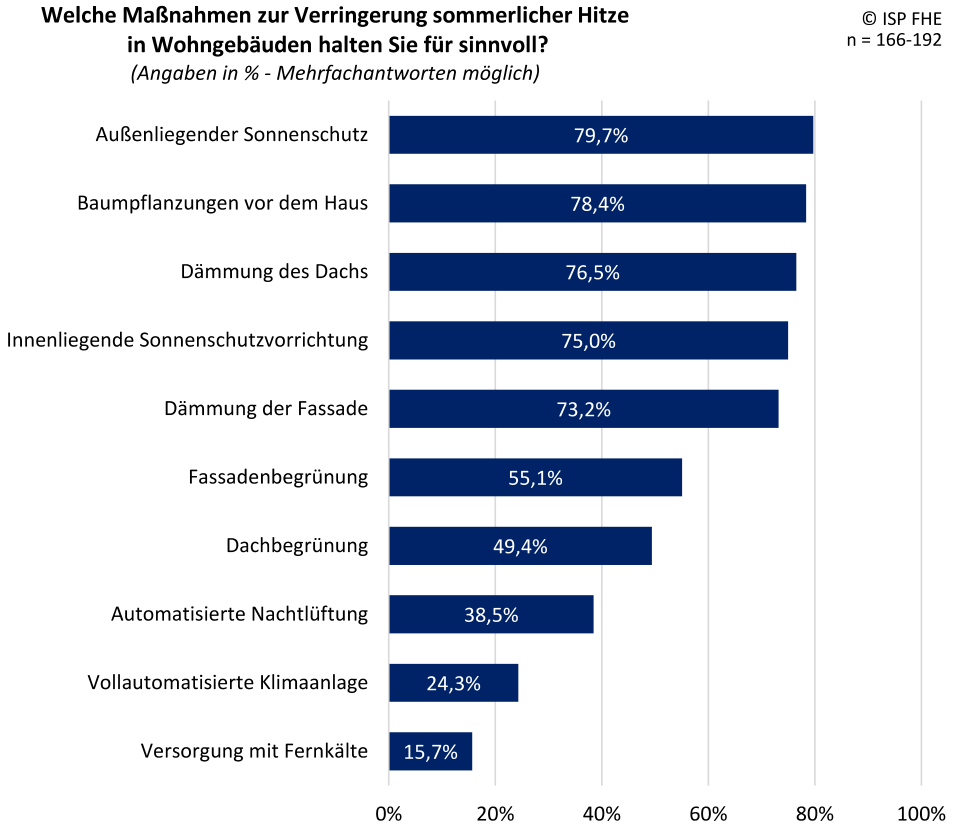


Abbildung 13: Auszug aus den Befragungsergebnissen (Sinning & Baldin, 2019)

3.2 Strategie A: Minderung der Wärmeeinträge

3.2.1 Allgemeines

Um die äußeren Wärmeeinträge ins Gebäudeinnere, insbesondere in das Dachgeschoss und in die 4. Gebäudeebene, zu mindern, wurde eine Recherche von in der Praxis gängigen Sonnenschutzsystemen durchgeführt. Im Anschluss erfolgte ein Vergleich von verschiedenen Systemen und die Auswahl von konkreten Sonnenschutzvorrichtungen, die an und in dem Referenzgebäude umgesetzt werden können. Die nachfolgende Abbildung 14 zeigt eine allgemeine Auswahl an möglichen Sonnenschutzmaßnahmen.

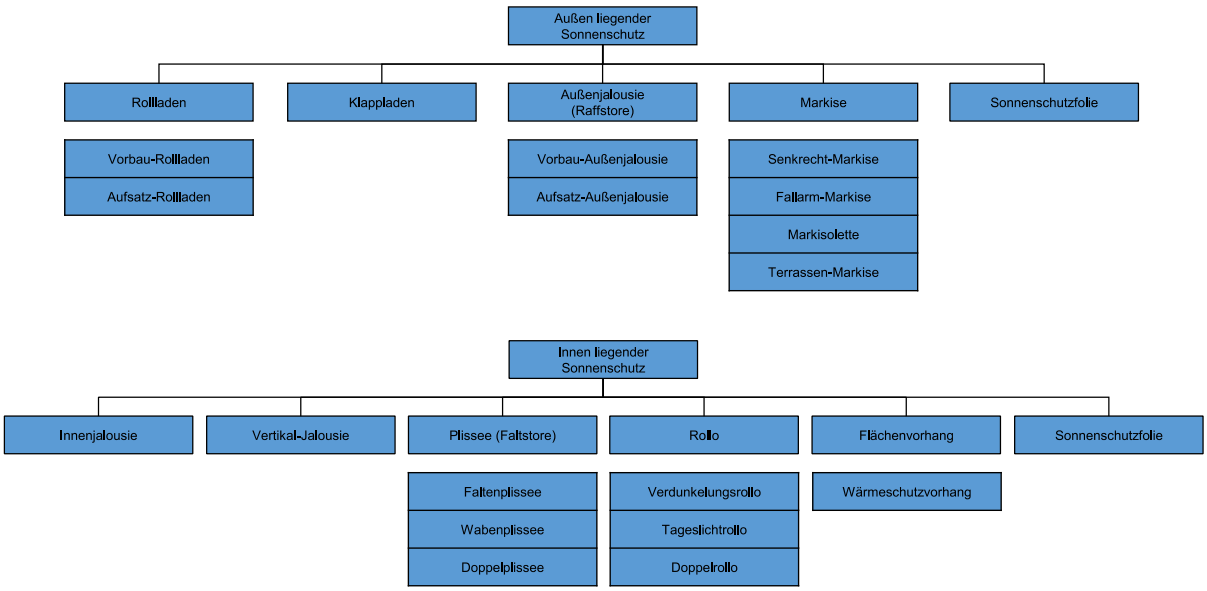


Abbildung 14: Übersicht über außen und innen liegende Sonnenschutzsysteme

3.2.2 Sonnenschutz der Dachflächenfenster

Die Dachflächenfenster in den Dachschrägen der Galerien in den Wohneinheiten 7 und 8 weisen eine Neigung von ca. 35° gegenüber der Horizontalen auf und sind in Richtung Westen ausgerichtet. Die Fensterkonstruktionen haben eine Breite von 78 cm und eine Höhe von 1,18 m (Außenmaße Blendrahmen). Nach (Velux, 2020) können die Dachflächenfenster somit der Größe MK 06 zugeordnet werden. Die Fenster sind aus Holz gefertigt, besitzen eine 2-Scheibenverglasung und können ausschließlich manuell geöffnet werden. Im aktuellen IST-Zustand ist kein außen und kein innen liegender Sonnenschutz vorhanden. Für die Fenster besteht somit grundsätzlich die Möglichkeit der nachträglichen Anordnung von Rollläden, Hitzeschutz-Markisen oder innen liegenden Verschattungen.

Für die Minderung der Wärmeeinträge durch die Dachflächenfenster wird konkret ein solarbetriebener Rollladen (z. B. VELUX INTEGRA Solar-Rollladen SSL) empfohlen. Dieses System bietet den Vorteil, dass es kabellos an dem vorhandenen Fenster montiert werden kann. Zudem weisen Rollläden im Vergleich zu Hitzeschutz-Markisen eine geringere Windanfälligkeit auf. Zusätzlich können Ausstellarme zwischen Fensterrahmen und Rollladen angebracht werden. Diese haben den Vorteil, dass ein Lichteinfall bei geschlossenem Rollladen und geschlossenem Fenster gewährleistet werden kann. Darüber hinaus kann das Fenster bei geschlossenem Rollladen geöffnet werden. Somit wird mit Hilfe der Ausstellarme zusätzlich zum Lichteinfall auch ein Luftwechsel sichergestellt. Ein Beispiel für einen solarbetriebenen Rollladen ist in nachfolgender Abbildung 15 dargestellt.

Bildquelle: https://www.velux.de/produkte/sonnenschutz-und-rolladen/rolladen-aussenrollo-aussenjalousie, eingesehen am 29.07.2020

Abbildung 15: Beispiel eines solarbetriebenen Rollladens für die westlichen Dachflächenfenster

Der Einsatz von innen liegenden Verschattungen wird für die Dachflächenfenster nur bedingt empfohlen, da die Wirksamkeit während Hitzeperioden geringer ist. Innen liegende Systeme geben die aufgenommene Wärme an die Raumluft ab, was in der Regel zum Ansteigen der Temperaturen im Gebäudeinneren führt.

3.2.3 Sonnenschutz der straßen- (Ost) und hofseitigen (West) Fenster

Die in der östlichen und westlichen Fassade integrierten Fenster, für die ein Sonnenschutz zur Reduzierung der Hitzebelastung vorteilhaft ist, weisen folgende Eigenschaften auf:

Eigenschaft	Fenstertyp A	Fenstertyp B	Fenstertyp C	Fenstertyp D
Orientierung	Ost	Ost	Ost	West
Fensterhöhe Außen [m]	1,80	1,80	1,00	ca. 2,10
Fensterbreite Außen [m]	1,30	0,90	0,90	2,20
Laibungstiefe Außen [cm]	ca. 10	ca. 10	0	0

Tabelle 4: Eigenschaften von ausgewählten Fenstern

Im aktuellen IST-Zustand sind an den östlichen Dachgeschossfenstern der Schleppgauben und der Giebelgaube (Fenstertyp C) zum Teil innenseitig Jalousien angeordnet. Des Weiteren sind an den östlichen Fenstern der Ebene 4 (Fenstertyp A und B) vereinzelt Vorhänge vorzufinden. Darüber hinaus ist an dem kleinen Fenster der Ebene 4 (Fenstertyp B) bereits ein Klappladen vorhanden. Eine nachträgliche Anordnung weiterer Klappläden an den anderen Fenstertypen wird an dieser Stelle nicht empfohlen, da das historische Erscheinungsbild der Fassade sonst zu stark verändert wird. Zudem sind in der Fassade Vor- und Rücksprünge ausgebildet, die eine vollständige Öffnung der Klappläden nicht ermöglichen würden.

An den westlichen Fenstertüren des Dachgeschosses sind im Bereich der Balkone bereits Terrassenmarkisen, die von den Mieter*innen manuell gesteuert werden können, angeordnet. Aufgrund der hohen Windanfälligkeit können diese jedoch nur dann eingesetzt werden, wenn die Bewohner*innen in ihrer Wohnung anwesend sind. Es zeigte sich, wie in Abschnitt 2.1 beschrieben, dass für diese Fenster an Sommertagen mit hoher Solarstrahlung jedoch bereits ab ca. 13.00 Uhr eine Verschattung erforderlich ist, sodass hier alternative Systeme in Betracht gezogen werden müssen.

Für die oben aufgeführten Fenstertypen besteht somit die Möglichkeit der nachträglichen Anordnung von Rollläden, Raffstores, Markisen oder innen liegenden Verschattungen. Bei der Realisierung von außen liegenden Verschattungsvorrichtungen, insbesondere an der Ostfassade, ist im Allgemeinen zu beachten, dass der jeweilige Kasten mit den sichtbaren Blenden vor dem Fenster die Fensterhöhe ändert und somit die Fassade in der Gestalt leicht verändert wird. Dementsprechend muss eine Konstruktion ausgewählt werden, die eine möglichst schlanke Form hat. Zudem sind bei allen Systemen die Windanfälligkeit und die Steuerungsmöglichkeiten zu berücksichtigen. Ein Vergleich von möglichen Systemen ist in Anlage 4 zusammengestellt.

Im Ergebnis ist festzuhalten, dass für eine nachträglich angeordnete außen liegende Verschattung der östlichen Fenster eine Vorbau-Markise mit Motor und integrierten Windwächter empfohlen wird, da hiermit die geringsten Konstruktionshöhen erreicht werden können und das Erscheinungsbild der Fassade nur dezent verändert wird. Ein Beispiel für eine Senkrechtmarkise ist in Abbildung 16 dargestellt. Zu beachten ist jedoch, dass für die Montage der Markisen ein straßenseitiges Gerüst sowie eine Baugenehmigung erforderlich sind, sodass in den nachfolgenden Untersuchungen alternativ auch eine hochreflektierende innen liegende Verschattung in Form eines Rollos mit seitlichen Führungsschienen in Betracht gezogen wird. Für die westlichen Fenster der Dachgauben (Fenstertyp D) wird im Vergleich zu den östlichen Fenstern ein Vorbau-Rollladen für die gesamte Fläche der jeweils zwei Balkontüren empfohlen. Dieser kann vom Balkon aus montiert werden und weist trotz der großen Fläche im Vergleich zu Raffstore-Systemen und Markisen eine hohe Windbelastbarkeit auf.

Bildquelle: https://denkmal-sonnenschutz.de/, eingesehen am 29.07.2020

Abbildung 16: Beispiel einer Senkrecht-Markise für die östlichen Fenster

3.3 Strategie C: Optimierung des Luftwechsels

Zur Optimierung des sommerlichen Wärmeschutzes des Mehrfamilienhauses in der Rathenaustraße 15 wurden mit den Projektpartnern weiterhin Möglichkeiten zur Optimierung des Luftwechsels (Strategie C) diskutiert. Hierzu wurde insbesondere der nachträgliche Einbau von Abluftanlagen in den Badezimmern der zwei Dachgeschosswohnungen untersucht, um den nächtlichen Luftwechsel und somit die Nachtauskühlung im Dachgeschoss zu unterstützen. Für eine vertiefte Wirksamkeitsprüfung wurden die folgenden zwei Varianten festgelegt:

1. Luftwechsel von 1 h^{-1}: Auslegung der Lüftungsanlage auf 240 m^3/h
2. Luftwechsel von 2 h^{-1}: Auslegung der Lüftungsanlage auf 480 m^3/h

Es wird empfohlen die Anlagen automatisch und somit nutzerunabhängig zu steuern, wenn die Innenlufttemperatur größer ist als die Außenlufttemperatur und gleichzeitig die Innenlufttemperatur eine Grenztemperatur von 24 °C überschreitet, sodass eine effektive Auskühlung der Räume erfolgen kann.

Durch die Abluftanlagen wird kühle Außenluft durch geöffnete Fenster angesaugt. Die Außenluft bzw. Abluft strömt dann von den einzelnen Räumen durch Türschlitze zwischen Türblatt und Fußboden zur Abluftanlage im Badezimmer und wird dort über das Dach abgeführt.

3.4 Weitere Anpassungsmaßnahmen

Neben den Sonnenschutzmaßnahmen und den Maßnahmen zur Optimierung des Luftwechsels können für das Gründerzeit-Gebäude durchaus weitere Hitzeanpassungsmaßnahmen in Betracht gezogen werden. Jedoch sind viele dieser Maßnahmen oftmals nur mit einem erheblichen Eingriff in die Gebäudestruktur und somit mit einem hohen Kostenaufwand verbunden, sodass eine Umsetzung dieser Maßnahmen für die Eigentümer aktuell keinen Mehrwert erzielt.

Eine Erneuerung der Fenster, um zum Beispiel den Energiedurchlassgrad der Fensterverglasung zu reduzieren, wäre mit einem unverhältnismäßigen Aufwand verbunden. So müssten beispielsweise Genehmigungen eingeholt und Fenster ggf. nach historischem Vorbild nachgebaut werden. Zudem würden Fenster mit niedrigerem Energiedurchlassgrad in Kombination mit einem Sonnenschutzsystem erfahrungsgemäß auch nur eine sehr geringe zusätzliche Wirkung im Gebäude entfalten. Eine Dachbegrünung ist aus statischen und denkmalschutzrechtlichen Gründen nicht umsetzbar.

Eine Umsetzung von Maßnahmen der Strategie B „Optimierung der Wärmespeicherfähigkeit“ wäre innerhalb des Verbundforschungsprojektes ebenfalls zeitlich nicht realisierbar. Jedoch besteht grundsätzlich die Möglichkeit die im Dachgeschoss vorhandenen Trockenbauwände mit Gipskartonplatten zu verkleiden, in welchen PCM (Phase Change Materials) als Zuschlagsstoff eingebunden sind. Durch Phasenverschiebung speichern die Latentwärmespeicher bei steigenden Innenraumtemperaturen die Wärme und geben diese dann bei kühleren Temperaturen wieder an die Raumluft ab.

In der Anpassungsstrategie zur Kühlung (Strategie D) fanden Überlegungen über den Einsatz von Klima-Splitgeräten zur aktiven Kühlung der Dachgeschosswohnungen statt. Ein Klima-Splitgerät besteht in der Regel aus einer Außeneinheit, die mit bis zu 3 Innengeräten kombiniert werden kann. Bei dem Mehrfamilienhaus in der Rathenaustraße 15 besteht die Herausforderung darin, zwei Außeneinheiten für die Wohneinheiten 7 und 8 zu montieren. Möglichkeiten bestehen an den Balkonen, an der westlichen Fassade des Treppenhauses oder im Dachbereich. Bei der Planung ist insbesondere die leichte Zugänglichkeit für Installation und Wartung sowie der Schutz der Außeneinheiten vor direkter Sonneneinstrahlung zu beachten. Aufgrund der Lärmbelästigung, dem hohen Aufwand für die Installation der Leitungen im Dachgeschoss und des hohen Energiebedarfs während der Nutzung wird die Maßnahme nicht empfohlen. Zudem haben die Außeneinheiten der Klima-Splitgeräte einen negativen Einfluss aus das kleinklimatische Stadtklima, da die Abwärme der Klimaanlagen die unmittelbare Umgebung zusätzlich erwärmt.

3.5 Finale Anpassungsmaßnahmen

Die in den vorangegangenen Abschnitten empfohlenen Anpassungsmaßnahmen zur Optimierung des sommerlichen Wärmeschutzes sind in nachfolgender Tabelle 5 zusammengefasst. Im Projektverlauf konnte jedoch die Umsetzung keiner der vorgeschlagenen Maßnahmenvarianten von der Eigentümerversammlung beschlossen werden, da kein Konsens herbeigeführt werden konnte. Deshalb wurde beschlossen, den Eigentümer*innen ein angepasstes Maßnahmenportfolio vorzustellen, welches ausschließlich die Umsetzung von Anpassungsmaßnahmen zum sommerlichen Wärmeschutz im Dachgeschoss beinhaltet, da dieses deutlich stärker von der Hitzebelastung betroffen ist als die darunterliegenden Vollgeschosse. Die Änderungen des Maßnahmenportfolios sind in Tabelle 5 gekennzeichnet.

Bezeichnung	Maßnahmenstrategie	Konkrete Maßnahme
A.1	Minderung der Wärmeeinträge	• Außen liegende Verschattungen • Östliche Fenster: Anbau von Markisen (Dachgeschoss ~~und 4. Gebäudeebene~~) • Westliche Fenster: Anbau von Rollläden (Dachflächenfenster und Balkontüren) • Nutzerakzeptanz: 79,7 %
A.2		• Außen und innen liegende Verschattungen • Östliche Fenster: Anbau von innen liegenden Rollos (Dachgeschoss ~~und 4. Gebäudeebene~~) • Westliche Fenster: Anbau von Rollläden (Dachflächenfenster und Balkontüren) • Nutzerakzeptanz: 75 % bzw. 79,7 %
C.1	Optimierung des Luftwechsels	• Sicherstellen eines Luftwechsels von 1 h^{-1} im Dachgeschoss: Auslegung der Abluftanlagen auf 240 m³/h
C.2		• Sicherstellen eines Luftwechsels von 2 h^{-1} im Dachgeschoss: Auslegung der Abluftanlagen auf 480 m³/h

Tabelle 5: Darstellung des finalen Maßnahmenportfolios

In einer erneuten Eigentümerversammlung im Juli 2020 konnte auch die Umsetzung des angepassten Maßnahmenportfolios aufgrund mangelnder Stimmfähigkeit nicht beschlossen werden. Eine Umsetzung und messtechnische Wirksamkeitsprüfung der vorgeschlagenen Maßnahmen konnte somit in der Projektlaufzeit nicht realisiert werden. Jedoch wurden die Mieter*innen des Gebäudes über die Ergebnisse informiert und eine Nutzerschulung zum Thema Lüftungsverhalten im Hinterhof des Referenzgebäudes durchgeführt. Die Teilnahme fast aller Wohneinheiten zeigte dabei das große Interesse an das Thema Hitze und mögliche Anpassungsoptionen.

4 Analyse der Wirksamkeit ausgewählter Anpassungsmaßnahmen

Die für die zwei Dachgeschosswohnungen in Tabelle 5 zusammengestellten Maßnahmen wurden für eine Wirksamkeitsprüfung im Simulationsmodell implementiert. Die Analyse der Wirksamkeit erfolgt nachfolgend beispielhaft für das nach Osten orientierte Schlafzimmer (Abbildung 17) und für die nach Westen orientierte Wohnküche (Abbildung 18) der Wohneinheit 8. Die Ergebnisse für die Wohneinheit 7 sind aufgrund der annähernd gleichen Raumstruktur nahezu identisch. Um zusätzlich die Auswirkungen der im Dachgeschoss angesetzten Maßnahmen auf die 4. Gebäudeebene aufzuzeigen, sind diese Ergebnisse ergänzend in der Anlage 5 aufgeführt.

Schlafzimmer Wohneinheit 8 (Ebene 5)		Maximalwert operative Temperatur	Übertemperatur-gradstunden	Überschreitungs-häufigkeit		
Orientierung der Fenster: Ost				26°C	28°C	30°C
Art der Maßnahme		[°C]	[Kh]	[%]	[%]	[%]
0	IST-Zustand	31.4	1833	32%	13%	4%
A.1	Außen liegender Sonnenschutz für die östlichen und westlichen Fenster des Dachgeschosses	29.5	590	14%	4%	0%
A.2	Innen liegender Sonnenschutz für die östlichen und außen liegender Sonnenschutz für die westlichen Fenster des Dachgeschosses	29.9	843	20%	6%	0%
C.1	Abluftanlage Dachgeschoss (1-facher Luftwechsel, 240 m³/h ab 23°C)	30.7	829	17%	6%	1%
C.2	Abluftanlage Dachgeschoss (2-facher Luftwechsel, 480 m³/h ab 23°C)	29.9	420	10%	3%	0%
A.2 + C1	Kombination A.2 und C.1	29.2	376	10%	3%	0%
A.2 + C2	Kombination A.2 und C.2	28.7	183	6%	1%	0%

Abbildung 17: Wirksamkeit von Einzelmaßnahmen und ausgewählten Maßnahmenkombinationen - Schlafzimmer Wohneinheit 8

Durch die an allen Fenstern des Dachgeschosses angesetzten außen liegenden Verschattungen (Maßnahmenpaket A.1) konnten im Schlafzimmer die Übertemperaturgradstunden gegenüber dem IST-Zustand um 1243 Kh (32 % vom IST-Zustand) und die Überschreitungshäufigkeit zur Bezugstemperatur 26 °C um 18 % reduziert werden. Eine Verringerung der Hitzebelastung ist ebenso mit dem Maßnahmenpaket A.2 zu verzeichnen. Jedoch sind im Vergleich zum Maßnahmenpaket A.1 die Übertemperaturgradstunden um 253 Kh (46 % vom IST-Zustand) und die Überschreitungshäufigkeit (26 °C) um 6 % geringfügig höher. Innenraumtemperaturen von über 28 °C treten zu 9 % bzw. 7 % in der Zeit von Juni bis September weniger auf - Innenraumtemperaturen von über 30 °C kommen in beiden Maßnahmenvarianten nicht mehr vor. Angenommen wurde dabei, dass alle Verschattungen dauerhaft geschlossen sind und zu keiner Zeit geöffnet werden. Im Hinblick auf den sommerlichen Wärmeschutz wird damit die höchste Wirksamkeit der Maßnahme erreicht.

Die Maßnahmen der Strategie C zeigen auf, dass eine Abluftanlage, die einen 2-fachen Luftwechsel sicherstellt, in der Einzelfallbetrachtung effizienter ist als eine Abluftanlage mit einem 1-fachen Luftwechsel. Zwischen den zwei Varianten treten Unterschiede in den Übertemperaturgradstunden von 409 Kh und in der Überschreitungshäufigkeit (26 °C) von 7 % auf. Gegenüber dem aktuellen IST-Zustand konnten die Übertemperaturgradstunden auf 45 % bzw. 23 % gesenkt werden.

Eine Kombination aus Maßnahmenpaket A.2 und C.1 bewirkt bezogen auf den IST-Zustand eine Reduktion der Übertemperaturgradstunden auf 21 %. Auch die Maximaltemperatur und die Überschreitungshäufigkeit (26 °C) verringern sind um 2,2 °C bzw. 22 %. Bei Ansetzen des höheren Luftwechsels in Kombination mit Maßnahmenpaket A.2 nimmt die Hitzebelastung weiter ab. Verglichen mit dem IST-Zustand konnten die Übertemperaturgradstunden auf 10 % und somit nochmals um etwa 11 % reduziert werden. Innenraumtemperaturen über 28 °C bzw. über 30 °C treten in beiden Kombinationen nur noch geringfügig bzw. gar nicht auf.

Auf eine Kombination mit der Einzelmaßnahme A.1 wurde an dieser Stelle verzichtet, da eine Umsetzung dieser Maßnahme innerhalb der Projektlaufzeit an diesem Referenzgebäude nicht realisierbar ist. Der Maßnahmenvorschlag A.1 wurde von den Eigentümerinnen und Eigentümern des Gebäudes zeitnah im Planungsprozess abgelehnt, da hierfür zeit- und kostenintensive Baugenehmigungen und ein straßenseitiges Gerüst erforderlich wären. In diesem Konzept wird somit der Fokus auf die anderen Maßnahmen gelegt.

Wohnküche Wohneinheit 8 (Ebene 5)		Maximalwert operative Temperatur	Übertemperatur-gradstunden	Überschreitungs-häufigkeit		
Orientierung der Fenster: West				26°C	28°C	30°C
Art der Maßnahme		[°C]	[Kh]	[%]	[%]	[%]
0	IST-Zustand	34.1	2690	40%	18%	7%
A.1	Außen liegender Sonnenschutz für die östlichen und westlichen Fenster des Dachgeschosses	29.7	631	15%	4%	0%
A.2	Innen liegender Sonnenschutz für die östlichen und außen liegender Sonnenschutz für die westlichen Fenster des Dachgeschosses	29.9	689	16%	5%	0%
C.1	Abluftanlage Dachgeschoss (1-facher Luftwechsel, 240 m³/h ab 23°C)	33.5	1794	29%	13%	4%
C.2	Abluftanlage Dachgeschoss (2-facher Luftwechsel, 480 m³/h ab 23°C)	32.9	1234	22%	8%	3%
A.2 + C1	Kombination A.2 und C.1	30.1	610	14%	4%	0%
A.2 + C2	Kombination A.2 und C.2	29.7	395	10%	3%	0%

Abbildung 18: Wirksamkeit von Einzelmaßnahmen und ausgewählten Maßnahmenkombinationen - Wohnküche Wohneinheit 8

Für die nach Westen orientierte Wohnküche gelten grundsätzlich die gleichen qualitativen Aussagen wie für das Schlafzimmer. Jedoch ist die Wirksamkeit der Hitzeanpassungsmaßnahmen höher. So konnten mit Maßnahmenpaket A.1 (außen liegende Verschattungen an allen Fenstern des Dachgeschosses) die Übertemperaturgradstunden auf 23 % und mit dem Maßnahmenpaket A.2 (außen liegende Verschattungen im Westen und innen liegende Verschattungen im Osten) auf 26 % vom IST-Zustand reduziert werden. Die Überschreitungshäufigkeit zur Bezugstemperatur 26 °C verringert sich um 25% bzw. 14 % vom IST-Zustand. Innenraumtemperaturen von über 28 °C treten zu 14 % bzw. 13 % weniger auf, eine Temperatur von über 30 °C wird in der Wohnküche ebenfalls zu keiner Zeit mehr überschritten.

Durch die zwei Maßnahmen der Strategie 3 konnten die Übertemperaturgradstunden auf 67 % und 46 % vom IST-Zustand gesenkt werden. Darüber hinaus treten jedoch in beiden Varianten weiterhin Innenraumtemperaturen von über 30 °C auf. Im Vergleich zu den Maßnahmen der Strategie 1 ist die Wirksamkeit der beiden Varianten somit als nicht ausreichend einzustufen, sodass diese mit weiteren Maßnahmen kombiniert werden müssen, um eine angemessene Wirkung zu erzielen.

Im Unterschied zum IST-Zustand wird mit den zwei Maßnahmenkombinationen eine Reduktion der Übertemperaturgradstunden auf 23 % und 15 % erreicht. Innenraumtemperaturen von über 30 °C treten nicht mehr auf. Weiterhin konnten die Maximaltemperaturen um 4 °C bzw. 4,4 °C und die Überschreitungshäufigkeit (26 °C) um 26 % bzw. 30 % gesenkt werden.

5 Zusammenfassung

Bei dem im Beispielquartier Erfurter Oststadt ausgewählten Gebäude handelt es sich um ein gründerzeitliches Mehrfamilienhaus, welches im Jahr 1912 errichtet wurde und über insgesamt 8 Wohneinheiten verfügt. Das Wohngebäude erhebt sich über einen annähernd quadratischen Grundriss auf insgesamt 6 Ebenen und ist zudem vollständig unterkellert. Die Geschosse sind dabei als Zweispänner ausgeführt, wobei einige Wohnungen auch als Maissonette ausgeführt sind. Charakteristisch sind außerdem die als Ziegelmauerwerk ausgeführten Außenwände, die in den Wohnetagen realisierten Holzbalkendecken und das für Wohnzwecke vollständig ausgebaute Dachgeschoss des Untersuchungsobjekts. Baugeschichtlich wurde das Gebäude in den Jahren 2002 und 2003 umfangreich modernisiert und instandgesetzt. Gegenstand der damaligen Sanierung war u. a. der Ausbau des Dachgeschosses und die Instandsetzung der Fassaden inklusive Erneuerung aller Fenster sowie die Errichtung von zwei hofseitigen Balkonanlagen.

Im Hinblick auf den sommerlichen Wärmeschutz sind besonders die Räume in den Wohneinheiten 7 und 8 im Dachgeschoss kritisch. Das Dachgeschoss wird durch eine leichte Bauweise gekennzeichnet. So sind zum Beispiel die Innenwände als Trockenbauwände ausgeführt und die Außenwände mit einer Innendämmung versehen, sodass die massiven Außenwände mit ihrer hohen Wärmespeicherfähigkeit von der Raumluft entkoppelt sind. An den Fenstern des Dachgeschosses sind darüber hinaus i.d.R. keine außen liegenden Sonnenschutzvorrichtungen vorhanden. Jedoch werden die östlichen Fenster ab dem Morgen und die westlichen Dachgeschossfenster ab dem Mittag von der Sonne beschienen.

Zur Optimierung des sommerlichen Wärmeschutzes wurden daraufhin verschiedene Sonnenschutzsysteme und die Möglichkeit einer Abluftanlage in den Badezimmern der zwei Dachgeschosswohnungen diskutiert und zu verschiedenen Einzelmaßnahmenpaketen bzw. Maßnahmenkombinationen aufbereitet. Um die Wirksamkeit der Konzepte zu überprüfen, wurden im Anschluss auf der Grundlage des aktuellen IST-Zustandes thermische Gebäudesimulationen durchgeführt. Die berechneten Innenraumtemperaturen wurden für ein nach Osten orientiertes Schlafzimmer und für eine nach Westen orientierte Wohnküche mit Hilfe verschiedener Kriterien ausgewertet.

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass im Allgemeinen jedes Einzelmaßnahmenpaket und jede Maßnahmenkombination eine deutliche Reduzierung der Hitzebelastung bewirkt. Für das nach Osten orientierte Schlafzimmer erzielt eine Abluftanlage mit 2-fachen Luftwechsel mit einer Reduktion der Übertemperaturgradstunden auf 23 % gegenüber dem IST-Zustand die höchste Wirksamkeit. In der nach Westen orientierten Wohnküche ist im Vergleich zum IST-Zustand die außen liegende Verschattung der Fenstertüren mit ebenfalls 23 % die effektivste Hitzeschutzmaßnahme. Weiterhin ist festzustellen, dass eine im Badezimmer installierte Abluftanlage ohne außen liegenden Sonnenschutz für die westlichen Wohnküchen nicht ausreichend ist. Darüber hinaus zeichnet sich mit den Einzelmaßnahmenpakten ab, dass zu den Räumen in den unteren drei Gebäudeebenen immer noch eine höhere Hitzebelastung herrscht. Empfohlen wird dementsprechend eine Kombination aus innen liegender Verschattung im Osten, außen liegender Verschattung im Westen und einer Abluftanlage mit 2-fachen Luftwechsel im Badezimmer, da hiermit die Hitzebelastung sowohl in der Wohnküche (Hitzereduktion um 85% vom IST-Zustand) als auch im Schlafzimmer (Hitzereduktion um 90% vom IST-Zustand) deutlich reduziert werden kann. Außerdem bietet diese Kombination den Vorteil, dass die innen liegenden Rollos ohne großen Aufwand an den östlichen Fenstern montiert werden können und somit keine Baugenehmigungen und kein straßenseitiges Gerüst erforderlich sind.

Literaturverzeichnis

IDA Indoor Climate and Energy. IDA Indoor Climate and Energy 4.8 SP1. Stockholm, Schweden: EQUA Simulation AB.

Deutscher Wetter-Daten Server (DWDS). (22. 07 2020). Wetterdaten der Messstation am Thüringer Landesamt für Umwelt, Bergbau und Naturschutz in Jena-Göschwitz. Von http://webs.idu.de/wetter/?site=meteosens?station=Jena_TLUG_DS abgerufen

Deutscher Wetterdienst. (2017). Handbuch - Ortsgenaue Testreferenzjahre von Deutschland für mittlere, extreme und zukünftige Witterungsverhältnisse. Offenbach.

DIN Deutsches Institut für Normung. (2008). DIN EN ISO 13786:2008-04 Wärmetechnisches Verhalten von Bauteilen - Dynamisch-thermische Kenngrößen - Berechnungsverfahren (ISO 13786:2007); Deutsche Fassung EN ISO 13786:2007. Berlin: Beuth Verlag GmbH.

DIN Deutsches Institut für Normung. (2013). DIN 4108-2:2013-02 Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden - Teil 2: Mindestanforderungen an den Wärmeschutz. Berlin: Beuth Verlag.

Energieeinsparverordnung. (2015). Verordnung über energieeinsparenden Wärmeschutz und energieeinsparende Anlagentechnik bei Gebäuden (Energieeinsparverordnung – EnEV). Stand der letzten Änderung: 28. Oktober 2015.

Schiela, D., & Schünemann, C. (2020). Strategien gegen die Überhitzung. Gebäude-Energieberater 05/2020, S. 20-23.

Schünemann, C., Schiela, D., & Ortlepp, R. (2020). The complexity of realistic overheating assessment by thermal building simulation - revealing the user influence. Paper in Bearbeitung.

Schünemann, C., Schiela, D., & Ortlepp, R. (2020). Upgrading potentials of founding epoch houses for heat waves intensified by climate change. IABSE Symposium - Synergy of Culture and Civil Engineering - History and Challenges. Die Konferenz wurde auf Oktober 2020 verschoben: Paper eingereicht und angenommen.

Sinning, H., & Baldin, M.-L. (2019). HeatResilientCity - Hitzeresiliente Stadt- und Quartiersentwicklung in Großstädten: Ergebnisbericht zur Befragung 2018 in Erfurt. Von http://heatresilientcity.de/fileadmin/user_upload/heatresilientcity/files/publikationen/Befragungsbericht_HeatResilientCity_ISP_Bd_14.pdf abgerufen

Thüringer Landesamt für Umwelt, Bergbau und Naturschutz. (22. 07 2020). Messort Erfurt Bautzner Weg. Von http://www.tlug-jena.de/luftaktuell/ls_messdaten.php?size=-4&mo_id=62620968 abgerufen

Velux. (30. 07 2020). Gesamtkatalog - Gültig ab 01.03.2020. Von https://prospekte.velux.de/booklet/pdf/26/VELUX-Gesamtkatalog-WP455.pdf abgerufen

Weller, B., Fahrion, M.-S., Horn, S., Naumann, T., & Nikolowski, J. (2016). Baukonstruktionen im Klimawandel. Wiesbaden: Springer Vieweg.

Anlagenverzeichnis

Anlage 1: Nachweis des sommerlichen Wärmeschutzes mit dem Sonneneintragskennwerteverfahren nach DIN 4108-2:2013-02

Anlage 2: Innere Wärmeeinträge durch Personen und Geräte

Anlage 3: Auswertung der Simulationsergebnisse für den IST-Zustand

Anlage 4: Vergleich von Sonnenschutzsystemen

Anlage 5: Wirksamkeit von ausgewählten Hitzeanpassungsmaßnahmen

Leibniz-Institut für ökologische Raumentwicklung e. V. (IÖR)

Dresden, den

_____

Dr.-Ing. habil. Regine Ortlepp

Verbundleiterin

- Verbundprojektleitung -