

# **Bilanzierung und Belüftung von Treppenhäusern in Geschosswohnbauten bei der Bestandsanierung**



Fördermittelgeber des Forschungsprojekts:

**Hessisches Ministerium für Umwelt, Energie, Landwirtschaft und  
Verbraucherschutz**

**Darmstadt, Juli 2011**

Autoren: Marc Großklos  
Dr. Jens Knissel

IWU-Bestellnummer 04/11

ISBN 978-3-941140-20-2

Institut Wohnen und Umwelt GmbH  
Rheinstraße 65  
64295 Darmstadt  
Tel. 06151 - 2904-0

Email: [info@iwu.de](mailto:info@iwu.de)  
Internet: [www.iwu.de](http://www.iwu.de)

# Inhalt

|       |   |    |
|-------|---|----|
| 1     | Treppenhäuser im Gebäudebestand .....   | 1  |
| 1.1   | Abgrenzung des Untersuchungsrahmens und -zeitraumes .....                       | 2  |
| 1.2   | Treppenhäusern und deren Belüftung .....  | 3  |
| 1.3   | Entwicklungen der Konstruktion von Treppenhäusern in Mehrfamiliengebäuden ..... | 7  |
| 2     | Treppenhäuser in der Bestandssanierung .....                                    | 10 |
| 2.1   | Kenndaten von Treppenhäusern .....  | 10 |
| 2.2   | Mustergebäude .....   | 11 |
| 2.3   | Energetische Modernisierungsmaßnahmen an Treppenhäusern .....                   | 13 |
| 2.3.1 | Energetische Standards .....  | 13 |
| 2.3.2 | Außenwand .....   | 14 |
| 2.3.3 | Fenster und Türen .....   | 14 |
| 2.3.4 | Treppenhauskopf .....   | 15 |
| 2.3.5 | Hauseingang / Treppenabgang zum Keller .....                                    | 15 |
| 3     | Bilanzierung von Treppenhäusern .....   | 25 |
| 3.1   | Energieeinsparverordnung (EnEV) .....   | 25 |
| 3.2   | Passivhaus-Projektierungs-Paket (PHPP) .....                                    | 29 |
| 3.3   | Maßbezüge und Vereinfachungen bei der Bilanzierung .....                        | 30 |
| 3.4   | Modellierung mittels dynamischer Gebäudesimulation .....                        | 31 |
| 3.5   | Vereinfachtes Modell des Treppenhauses bei der energetischen Bilanzierung ..... | 32 |
| 4     | Luftaustausch in Treppenhäusern und Belüftungskonzepte .....                    | 33 |
| 4.1   | Auftriebsinduzierter Luftaustausch in Treppenhäusern .....                      | 33 |
| 4.2   | Varianten der Belüftung von Treppenhäusern .....                                | 39 |
| 4.2.1 | Abluftanlage .....  | 40 |
| 4.2.2 | Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung für das Treppenhaus .....                 | 40 |
| 4.2.3 | Anschluss an zentrales Lüftungsgerät des Gebäudes .....                         | 43 |
| 4.2.4 | Anschluss an ein Wohnungslüftungsgerät .....                                    | 44 |
| 4.3   | Luftwechsel im Treppenhaus .....  | 44 |
| 4.3.1 | Auswirkungen von Undichtigkeiten im Treppenhaus .....                           | 46 |
| 4.4   | Brandschutz .....   | 47 |
| 5     | Modellrechnungen .....  | 49 |
| 5.1   | Bilanzierung mit Standardrandbedingungen .....                                  | 49 |
| 5.2   | Temperaturen des Treppenhauses als unbeheizter Bereich .....                    | 52 |
| 5.2.1 | Vergleich von vereinfachtem Ansatz und Wärmestrom-Berechnung .....              | 52 |
| 5.2.2 | Temperaturdifferenzierung im Treppenhaus .....                                  | 53 |
| 5.2.3 | Temperaturen im Treppenhaus im Jahresverlauf .....                              | 56 |
| 5.3   | Dynamische Simulation des Modellgebäudes .....                                  | 58 |
| 5.3.1 | Beschreibung des TAS-Modells .....  | 58 |
| 5.3.2 | Temperaturschichtung im Treppenhaus .....                                       | 61 |
| 5.3.3 | Volumenströme im Treppenhaus .....  | 63 |
| 5.4   | Modellrechnungen mit dem vereinfachten Treppenhausmodell .....                  | 66 |
| 5.4.1 | Validierung des Treppenhausmodells mit Messdaten .....                          | 66 |

|       |  |    |
|-------|--|----|
| 5.4.2 | Vergleich des Treppenhausmodells mit den dynamischen Simulationen..... | 68 |
| 5.4.3 | Varianten der Treppenhausausführung .....                              | 69 |
| 5.5   | Bilanzierung mit angepassten Treppenhaustemperaturen .....             | 72 |
| 6     | Kosten .....   | 79 |
| 7     | Zusammenfassung, Empfehlungen und Ausblick .....                       | 81 |
|       | Literatur .....  | 85 |
|       | Anhänge .....  | 89 |

# 1 Treppenhäuser im Gebäudebestand

Treppen(-häuser) verbinden unterschiedliche Geschosse miteinander, bieten Zugang zu den Wohnungen und dienen als Fluchtwege. Durch ihre Lage im Eingangsbereich des Hauses, vermitteln sie aber auch einen ersten Eindruck vom Innern des Gebäudes und können als Repräsentationsbereich dienen. In Mietshäusern wurde das Treppenhaus jedoch überwiegend einfach gestaltet (Abb. 1-1).



**Abb. 1-1: Beispiele typischer Treppenhäuser in Mehrfamilienhäusern**

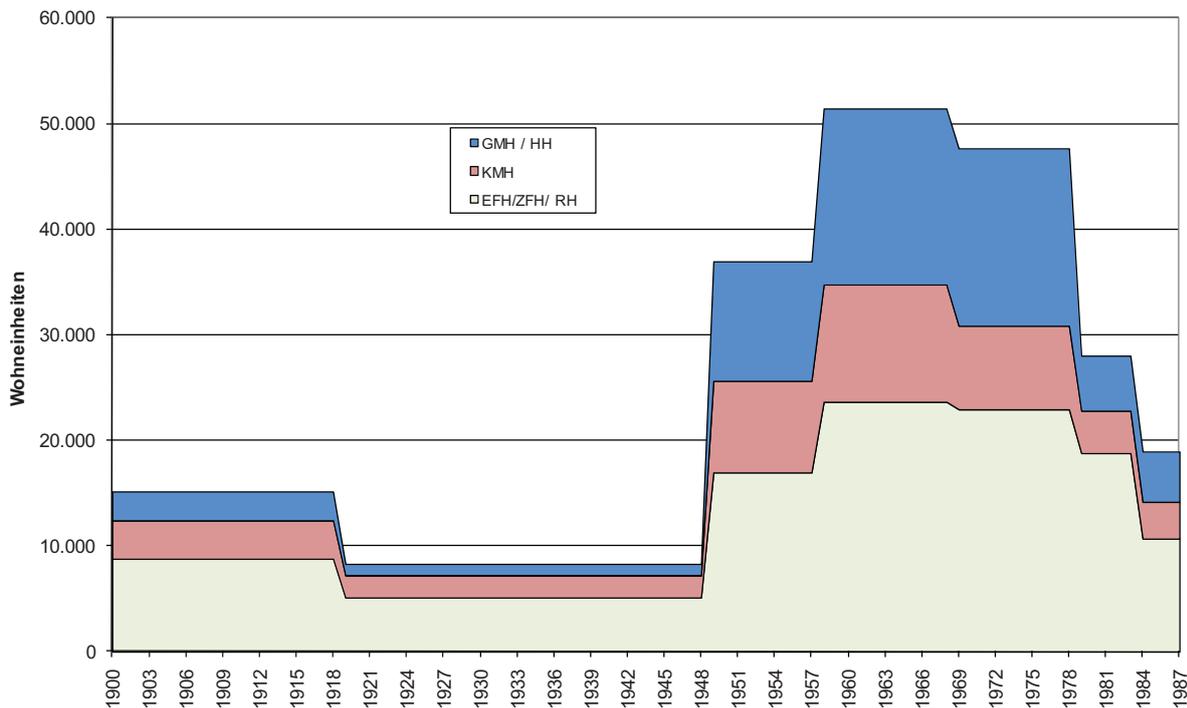
Während Treppenhäuser in Mehrfamilienhäusern früher selten beheizt waren und somit im Winter geringe Temperaturen aufwiesen, werden im Baukörper integrierte Treppenhäuser im Zuge einer energetischen Sanierung sinnvoller Weise zumeist in die thermische Hüllfläche eingeschlossen - dies vereinfacht die Umsetzung der Modernisierung. In der Folge müssen Treppenhäuser auch energetischen Anforderungen genügen, wie zum Beispiel Wärmedämmung der Außenwände und geringe Undichtigkeiten durch Fugen, die über die Anforderungen an den Mindestwärmeschutz hinausgehen.

Treppenhäuser stehen normalerweise nicht im Fokus bei der energetischen Sanierung von Gebäuden, sollten aber dennoch nicht vernachlässigt werden. Dabei stellen sich sowohl bei der Wahl der zu dämmenden Flächen, bei der Bilanzierung eines solchen Bereiches als auch bei der geeigneten Belüftung besondere Herausforderungen. Da es meist einen Versatz zwischen Eingangsbereich und Erdgeschoss von einigen Stufen bis zu einem halben Geschoss gibt, besitzen Treppenhäuser komplexe Geometrien, die nur mit hohem Aufwand detailliert in einer Energiebilanz abgebildet werden können. Hier ist es wünschenswert, geeignete Vereinfachungen zu treffen, die ein nicht beheiztes, sich aber in der thermischen Hülle eines gut gedämmten Gebäudes befindliches Treppenhaus korrekt abbilden.

Später stellt sich die Frage, wie eine der Nutzung entsprechende Luftqualität im Treppenhaus erreicht werden kann, da Treppenhäuser oft auch als Abstellfläche für Gegenstände mit einer möglichen Geruchsbelastung verwendet werden, z. B. für Schuhe. Gelingt dies nicht durch geeignete Maßnahmen, so reagieren die Bewohner des Gebäudes durch Fensterlüftung. Diese kann innerhalb der Heizperiode besonders bei Dauerlüftung zu erhöhten Wärmeverlusten und somit zu höherem Energieverbrauch des Gebäudes führen, wenn das Treppenhaus innerhalb der thermischen Hülle liegt. Darüber hinaus kann bei bestimmten Witterungsbedingungen u. U. trotz Fensterlüftung nicht die gewünschte Luftqualität erreicht werden.

## 1.1 Abgrenzung des Untersuchungsrahmens und -zeitraumes

Die vorliegende Untersuchung soll für typische hessische Mehrfamilienhäuser Auskunft über die Treppenhauskonstruktionen, die Bilanzierung der Treppenhäuser sowie eine geeignete Belüftung liefern. Es gibt eine Reihe von Gebäudetypen und Baualtersklassen, die vergleichbare Konstruktionen aufweisen. Exotische Geometrien bzw. Bauweisen, die weniger häufig realisiert wurden, werden in dieser ersten Annäherung an das Thema Treppenhausbilanzierung und Belüftung bewusst ausgespart. Abb. 1-2 zeigt die Alters- und Häufigkeitsverteilung des hessischen Wohngebäudebestandes.

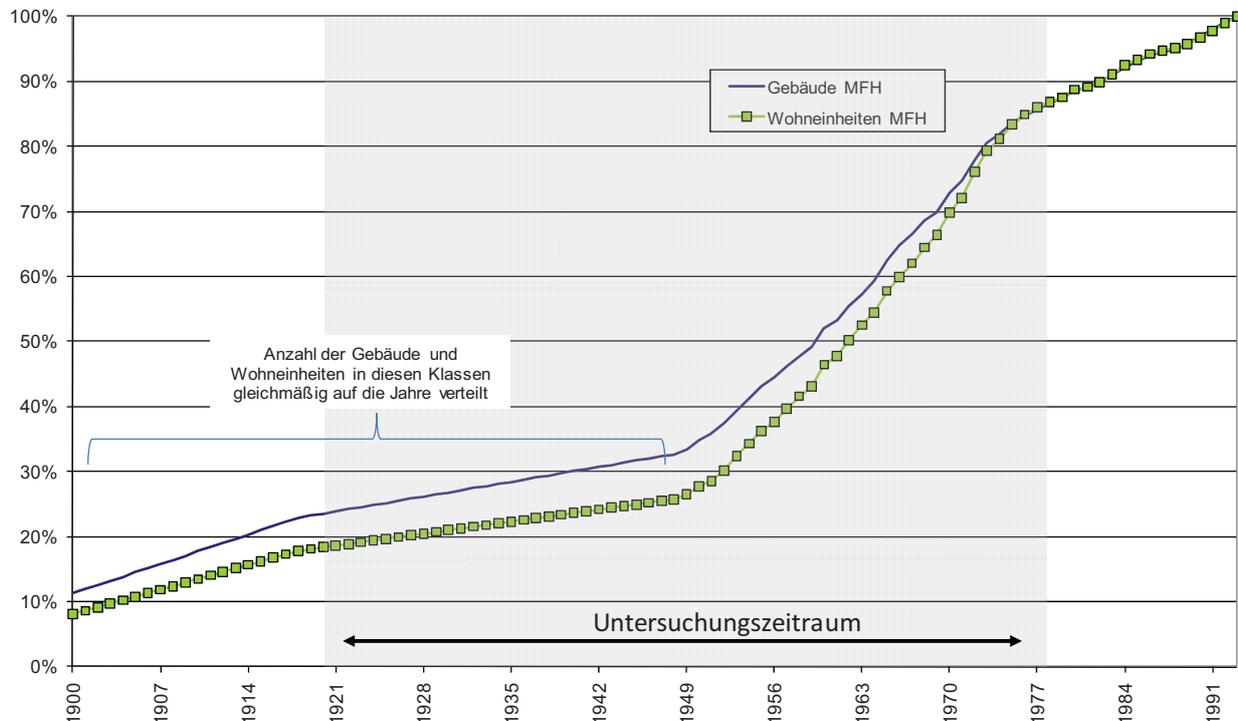


**Abb. 1-2: Altersverteilung der Gebäude in Hessen (Mittelwerte für die jeweilige Klasse) [nach HEA]**

Der Untersuchungszeitraum wird auf Mehrfamilienhäuser zwischen 1919 und 1978 festgelegt (Abb. 1-3). Bis 1919 finden sich weniger Mehrfamilienhäuser im Bestand, die Bauweisen unterscheiden sich stärker und zusätzlich spielen Belange des Denkmalschutzes meist eine wichtige Rolle, so dass es hier schwieriger ist, verallgemeinerbare Lösungen zu entwickeln.

Gebäude nach 1978 stehen bisher nur in geringem Umfang zur Sanierung an und bilden auch eine deutlich kleinere Gruppe im hessischen Gebäudebestand (siehe Abb. 1-2 und Abb. 1-3), so dass sie nicht mehr explizit in dieser Untersuchung berücksichtigt werden.

Somit werden ca. 70 % des Bestandes an Mehrfamilienhäusern grundsätzlich in der Analyse berücksichtigt.



**Abb. 1-3: Summenhäufigkeit der Altersverteilung der Mehrfamiliengebäude in Hessen (Anzahl der Gebäude bzw. Wohneinheiten) [IWU RGU]**

## 1.2 Treppenhäusern und deren Belüftung

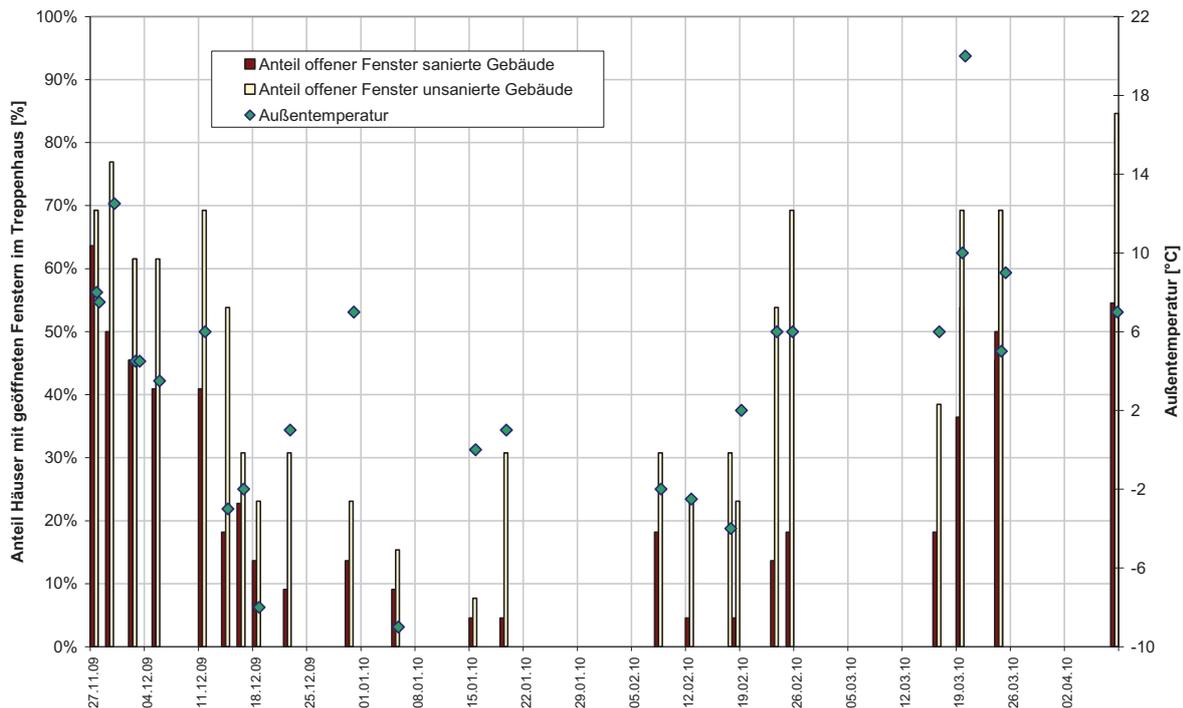
Treppenhäuser in Wohngebäuden wurden so konstruiert, dass sie be- und entlüftet werden konnten. Diese Lüftung erfolgte früher und auch zum überwiegenden Fall noch heute über Fenster, bei innen liegenden, fensterlosen Treppenhäusern kamen auch Oberlichter zum Einsatz. Je nach Dichtheit der Gebäudehülle, hier besonders im Bereich des Treppenhauses und der Fenster und Türen, muss mehr oder weniger aktiv über die Treppenhausfenster gelüftet werden. Die Steuerung dieser Fensterlüftung erfolgt meist über die Nase derjenigen, die das Treppenhaus betreten. Hier spielt der Eingangsbereich eine besondere Rolle, wo die Luftqualität im Treppenhaus direkt mit der Außenluftqualität verglichen wird. Nach einiger Zeit adaptiert sich die Nase an die Luftqualität im Raum und es fällt deutlich schwerer die Luftqualität zu bewerten.

Das Erfordernis zum Lüften wird noch erhöht, wenn das Treppenhaus als Abstellraum für Gegenstände, z. B. Schuhe oder Pflanzen verwendet wird, was in den Hausordnungen oft untersagt, jedoch trotzdem häufig anzutreffen ist (Abb. 1-4 links). Ein weiterer Aspekt, der zu schlechter Luftqualität im Treppenhaus führen kann, sind Gerüche aus den Wohnungen oder dem Keller, wenn diese ins Treppenhaus ziehen. Hier spielen Undichtigkeiten vor allem der Wohnungs- und Kellertüren eine wichtige Rolle.



**Abb. 1-4:** Beispiel für Geruchsquellen im Innern des Treppenhauses und ein gekipptes Treppenhausfenster oben

Als Folge von Gerüchen im Treppenhaus werden von den Bewohnern teilweise die Treppenhausfenster gekippt, um den Luftaustausch zu erhöhen (siehe Abb. 1-4 rechts und Deckblatt). Allerdings gibt es meist kein Regulativ das dafür sorgt, dass nach Beseitigung der Gerüche die Fenster wieder geschlossen werden. Dies kann dazu führen, dass Treppenhausfenster dauerhaft gekippt bleiben, wodurch die Wärmeverluste des Gebäudes erhöht werden.

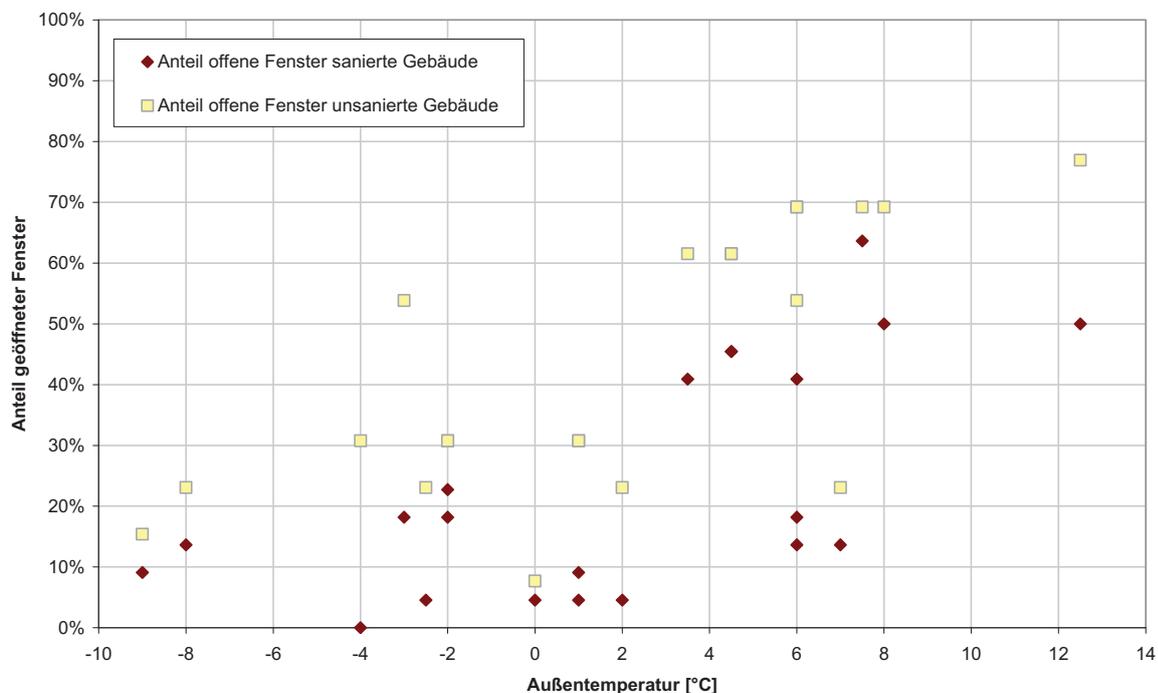


**Abb. 1-5:** Vor-Ort-Aufnahme des Anteils geöffneter Fenster im Treppenhaus während der Heizperiode 2009/10 im Zeitverlauf bei 35 Mehrfamilienhäusern

Inwieweit in der Praxis Treppenhausfenster in der Heizperiode dauerhaft geöffnet sind, wurde im Winter 2009/10 exemplarisch an 35 Mehrfamilienhäusern in Darmstadt erhoben. Dazu wurde während der Heizperiode zu unterschiedlichen Zeitpunkten und bei unterschiedlichen Außentemperaturen die Fensterstellung im Treppenhaus über Ortsbegehungen von außen erfasst. Bei den ausgewählten Gebäuden handelt es sich um 13 unsanierte Mehrfamilienhäuser

und 22 Gebäude, die in den letzten Jahren energetisch saniert wurden. Die Gebäude weisen zwischen 2 und 5 Stockwerken auf. Genaue Informationen, ob es sich bei den Gebäuden um Mietshäuser oder Eigentum handelt, liegen nicht vor, es ist jedoch von einem überwiegenden Anteil an Mietwohnungen auszugehen. Die Baujahre der Gebäude liegen zwischen ca. 1925 und ca. 1960, sanierte Gebäude wurden seit 2005 energetisch ertüchtigt.

Abb. 1-5 zeigt den durch Ortsbegehungen erfassten Anteil von geöffneten Fenstern im Treppenhaus im Verlauf der Heizperiode. Ende November, als die Erhebung begonnen wurde, wiesen in beiden Gruppen – sanierte und unsanierte Gebäude – über die Hälfte der Gebäude mindestens ein gekipptes Fenster auf. Die Außentemperatur lag zu dieser Zeit zwischen 5 °C und 10 °C. Danach sank die Außentemperatur bis auf -7 °C ab und in der Folge sank auch der Anteil der offenen Fenster bei beiden Gebäudetypen auf unter 10 % ab. Somit zeigen die ausgewählten Gebäude bei extrem tiefen Außentemperaturen nur noch einen geringen Anteil an offenen Treppenhausfenstern. Auffällig ist jedoch, dass der Anteil geöffneter Fenster bei Außentemperaturen im einstelligen Bereich über 0 °C deutlich zunimmt. Dieser Effekt ist bei den unsanierten Gebäuden stärker ausgeprägt. Bereits bei Außentemperaturen von 5 °C können 50 % der Treppenhausfenster geöffnet sein.

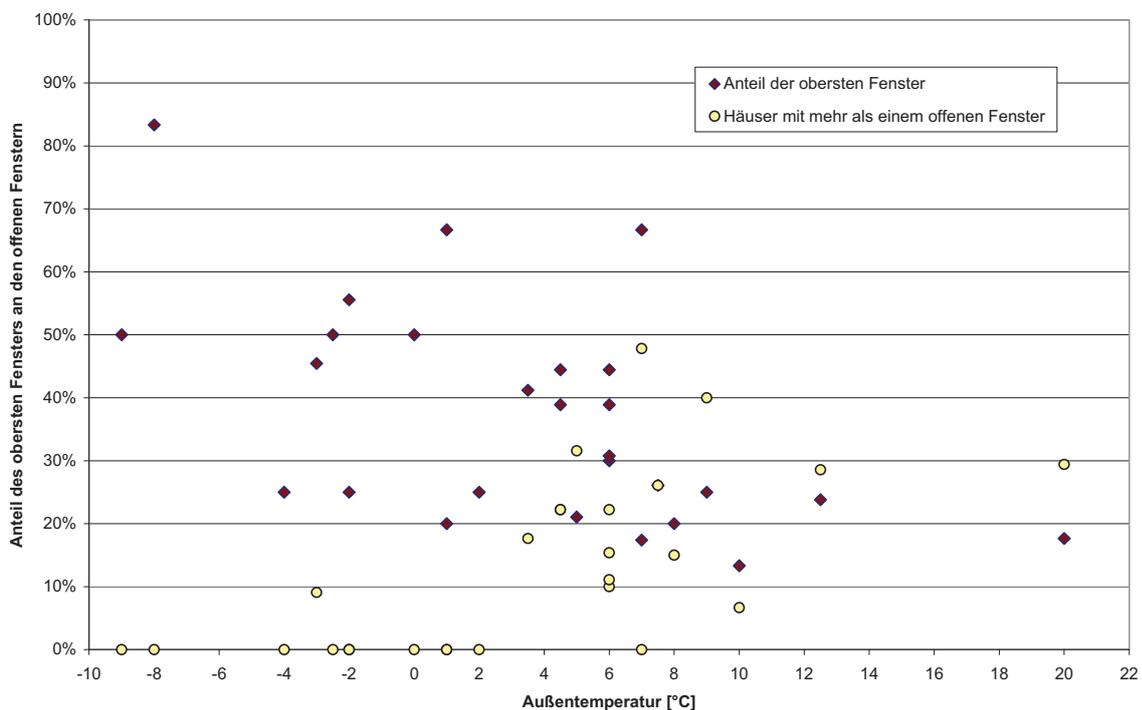


**Abb. 1-6: Zusammenhang zwischen Anteil geöffneter Fenster im Treppenhaus und der Außentemperatur**

Abb. 1-6 zeigt den Zusammenhang zwischen Außentemperatur und Anteil geöffneter Fenster im Treppenhaus. Hier ist der Anstieg des Anteils offener Fenster bei steigenden Außentemperaturen deutlich zu erkennen (liegen mehrere Punkte übereinander, so lag an unterschiedlichen Tagen die gleiche Außentemperatur vor). Dass aber auch bei der vergleichsweise geringen Anzahl geöffneter Fenster bei niedrigen Außentemperaturen die Gefahr von Auskühlungen im Treppenhaus bestehen kann, zeigt die Auswertung in Abb. 1-7, in der der Anteil der obersten Fenster im Treppenhaus an den geöffneten Fenstern in Abhängigkeit von der Außentemperatur dargestellt ist. Hier zeigt sich ein deutlicher prozentualer Anstieg der offenen Fenster bei niedrigen Temperaturen. Dies ist wohl darauf zurückzuführen, dass die obersten Fenster,

besonders wenn sie zum Trockenboden führen, von den Bewohnern im Winter vergessen werden und somit am häufigsten offen bleiben. Durch die Öffnung oben im Treppenhaus kann warme Luft ausströmen, was besonders dann zu erwarten ist, wenn die Haustür im Erdgeschoss geöffnet wird oder nennenswerte Undichtigkeiten zum Keller bestehen. Durch dieses Ausströmen der warmen Treppenhausluft sind im oberen Bereich auch kaum Zugerscheinungen zu erwarten.

Sind in einem Treppenhaus mehrere Fenster gleichzeitig offen, erhöht dies den Luftaustausch so stark, dass die Bewohner offensichtlich einige Fenster wieder schließen, was an der abnehmenden Anzahl bei niedrigen Außentemperaturen (gelbe Kreise) in Abb. 1-7 zu sehen ist. Bei Außentemperaturen unter 2 °C kamen mehrere geöffnete Fenster praktisch nicht mehr vor. Aber auch bei höheren Außentemperaturen, die aber noch unterhalb der Heizgrenztemperatur lagen, ist mit verstärktem Wärmeverlust zu rechnen.



**Abb. 1-7: Anteil der obersten Fenster im Treppenhaus an den geöffneten Fenstern und Anteil der Treppenhäuser mit mehr als einem offenen Fenster in Abhängigkeit der Außentemperatur**

Die Ortsbegehungen über einen Winter zeigen somit, dass es sich nicht nur lohnt, Treppenhäuser in der thermischen Hülle unter dem Aspekt der Bilanzierung zu betrachten, sondern auch im Hinblick auf eine geeignete Belüftung, um offen stehende Fenster zu vermeiden und somit die Wärmeverluste zu minimieren und einen Beitrag zur Energieeinsparung zu leisten.

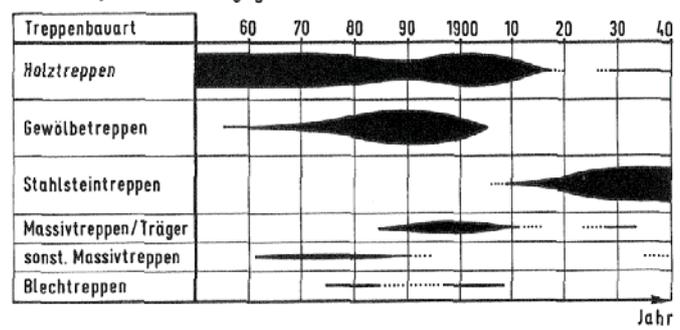
### 1.3 Entwicklungen der Konstruktion von Treppenhäusern in Mehrfamiliengebäuden

Die Errichtung von Mehrfamilienhäusern als Mietshaus reicht bis in das 18. Jahrhundert zurück und erlebte während der industriellen Revolution Mitte des 19. Jahrhunderts eine erste große Ausweitung. Es entstanden neue, dicht bebaute Stadtviertel. Die Treppenhäuser dienten als Zugang zu den Wohnungen und als Fluchtwege. Während man im 19. Jahrhundert Treppen meist in Holz ausführte, wurde gegen Ende des Jahrhunderts verstärkt auf nicht brennbare Materialien aus Stein oder Metall zurückgegriffen oder die Treppen wurden mit einer Putzschicht von unten verkleidet, um die Brandschutzeigenschaften zu verbessern. Vermietete Mehrfamilienwohnhäuser finden sich typischerweise in Städten, im ländlichen Raum sind diese weniger verbreitet. Die Städte regelten über ihre Bauverordnungen zunehmend die Materialien, die für Treppen eingesetzt werden durften.

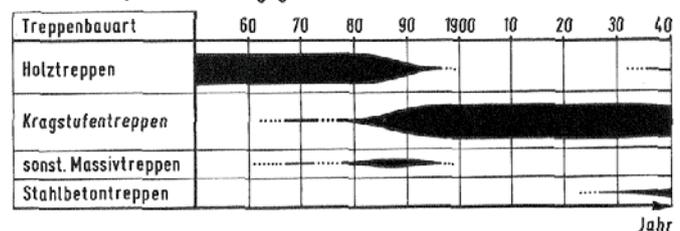
Daiber hat für die Städte Berlin, Hamburg und Hannover die Verteilung der Treppenmaterialien zwischen 1850 und 1940 erhoben [Daiber 1986], Abb. 1-8 zeigt einen Auszug aus den Ergebnissen. Während in Berlin bis zur Jahrhundertwende hauptsächlich Holz- und Gewölbetreppen zum Einsatz kamen, dominieren spätestens ab 1918 die Stahlstiebtreppen. In Hamburg setzt die Substitution von Holz durch Stahlstiebtreppen bereits um 1900 ein. In Hannover waren ab 1880 bereits Blechtreppen vorgeschrieben, so dass diese bis zum Ende des zweiten Weltkriegs das dominierende Treppenmaterial bildete.

Nach 1945 ist nicht mehr mit großen Unterschieden zwischen einzelnen Orten zu rechnen, da durch die Landesbauordnungen zumindest innerhalb der einzelnen Bundesländer einheitliche Regelungen vorgeschrieben wurden. Untersuchungen zu unterschiedlichen Festlegungen in Bezug auf Treppenhäuser zwischen den einzelnen Landesbauordnungen liegen nicht vor.

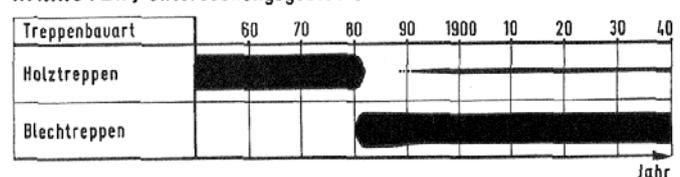
**BERLIN, Untersuchungsgebiet 1**



**HAMBURG, Untersuchungsgebiet 2**

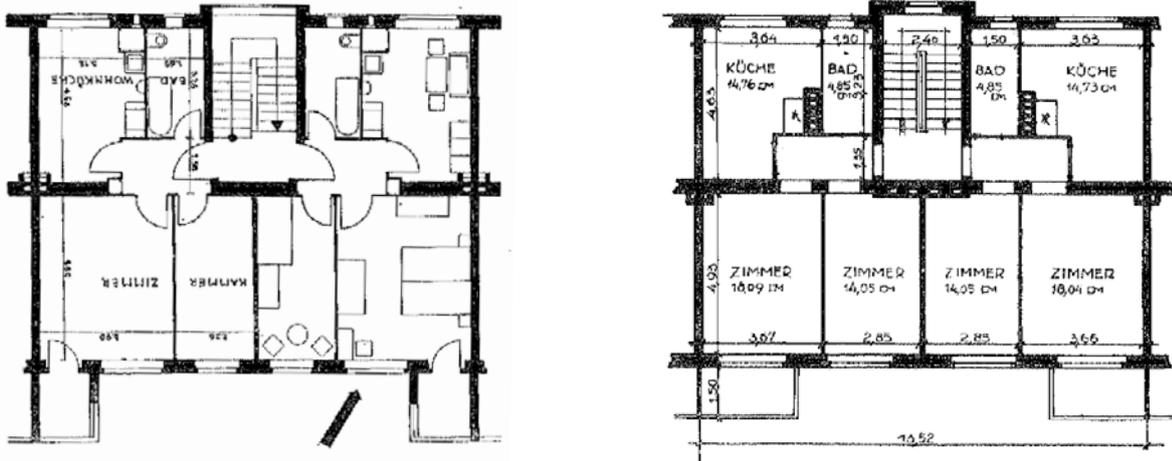


**HANNOVER, Untersuchungsgebiet 3**



**Abb. 1-8: Verteilung der Treppenmaterialien in Berlin, Hamburg und Hannover zwischen 1850 und 1940 [Daiber 1986, S. 184]**

Abb. 1-9 zeigt exemplarisch zwei Grundrisse von Gebäuden unterschiedlicher Architekten aus den Jahren 1929 - 1931, bei denen die gleichförmigen Konstruktionsprinzipien in der Grundstruktur des Gebäudes gut zu erkennen sind.



**Abb. 1-9: Historische Gebäudegrundrisse - links: „Berliner Siedlungen von Mebes und Emmerich 1931“, rechts „Berliner Siedlungsbauten von Dr. Erwin Gutkind“, beide aus [Bauformen 1931]**

Die Hessische Landesbauordnung vom 6. Juli 1957 [HBO 1957] legte für Treppenhäuser fest, dass diese in Gebäuden mit mehr als drei Vollgeschossen an der Außenwand liegen und die Wände die Dicke von Brandwänden aufweisen müssen. In Gebäuden mit mehr als zwei Vollgeschossen mussten nicht brennbare Baustoffe in mindestens Feuer hemmender Bauart im Treppenhaus eingesetzt werden. Weiterhin schrieb die Bauordnung vor, dass Treppenhäuser mit Fenstern be- und entlüftet werden mussten. Das Steigungsverhältnis der Treppenstufen durfte bei Bauwerken über zwei Vollgeschossen höchstens 2 zu 3 betragen und ohne Treppenabsatz waren höchstens 15 Stufen hintereinander zulässig. Die zusätzlich geltende Durchführungsverordnung spezifizierte, dass Treppenstufen höchstens 19 cm hoch sein durften und die Auftrittsbreite mindestens 24 cm betragen musste. Die Breite der Treppen musste mindestens 1 m betragen, die lichte Durchgangshöhe durfte 2 m nicht unterschreiten. Die Tiefe der Treppenabsätze musste die Breite um mindestens 1/10 überschreiten. Für Treppen in großen Gebäuden oder mit einer hohen Anzahl von Nutzern wurden separate Regelungen getroffen.

Vorgaben zu Form und Größe von Treppenhäusern sind aus den obigen Ausführungen jedoch nicht abzuleiten. Aus diesem Grund werden im folgenden Kapitel exemplarisch verschiedene Treppenhäuser von Gebäuden unterschiedlicher Geschosshöhen und Bauklassen auf typische Treppenhausabmaße untersucht.

Abb. 1-10 und Abb. 1-11 zeigen Beispiele für die Integration des Treppenhauses in die thermische Hülle eines Gebäudes bei der energetischen Modernisierung.

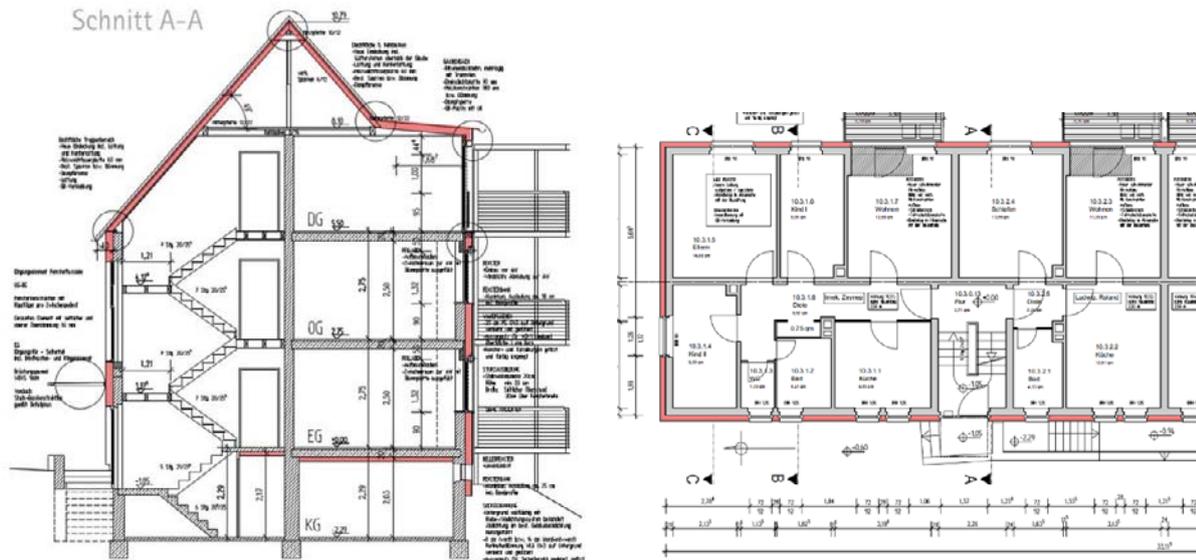


Abb. 1-10: Beispiel der Einbindung eines Treppenhauses in die thermische Hülle eines Gebäudes mit zwei Vollgeschossen [planungsgruppeDREI]

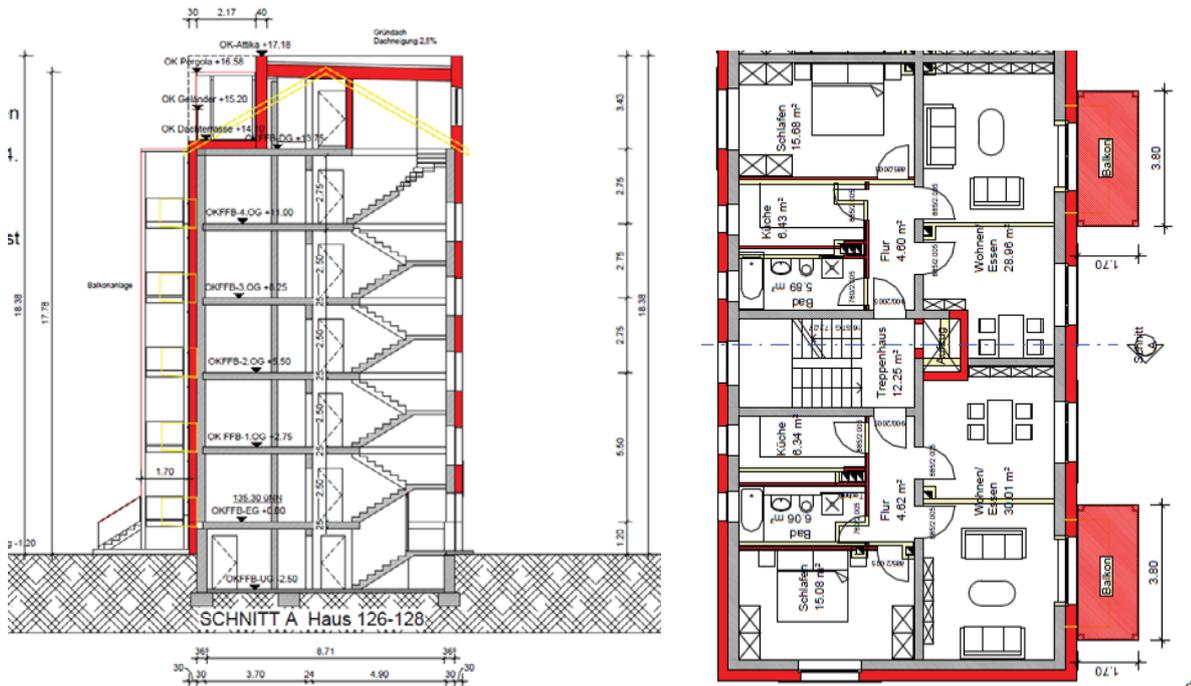


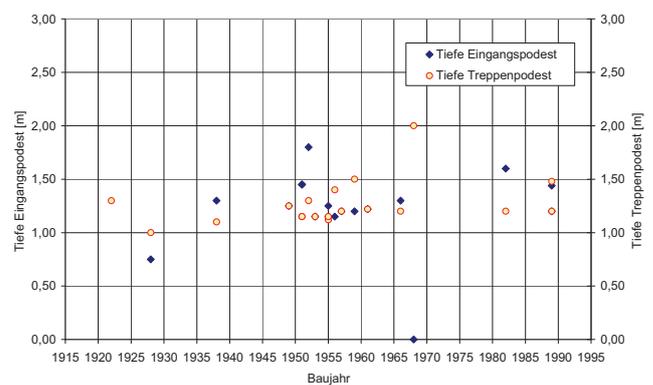
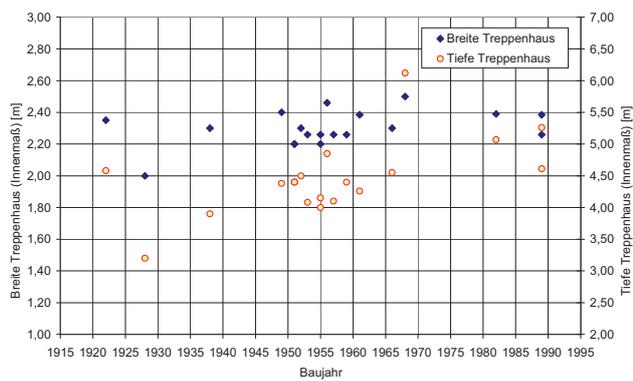
Abb. 1-11: Beispiel der Einbindung eines Treppenhauses in die thermische Hülle eines Gebäudes mit fünf Vollgeschossen [faktor10]

## 2 Treppenhäuser in der Bestandssanierung

### 2.1 Kenndaten von Treppenhäusern

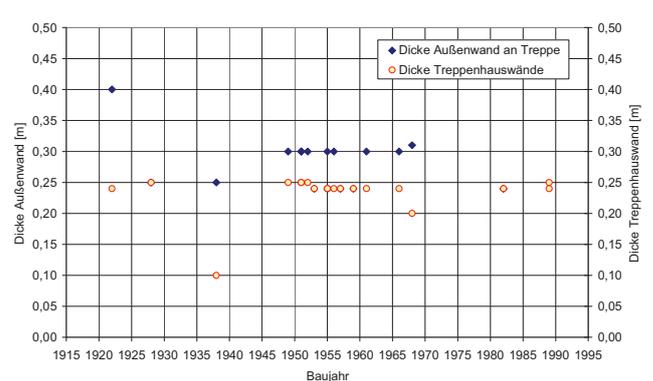
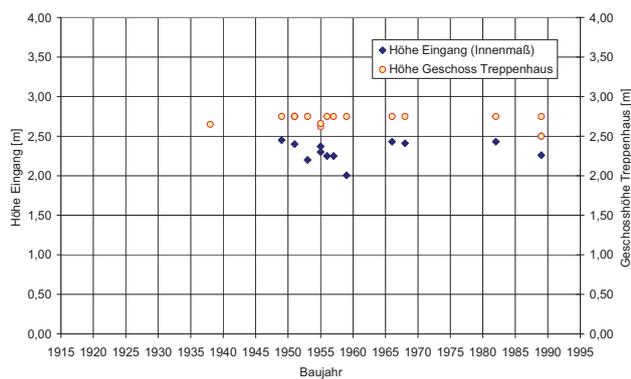
Zur Bestimmung von typischen Treppenhauskonstruktionen wurden auf Basis von Plänen 20 unterschiedlicher Bestandsgebäude typische Abmessungen und Konstruktionen von Treppenhäusern untersucht. Für die im Gebäudebestand häufigen Nachkriegsbauten liegen zahlreiche Daten vor, vor allem die Gebäude der 1920er und der 1970er sind weniger häufig vertreten. Ausgewertet wurden im Folgenden kleine Mehrfamilienhäuser mit bis zu 6 Geschossen.

Die folgende Abb. 2-1 zeigt oben links die Auswertung der Breite und der Tiefe der untersuchten Treppenhäuser. Es ist gut zu erkennen, dass die Breite der Treppenhäuser besonders bei den Nachkriegsbauten kaum variiert und zwischen 2,20 m und 2,50 m liegt – der Mittelwert beträgt 2,28 m. Die Tiefe der Treppenhäuser liegt im Mittel bei 4,42 m, wobei die Einzelwerte zwischen 3,20 m (einfaches Gebäude aus dem Jahr 1928) bis 6,12 m (Gebäude des beginnenden industriellen Bauens aus dem Jahr 1968) schwanken.



Breite und Tiefe Treppenhaus (Innenmaß)

Tiefe Eingangs- und Treppenpodeste (Innenmaß)



Höhe Eingang und Geschosshöhe

Dicke Treppenhauswände

**Abb. 2-1: Kennwerte der aufgenommenen Gebäude und Ihrer Treppenhäuser in Abhängigkeit vom Baujahr**

## 2.2 Mustergebäude

Auf Basis der Auswertungen in Kapitel 2.1 werden nun für die weiteren Analysen typische Konstruktionen ausgewählt und zwei Maßnahmenpakete für energetische Modernisierungsmaßnahmen beschrieben, die entweder für eine Modernisierung in Anlehnung an die EnEV-Anforderungen oder als Sanierung mit Passivhaus-Komponenten geeignet sind.

### Typisches Gebäude / Treppenhaus

Als Mustergebäude wurde ein zweispänniges Mehrfamilienhaus mit 4 Stockwerken und 8 Wohneinheiten gewählt. Es wird als frei stehendes Gebäude bilanziert. Die Hausbreite liegt bei 15,93 m (Bestandsaußenmaß), die Haustiefe bei 9,44 m (Bestandsaußenmaß). Als Dach wird ein Flachdach angesetzt. Die 8 Wohnungen in den vier Geschossen des Gebäudes besitzen eine Energiebezugsfläche von 456 m<sup>2</sup>, die Gebäudenutzfläche  $A_N$  nach EnEV ergibt sich abhängig vom Dämmstandard aus dem umbauten Volumen. Die Hauptfensterfläche wird mit einer Orientierung nach Süden angesetzt.

Das Treppenhaus, das im Rahmen dieser Untersuchung weiter betrachtet wird, besitzt die in Tab. 2-1 gezeigten Dimensionen. Die Wände bestehen aus massiven Hohlblocksteinen der Nachkriegszeit, die Geschossdecken und Treppen aus Beton bzw. Kunststeinen, die Geschossdecken sind bis zum Treppenhaus (bzw. der halben Wanddicke) durchbetoniert. Vom Treppenhaus aus werden je zwei Wohnungen erschlossen, der Treppenhauskopf endet nach Sanierung im beheizten Bereich.

**Tab. 2-1: Basiskenngrößen des Mustertreppenhauses**

|                                    |                 |
|------------------------------------|-----------------|
| Anzahl Stockwerke                  | 4               |
| Geschosshöhe                       | 2,75 m          |
| Breite Treppenhaus (Innenmaß)      | 2,50 m          |
| Tiefe Treppenhaus (Innenmaß)       | 4,66 m          |
| Tiefe Eingangs- bzw. Treppenpodest | 1,20 m / 1,40 m |
| Höhenversatz Eingangsbereich       | 1,05 m          |
| Höhe Eingangsbereich               | 2,50 m          |
| Dicke Außenwand an Treppe          | 0,32 m          |
| Dicke Treppenhauswand              | 0,24 m          |

Als Varianten am Kellerabgang werden untersucht:

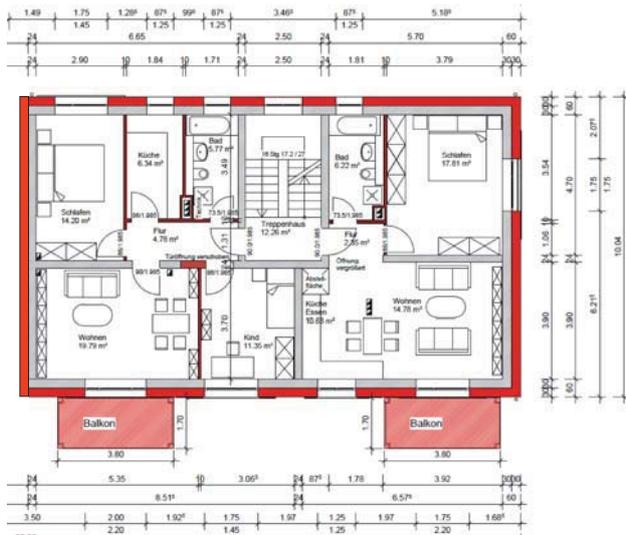
- Kellerabgang offen
- Kellerabgang geschlossen (Kellertür oben)

Zur Lüftung der Wohnungen wurde im unsanierten Zustand einfache Fensterlüftung angesetzt, bei der EnEV-Modernisierung eine Abluftanlage in den Wohnungen und bei der Modernisierung mit PH-Komponenten wohnungsweise eine Lüftungsanlage (Zu-/Abluft) mit Wärmerückgewinnung (Rückwärmzahl 84 %). Für die Gebäudedichtheit wurden die Werte aus Tab. 2-2 angesetzt.

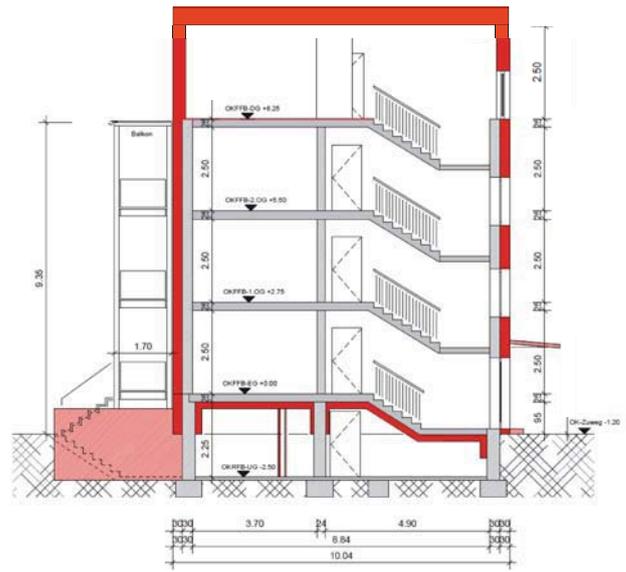
**Tab. 2-2: Angesetzte Luftdichtigkeit in Abhängigkeit vom energetischen Standard**

| Energetischer Standard | $n_{50}$ -Wert      |
|------------------------|---------------------|
| unsaniert              | 3,0 h <sup>-1</sup> |
| EnEV                   | 1,5 h <sup>-1</sup> |
| PH-Komponenten         | 0,6 h <sup>-1</sup> |

**Zeichnungen des Mustergebäudes**



**Abb. 2-2: Grundriss des Mustergebäudes**



**Abb. 2-3: Schnitt durch das Mustergebäude**

## 2.3 Energetische Modernisierungsmaßnahmen an Treppenhäusern

In diesem Kapitel werden typische Modernisierungsmaßnahmen für Treppenhäuser beschrieben. Es kann jedoch wegen der Vielfalt der möglichen Konstruktionen nur exemplarisch auf typische Gebäude mit dem in Kapitel 2.1 beschriebenen Geometrien eingegangen werden. Die Maßnahmen sollten in den meisten Fällen auf andere Treppenhäuser übertragbar sein.

### 2.3.1 Energetische Standards

Für diese Untersuchung wurden exemplarische energetische Standards festgelegt (siehe Tab. 2-3), die für das Modellgebäude angewandt werden. Dabei wird zwischen den Anforderungen nach Energieeinsparverordnung (EnEV) und einer Modernisierung mit Passivhaus-Komponenten (PH) unterschieden. Es wurden real umsetzbare Dämmdicken angesetzt – diese erfüllen aber nicht in allen Fällen die in der EnEV, Anlage 3 geforderten U-Werte für Bestandsgebäude. Bei den betroffenen Stellen handelt es sich um kleine Flächen, die nur einen sehr geringen Anteil an den Gesamtwärmeverlusten des Gebäudes aufweisen und bei denen die Einhaltung der EnEV-Grenzwerte vor Ort aufgrund des verfügbaren Raumangebotes kaum möglich ist.

**Tab. 2-3: Dämmdicken und U-Werte der Bauteile für EnEV und PH-Komponenten (in Klammern die Mindestanforderungen)**

| Bauteil                           | Wärmeleitfähigkeit                               | EnEV                |                  | PH-Komponenten      |                    |
|-----------------------------------|--|---------------------|------------------|---------------------|--------------------|
|                                   |  | Dämmstoffdicke [cm] | U-Wert [W/(m²K)] | Dämmstoffdicke [cm] | U-Wert [W/(m²K)]   |
| Außenwand                         | 0,035 W/(mK)                                     | 12                  | 0,22<br>(0,24)   | 24                  | 0,13<br>(0,15)     |
| Dach                              | 0,040 W/(mK)                                     | 20                  | 0,19<br>(0,20)   | 34                  | 0,11<br>(0,12)     |
| Kellerdecke                       | 0,040 W/(mK) (EnEV)<br>0,025 W/(mK) (PH)         | 10                  | 0,30<br>(0,30)   | 10                  | 0,22<br>(ca. 0,25) |
| Fenster                           |  |                     | 1,30             |                     | 0,85               |
| Haustür                           |  |                     | 1,5              |                     | 0,8                |
| Kellertür                         |  |                     | 1,5              |                     | 1,1                |
| Wand am Kellerabgang              | 0,025 W/(mK)                                     | 4                   | 0,43             | 4                   | 0,43               |
| Eingangspodest, Treppenlauf unten | 0,025 W/(mK)                                     | 8                   | 0,27             | 8                   | 0,27               |
| Wand zum Keller                   | 0,025 W/(mK)                                     | 4                   | 0,43             | 4                   | 0,43               |
| Wand im Keller zu beheizt         | 0,035 W/(mK)                                     | 10                  |                  | 10                  |                    |
| Boden Treppenhaus                 | 0,008 W/(mK)<br>Verbundplatte mit Vakuumdämmung) | 1,5                 | 0,4              | 1,5                 | 0,4                |

Bei der Gebäudevariante mit Passivhaus-Komponenten dienten die Förderrandbedingungen des Hessischen Ministeriums für Umwelt, Energie, Landwirtschaft und Verbraucherschutz als

Orientierungsgröße<sup>1</sup> [HMUELV 2011]. Es werden keine Dämmschürzen an den Kellerinnenwänden oder am Kellerdeckenaufleger vorgesehen, die Perimeterdämmung wird bis in das Erdreich geführt.

### 2.3.2 Außenwand

Grundsätzlich wird von einer Integration des Treppenhauses in die thermische Hülle des Gebäudes ausgegangen, da eine thermische Trennung im Treppenhaus selten zufriedenstellend möglich ist. Einerseits sind Bestandstreppenhäuser meist schmal, so dass die notwendigen Dämmstoffdicken die freie Durchgangsbreite zu sehr einschränken, außerdem führen anbetonierte Treppenläufe zu deutlichen Wärmebrücken. Schließlich erhöht sich im Allgemeinen die wärmeabgebende Oberfläche des Gebäudes, so dass eine Abgrenzung des Treppenhauses aus der thermischen Hülle auch geometrisch die ungünstigere Variante darstellt.

An der Außenwand des Gebäudes kann die thermische Hülle in der Regel leicht um das Treppenhaus herumgeführt und so die Hüllfläche minimiert werden.

### 2.3.3 Fenster und Türen

An die Treppenhausfenster werden die gleichen Anforderungen wie an die übrigen Fenster des Gebäudes gestellt, so dass hier keine Besonderheiten zu berücksichtigen sind. Unter Umständen können aus Brandschutzgründen offenbare Fenster erforderlich sein, die üblicherweise ohnehin vorhanden sind.

Die Haustür muss entsprechend dem geplanten energetischen Standard gewählt werden. Bei Einsatz von Passivhaus-Komponenten ist die Verwendung einer hoch-dämmenden Haustür wichtig. Der wärmebrückenarme Einbau in die Außendämmung der Wand ist besonders im Bereich der unteren Türschwelle nicht einfach. Hier kann ein Streifen aus Purenit als dämmende und gleichzeitig druckfeste Ebene verwendet werden.

Weiterhin ist auf eine gute Luftdichtheit zu achten, denn eine undichte Haustür kann in Verbindung mit Leckagen im oberen Teil des Treppenhauses zu hohen Luftvolumenströmen gegen außen aufgrund des thermischen Antriebs führen. In [PHI 2009] wird eine Mindestluftdichtigkeit nach DIN EN 12207 von mindestens Klasse 3 empfohlen. Dort sind auch weitere Hinweise zur Verbesserung der Luftdichtheit zu finden.

Bei Kellertüren sollte besonders bei einer Modernisierung mit Passivhaus-Komponenten auf einen U-Wert der Kellertür von  $<1,2 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  geachtet werden. Auch hier ist die luftdichte Ausführung wichtig, damit keine ggf. geruchsbelastete Kellerluft in das Treppenhaus gelangt.

Wird das Treppenhaus in die thermische Hülle integriert, werden an die Wohnungstüren keine besonderen energetischen Anforderungen gestellt. Günstig ist jedoch ein Mindestmaß an Dichtheit der Türen zum Treppenhaus, um den Luftaustausch zwischen Treppenhaus und Wohnungen zu minimieren, damit nicht z. B. Essensgerüche aus einer Wohnung in das Treppenhaus ziehen. Beim Einsatz einer balancierten Lüftung mit Wärmerückgewinnung sind auch hier strenger Anforderungen zu stellen.

---

<sup>1</sup> Im Rahmen dieses Programms ist eine Förderung von kommunalen Wohngebäuden sowie ausgewählte Nichtwohngebäuden möglich

### 2.3.4 Treppenhauskopf

Bei Bestandsgebäuden führt das Treppenhaus vom obersten Geschoss oft zum nicht ausgebauten Dachgeschoss mit Trockenboden. Wenn dieser erhalten bleiben soll, ist der Treppenhauskopf, entsprechend dem gewählten energetischen Standard möglichst lückenlos zu isolieren. Je nach Modernisierungsumfang ist dabei vor allem der obere Abschluss schwierig zu dämmen, da der Raum zwischen Deckenkonstruktion und Dachziegeln meist sehr begrenzt ist. Hier müssen Materialien mit niedriger Wärmeleitfähigkeit eingesetzt werden, um die Wärmeverluste möglichst effektiv zu reduzieren.

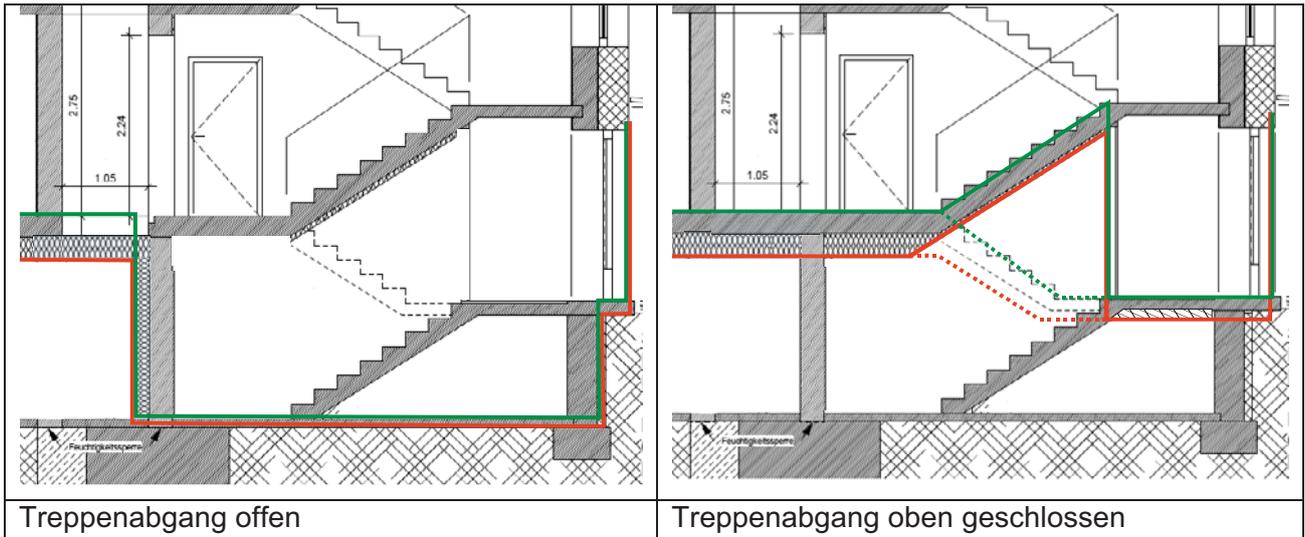
Bei einem ausgebauten Dachgeschoss sollte der Treppenhauskopf zusammen mit den Wohnräumen im Dachgeschoss von außen gedämmt werden. Auch hier muss auf eine ausreichende Dämmung der Treppenhausdecke geachtet werden. Gegebenenfalls kann zusätzlich zu einer Dämmung der Treppenhausdecke unter der Dacheindeckung über eine zusätzliche Innendämmung der Treppenhausdecke nachgedacht werden. Diese Lösung ist jedoch einerseits energetisch ungünstiger, da vermehrt Wärmebrücken auftreten, andererseits besteht bauphysikalisch ein größeres Risiko, da am oberen Ende des Treppenhauses im Allgemeinen ein Überdruck gegen außen herrscht, so dass die Gefahr des Eintrags von feuchtwarmer Luft in Fugen nach außen besteht, was zu Bauschäden führen kann. Im Treppenhauskopf ist somit besonders auf die Luftdichtigkeit zu achten.

Wird im Rahmen einer umfassenden Modernisierung das alte Dachgeschoss durch ein zusätzliches Stockwerk ergänzt, so wird das Treppenhaus in die Aufstockung integriert. Dies stellt energetisch die einfachste Lösung dar.

### 2.3.5 Hauseingang / Treppenabgang zum Keller

Besondere Beachtung sollte dem Treppenabgang, d. h. der Verbindung zwischen Wohngeschossen und unbeheiztem Keller geschenkt werden. Dieser liegt meist zusammen mit der Treppe zu den Obergeschossen in einem Treppenhaus und ist Teil der Trennfläche der thermischen und luftdichten Hülle des Gebäudes nach unten. Hier ist das Entwickeln einer optimalen Lösung, wie sie z. B. in [Hasper 2007] mit dem Schwerpunkt auf Neubauten diskutiert wird (zusätzliche Schleusen, schlecht Wärme leitende Baustoffe, umlaufende Einhausung), bei Bestandsgebäuden kaum möglich. Aus diesem Grund muss auf eine Reduktion der Wärmeverluste über die Flächen und über Wärmebrücken geachtet werden. Es sind mehrere Ausführungen dieses Kellerabgangs zu unterscheiden, hier soll der offene Kellerabgang sowie der oben mit einer Tür verschlossene Kellerabgang betrachtet werden.

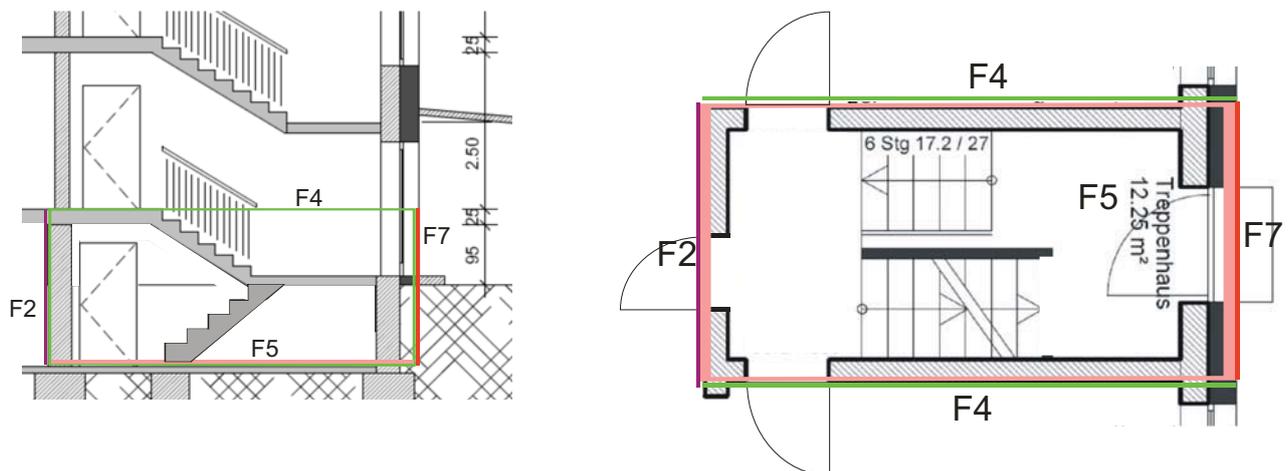
Die unterschiedliche Lage der Bezugsebene dieser Varianten ist in Abb. 2-4 dargestellt. Im linken Bild ist die Situation mit offenem Treppenabgang zu sehen. In Rot ist die Ebene dargestellt, die berücksichtigt werden muss, wenn mit Außenmaßen bilanziert werden soll (für Berechnung mit PHPP empfohlen), in Grün ist die Bezugsebene gemäß EnEV auf dem Rohfußboden des EG dargestellt. Die rechte Abbildung zeigt die Lage der thermischen Hülle im Treppenhausbereich für den oben geschlossenen Kellerabgang.



**Abb. 2-4:** Lage der thermischen Hülle bei offenem und oben geschlossenem Kellerabgang - rot: Außenmaß, grün: EnEV-Maß

### Offener Kellerabgang

Bei dieser Ausführung führt das Treppenhaus aus den oberen Geschossen direkt, ohne trennende Türen oder Wände in das unbeheizte Kellergeschoss. Die thermische Hülle des Gebäudes wird nach unten verlängert, die Kellertüren und Trennwände im Vorraum zum Keller bilden ihren unteren Abschluss. Diese Variante ist geometrisch relativ einfach (die thermische Hülle wird um ein Quader nach unten verlängert), besitzt aber die größere Wärme abgebende Fläche. Bedeutende Wärmebrücken sind vor allem die Anbindung der Treppenhauswände im Keller an den Kellerboden sowie der Aufsatzpunkt der Treppe auf den Kellerboden, wenn diese aus Beton oder vergleichbaren Materialien hergestellt ist.



**Abb. 2-5:** Zusätzliche Flächen der thermischen Hülle bei offenem Kellerabgang Schnitt: links, Draufsicht: rechts

Abb. 2-5 zeigt die zusätzlichen Flächen der thermischen Hülle des Gebäudes. Da diese Variante geometrisch einfacher ist, sind nur die Flächen F2, F4, F5, F7 und F8 vorhanden. In Tab. 2-4 sind die unterschiedlichen Flächen beschrieben und ihre Größe im Mustergebäude für den unsanierten Ist-Zustand, eine EnEV-Modernisierung sowie eine Modernisierung mit PH-Komponenten dargestellt. Die zusätzliche Wärme abgebende Fläche liegt zwischen  $58,7 \text{ m}^2$  und  $63,6 \text{ m}^2$ .

Tab. 2-4: Flächen des offenen Treppenabgangs

|       |  | unsaniert      | EnEV           | PH-Komponenten |
|-------|--|----------------|----------------|----------------|
|       |  | m <sup>2</sup> | m <sup>2</sup> | m <sup>2</sup> |
| F2    | Kellerwand tragend (Stirnseite)        | 5,55           | 6,05           | 6,05           |
| F4    | Treppenhaus an Keller                  | 23,35          | 24,45          | 25,05          |
| F5    | Treppenhausboden                       | 16,18          | 17,97          | 18,35          |
| F7a   | Außenwand an Treppenhaus (oberirdisch) | 3,13           | 3,34           | 3,34           |
| F7b   | Außenwand an Treppenhaus (im Erdreich) | 4,80           | 5,12           | 5,12           |
| F8    | Kellertür (3 Stk)                      | 5,70           | 5,70           | 5,70           |
| Summe |  | 58,71          | 62,63          | 63,61          |

Aufwändiger ist die Untersuchung der Wärmebrücken dieses Treppenabgangs. In Abb. 2-6 sind sie mit den Nummern 1-5 und 9-12 dargestellt. Es wurde unterstellt, dass am Fuß des Treppenhauses drei Türen zu den Kellerräumen führen.

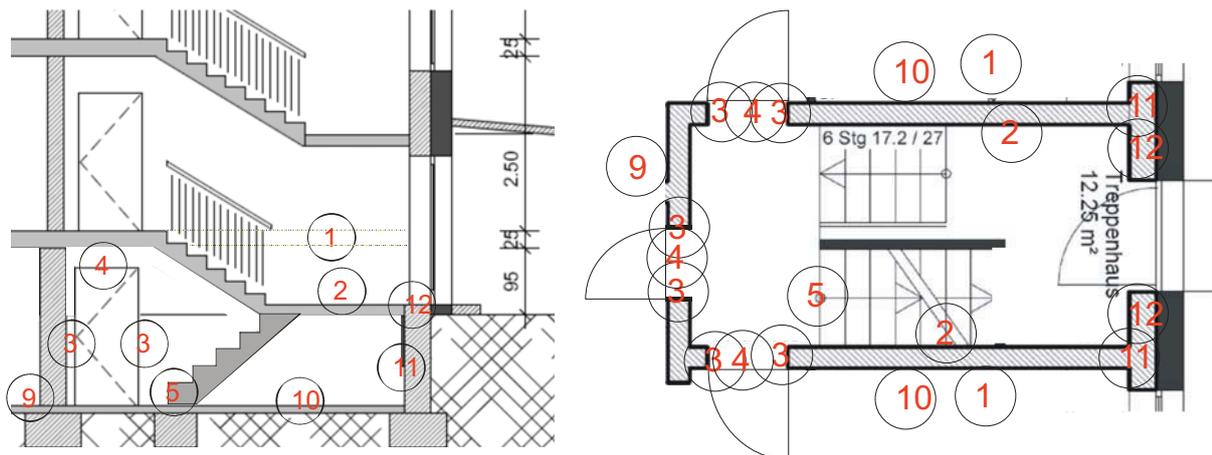


Abb. 2-6: Lage der Wärmebrücken beim offenem Kellerabgang Schnitt: links, Draufsicht: rechts

Tab. 2-5 enthält die Liste der Wärmebrücken, die zugehörigen Längen exemplarisch für die Variante mit Passivhaus-Komponenten sowie die  $\Psi$ -Werte der Wärmebrücken. Auch hier wurde unterschieden zwischen unsaniertem Ist-Zustand, EnEV-Modernisierung und Modernisierung mit PH-Komponenten. Außerdem enthält die Tabelle die spezifischen Transmissionswärmeverlustkoeffizienten  $H_{WB}$  für die verschiedenen Wärmebrücken. Bei der Berechnung wurden die Temperaturkorrekturfaktoren für Wärmeverluste gegen Keller oder Erdreich bereits berücksichtigt (Tab. 5-1 in Kapitel 5.1). Für den unsanierten Ist-Zustand ergibt sich ein negativer Wärmeverlust von  $-2,3 \text{ W/K}$ , da durch die Bilanzierung mit Außenabmessungen der Bauteile die Verluste überschätzt werden und die Wärmebrückenberechnungen diese Überschätzung korrigieren. Im Anhang II sind die einzelnen Wärmebrücken nochmals schematisch dargestellt.

Anders ist die Situation bei den energetisch modernisierten Varianten. Hier liegen die zusätzlichen Wärmeverluste an den Wärmebrücken zwischen  $2,7 \text{ W/K}$  (EnEV) und  $3,4 \text{ W/K}$  (PH-Komponenten), d. h. es treten an den Wärmebrücken zusätzliche Verluste auf.

**Tab. 2-5: Wärmebrücken am offenen Treppenabgang: Darstellung der Längen (sind für die Variante mit Passivhaus-Komponenten angegeben) und Wärmeverluste bei unterschiedlichen energetischen Standards**

| Nr.   | Schnittrichtung | Beschreibung des Details / Anschlusses                            | Länge der Wärmebrücke je Treppenhaus [m] | unsaniert                | EnEV                     | PH-Komp.                 | unsaniert         | EnEV              | PH-Komp.          |
|-------|-----------------|---|--|--------------------------|--------------------------|--------------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
|       |                 |   |  | $\Psi$ -Wert<br>[W/(mK)] | $\Psi$ -Wert<br>[W/(mK)] | $\Psi$ -Wert<br>[W/(mK)] | $H_{WB}$<br>[W/K] | $H_{WB}$<br>[W/K] | $H_{WB}$<br>[W/K] |
| 1     | Vertikal        | Treppenhauswand an Kellerdecke                                    | 10,86                                    | 0,379                    | 0,034                    | 0,142                    | 0,796             | 0,117             | 0,510             |
| 2     | Vertikal        | Treppenhauspodest und Treppe an Treppenhauswand                   | 6,78                                     | 0,229                    | 0,007                    | 0,005                    | 0,301             | 0,015             | 0,012             |
| 3     | Horizontal      | Kellertür an Treppenhauswand zum kalten Keller                    | 12,00                                    | 0,113                    | 0,118                    | 0,099                    | 0,263             | 0,451             | 0,396             |
| 4     | Horizontal      | Kellertür an Kellerdecke  | 2,85                                     | 0,232                    | 0,144                    | 0,122                    | 0,128             | 0,131             | 0,116             |
| 5     | Vertikal        | Treppenpodest an Kellerboden                                      | 1,20                                     | 0,236                    | 1,105                    | 1,105                    | 0,055             | 0,424             | 0,440             |
| 9     | Vertikal        | Tragende Kellerwand an Bodenplatte                                | 3,18                                     | -1,506                   | 0,366                    | 0,392                    | -0,928            | 0,372             | 0,414             |
| 10    | Vertikal        | Kellerwand an Bodenplatte   | 11,26                                    | -0,611                   | 0,289                    | 0,354                    | -1,334            | 1,042             | 1,322             |
| 11    | Horizontal      | Treppenhauswand von Treppenpodest bis zur Höhe der Kellerdecke an | 1,05                                     | -0,351                   | 0,015                    | 0,024                    | -0,207            | 0,009             | 0,014             |
| 12    | Vertikal        | Treppenpodest an Außenwand (links und rechts neben Haustür)       | 1,93                                     | -1,254                   | 0,151                    | 0,147                    | -1,356            | 0,163             | 0,159             |
| Summe |                 |   | 51,11                                    |                          |                          |                          | -2,28             | 2,72              | 3,38              |

Die Dämmung des Kellerbodens im Treppenhaus (F5) wirft besondere Fragen auf. Sie ist zwar grundsätzlich möglich, es entsteht dadurch aber ein Absatz an der letzten Treppenstufe zum Kellerboden, der kleiner ist als die übliche Treppenhöhe, was nur begrenzt zulässig ist. Außerdem entsteht im Bereich der Kellertüren ein weiterer Absatz, ggf. müssen die Kellertüren gekürzt werden. Aufgrund der Temperaturschichtung im Treppenhaus, die sich zumindest einstellt, wenn sowohl Gebäude als auch Kellertüren ausreichend dicht sind, stellt sich hier die Frage, ob der Aufwand einer adäquaten Energieeinsparung gegenübersteht. In Kapitel 5 wird auf die zu erwartende Kellertemperatur im offenen Treppenhaus vertieft eingegangen. Bei den oben angegebenen Wärmeverlusten wurde der Kellerboden mit einer 3 cm dicken Verbundplatte mit Vakuumisulationspaneelen (1,5 cm stark) gedämmt. Aufgrund der begrenzten Fläche kann der Einsatz der Vakuumdämmung bezüglich der Kosten u. U. konkurrenzfähig sein, was jedoch im Einzelfall zu prüfen ist.

Zur Reduktion der Wärmeverluste des Kellerabgangs sollte geprüft werden, ob ein offener Treppenabgang zum Keller in einen geschlossenen mit oberseitiger Tür umgewandelt werden kann. Dazu wären eine Trennwand parallel zum Treppenlauf in den Keller (in hoch Wärme dämmendem Leichtbau möglich) sowie eine Tür zum Kellerabgang erforderlich. Bei der Umsetzung dieser Lösung kann es jedoch Begrenzungen durch die erforderlichen Abstandsflächen um die Kellertür geben.

Tab. 2-6 zeigt die spezifischen Wärmeverluste über Flächen und Wärmebrücken am offenen Treppenabgang des Modellgebäudes. Das unsanierte Gebäude liegt mit 45,3 W/K am höchsten, trotz nahezu gleicher Wärmebrückensituation schneidet die PH-Variante mit 18,1 W/K aber besser als die EnEV-Variante ab (19,8 W/K), da die Flächen teilweise besser gedämmt werden.

**Tab. 2-6: Spezifische Wärmeverluste am offenen Treppenabgang**

|     |  | unsaniert    | EnEV         | PH-Komponenten |
|-----|--|--------------|--------------|----------------|
|     |  | $H_{Tr}$     | $H_{Tr}$     | $H_{Tr}$       |
|     |  | W/K          | W/K          | W/K            |
| F2  | Kellerwand tragend (Stirnseite)        | 2,24         | 1,08         | 0,97           |
| F4  | Treppenhaus an Keller                  | 12,36        | 4,43         | 4,23           |
| F5  | Treppenhausboden                       | 20,89        | 4,08         | 4,32           |
| F7a | Außenwand an Treppenhaus (oberirdisch) | 1,58         | 0,46         | 0,27           |
| F7b | Außenwand an Treppenhaus (im Erdreich) | 6,99         | 1,24         | 1,24           |
| F8  | Kellertür (3 Stk)                      | 3,49         | 5,75         | 3,71           |
|     | Wärmebrücken                           | -2,28        | 2,72         | 3,38           |
|     | <b>Summe</b>                           | <b>45,26</b> | <b>19,77</b> | <b>18,13</b>   |

Für eine vereinfachte Betrachtung können die Wärmeverluste des Treppenabgangs in einen äquivalenten U-Wert der Kellerdecke umgerechnet werden. Dabei wird für das gesamte Innenmaß des Treppenhauses (hier 11,75 m<sup>2</sup>) eine durchgehende Kellerdecke im Erdgeschoss angesetzt und die gesamten Verluste (über Flächen und Wärmebrücken) zwischen Oberkante EG-Fußboden und unterem Ende des offenen Treppenhauses (Oberkante Bodenplatte) in einen äquivalenten U-Wert umgerechnet. Die Haustür bleibt von dieser Betrachtung ausgenommen, da diese in der normalen Energiebilanzberechnung bereits enthalten ist.

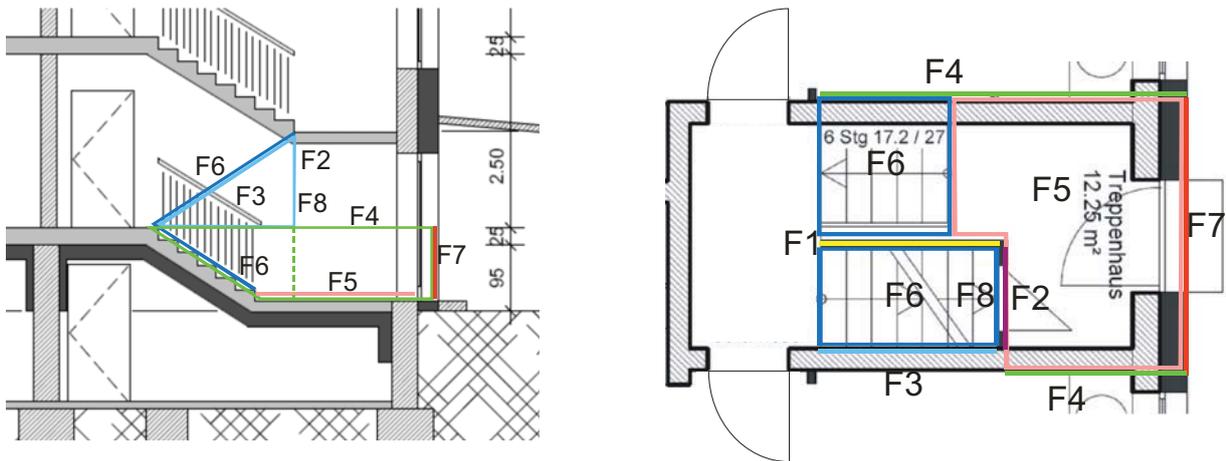
Es ergibt sich ein U-Wert von 3,23 W/(m<sup>2</sup>K) im unsanierten Ist-Zustand, von 1,41 W/(m<sup>2</sup>K) bei der EnEV-Modernisierung und 1,29 W/(m<sup>2</sup>K) bei der Modernisierung mit PH-Komponenten.

#### Vergleich mit der Literatur

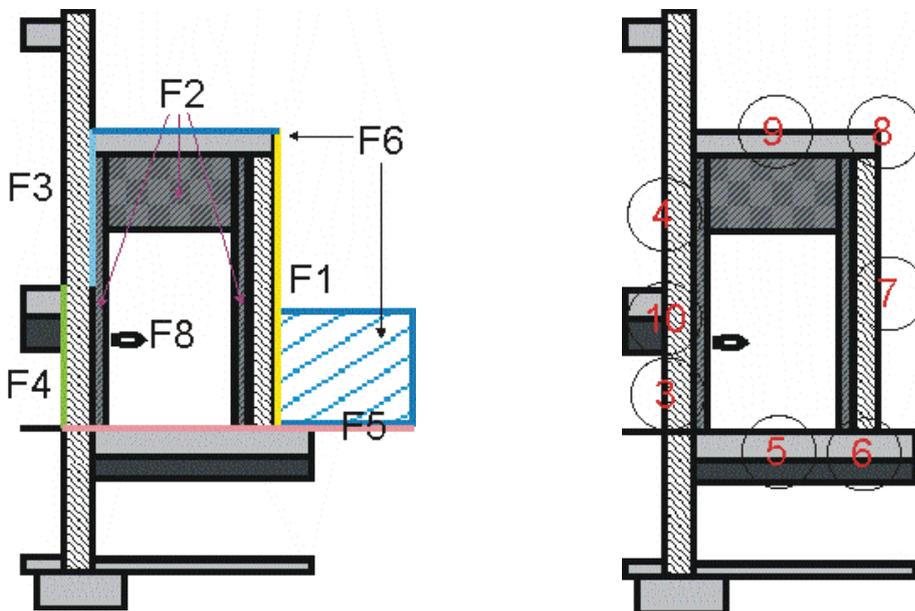
In [IBH 2010] sind für Neubauten mit offenen Kellerabgängen die Transmissionswärmeverluste berechnet worden. Als pauschaler Zuschlag für einen offenen Kellerabgang wird dort ein zusätzlicher Transmissionswärmeverlust von 28 W/K beim Übermessen des Kellerabgangs vorgeschlagen. Dieser Wert liegt über denjenigen, die oben für die unterschiedlichen, energetisch modernisierten Standards im Bestand ermittelt wurden. Allerdings wurde in der Untersuchung von [IBH 2010] mit den pauschalen Tempertur-Korrekturfaktoren gegen unbeheizte Räume nach DIN V 4108-6 gerechnet, die ungünstiger liegen als die detailliert nach DIN EN ISO 13370 bestimmten Korrekturfaktoren dieser Untersuchung (siehe auch Tab. 5-1). Somit sind die Abweichungen plausibel.

### Geschlossener Kellerabgang (oben geschlossen)

Beim geschlossenen Kellerabgang mit oben liegender Kellertür sind die Wärme abgebenden Flächen meist kleiner, dafür stellt dies den geometrisch komplizierteren Fall dar, da es eine Reihe von kleinen, zusätzlichen Flächen zwischen der thermischen Hülle und dem Keller gibt, außerdem ist die Anzahl der zu berücksichtigenden Wärmebrücken höher. Abb. 2-7 und Abb. 2-8 (links) zeigen die zusätzliche Flächen F1 bis F8 der thermischen Hülle am oben geschlossenen Kellerabgang.



**Abb. 2-7:** Zusätzliche Flächen der thermischen Hülle bei oben geschlossenem Kellerabgang; Schnitt: links, Draufsicht: rechts



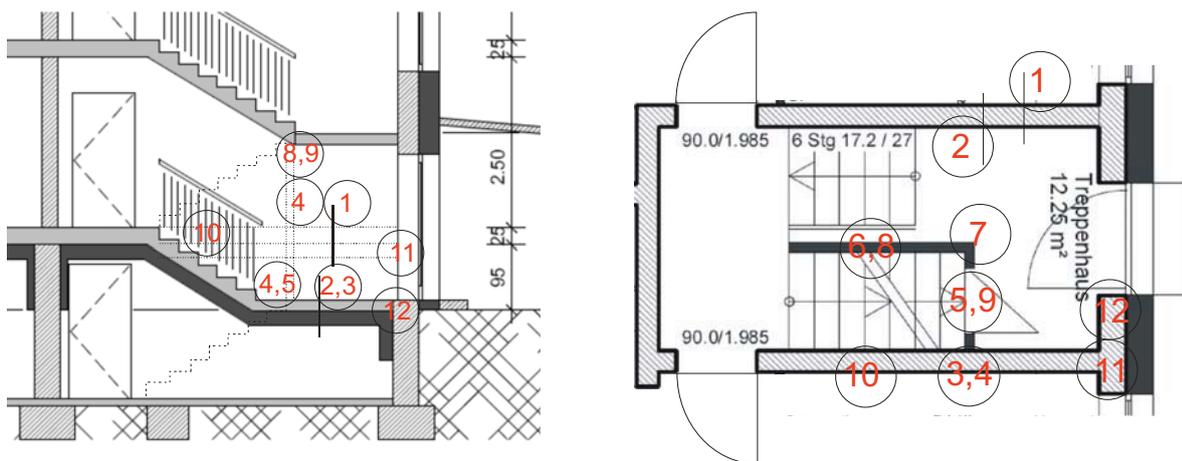
**Abb. 2-8:** Detailansicht der Kellertür mit zusätzlichen Flächen (links) und Lage der Wärmebrücken (rechts)

In Tab. 2-7 sind die Flächen des geschlossenen Kellerabgangs aufgelistet und für die Varianten unsanierter Ist-Zustand, EnEV-Moderenisierung sowie Modernisierung mit Passivhaus-Komponenten ihrer Größe nach angegeben.

**Tab. 2-7: Flächen des geschlossenen Treppenabgangs**

|    |                                     | unsaniert      | EnEV           | PH-Komponenten |
|----|-------------------------------------|----------------|----------------|----------------|
|    |                                     | m <sup>2</sup> | m <sup>2</sup> | m <sup>2</sup> |
| F1 | Treppenhauswand zum Kellerabgang    | 1,94           | 1,94           | 1,94           |
| F2 | Wand um Kellertür                   | 1,58           | 1,38           | 1,38           |
| F3 | Wand linke Wohnung zum Kellerabgang | 1,74           | 1,69           | 1,69           |
| F4 | Treppenhaus an Keller               | 4,79           | 5,04           | 5,29           |
| F5 | Fläche Eingangspodest (inkl AW)     | 5,77           | 6,09           | 6,09           |
| F6 | Treppe an Keller                    | 6,08           | 5,87           | 5,87           |
| F7 | Außenwand an Eingangsbereich        | 3,13           | 3,13           | 3,13           |
| F8 | Kellertür                           | 1,90           | 1,90           | 1,90           |
|    | Summe                               | 26,91          | 27,04          | 27,29          |

Am geschlossenen Treppenabgang wurden 12 Wärmebrücken identifiziert, die in Abb. 2-8 rechts und in Abb. 2-9 eingezeichnet sind. Im Anhang II sind die einzelnen Wärmebrücken nochmals schematisch dargestellt.

**Abb. 2-9: Wärmebrücken am oben geschlossenen Kellerabgang; links Schnitt, rechts Draufsicht**

Die Länge und  $\Psi$ -Werte der Wärmebrücken der unterschiedlichen Standards sowie die spezifischen Wärmeverluste über die Wärmebrücken sind in Tab. 2-8 zu finden. Die Gesamtlänge der Wärmebrücken beträgt bei dem oben geschlossenen Treppenabgang 28,5 m und somit nur 56 % der Wärmebrücken am offenen Kellerabgang. Die spezifischen Wärmeverluste durch die Wärmebrücken liegen zwischen -1,7 W/K beim unsanierten Ist-Zustand und 1,1 W/K bei der EnEV-Modernisierung bzw. 1,3 W/K bei der Modernisierung mit PH-Komponenten.

**Tab. 2-8: Wärmebrücken am geschlossenen Treppenabgang, Längen (die Längen sind für die Variante mit Passivhaus-Komponenten angegeben) und Wärmeverluste bei unterschiedlichen energetischen Standards**

| Nr.   | Schnittrichtung | Beschreibung des Details / Anschlusses                                 | Länge der Wärmebrücke je Treppenhaus [m] | unsaniert                | EnEV                     | PH-Komp.                 | unsaniert         | EnEV              | PH-Komp.          |
|-------|-----------------|--|--|--------------------------|--------------------------|--------------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
|       |                 |  |  | $\psi$ -Wert<br>[W/(mK)] | $\psi$ -Wert<br>[W/(mK)] | $\psi$ -Wert<br>[W/(mK)] | $H_{WB}$<br>[W/K] | $H_{WB}$<br>[W/K] | $H_{WB}$<br>[W/K] |
| 1     | Vertikal        | Treppenhauswand an Kellerdecke (linke und rechte Seitenwände des       | 5,75                                     | 0,129                    | -0,054                   | -0,055                   | 0,155             | -0,102            | -0,108            |
| 2     | Vertikal        | Treppenhauspodest und Treppe an Treppenhauswand unten                  | 6,24                                     | -0,380                   | 0,206                    | 0,253                    | -0,492            | 0,423             | 0,542             |
| 3     | Horizontal      | Kellertür an Treppenhauswand zum kalten Keller (linke Seite Kellertür) | 1,05                                     | -0,003                   | 0,299                    | 0,208                    | -0,001            | 0,103             | 0,075             |
| 4     | Horizontal      | Kellertür an Treppenhauswand zur EG Wohnung (linke Seite Kellertür)    | 1,45                                     | -0,022                   | 0,247                    | 0,256                    | -0,007            | 0,118             | 0,127             |
| 5     | Vertikal        | Treppenpodest an Kellerabgang im Bereich der Kellertür unten           | 1,12                                     | 0,118                    | 0,568                    | 0,584                    | 0,028             | 0,209             | 0,224             |
| 6     | Vertikal        | Seitenwand Treppenabgang (zum Keller) an Treppenpodest                 | 1,93                                     | -0,083                   | 0,177                    | 0,213                    | -0,033            | 0,112             | 0,141             |
| 7     | Horizontal      | Anschluss Kellertür an seitliche (rechte) Wand des Kellerabgangs       | 2,00                                     | 0,219                    | 0,166                    | -0,020                   | 0,091             | 0,109             | -0,014            |
| 8     | Vertikal        | Seitenwand Treppenabgang (zum Keller) an Treppe zum OG                 | 2,63                                     | -0,177                   | -0,048                   | -0,095                   | -0,097            | -0,042            | -0,085            |
| 9     | Vertikal        | Treppe zum OG an Bereich über Kellertür                                | 1,12                                     | -0,881                   | -0,227                   | -0,176                   | -0,205            | -0,083            | -0,068            |
| 10    | Vertikal        | Kellerdecke im Bereich des Kellerabgangs (Wohnung gegen Keller)        | 2,20                                     | -0,236                   | 0,246                    | 0,226                    | -0,108            | 0,178             | 0,170             |
| 11    | Horizontal      | Treppenhauswand von Treppenpodest bis zur Höhe der Kellerdecke an      | 1,05                                     | -0,384                   | 0,015                    | 0,034                    | -0,226            | 0,009             | 0,020             |
| 12    | Vertikal        | Treppenpodest an Außenwand (links und rechts neben Haustür)            | 1,93                                     | -0,775                   | 0,025                    | 0,240                    | -0,838            | 0,028             | 0,259             |
| Summe |                 |  | 28,47                                    |                          |                          |                          | -1,732            | 1,061             | 1,284             |

Die gesamten Wärmeverluste des oben geschlossenen Treppenabgangs (siehe Tab. 2-9) summieren sich unter Berücksichtigung der reduzierten Wärmeverluste gegen den unbeheizten Keller auf 21,7 W/K für den unsanierten Ist-Zustand – die Verluste betragen hier somit weniger als die Hälfte derjenigen des offenen Treppenabgangs. Bei der Variante mit EnEV-Modernisierung ergeben sich Verluste von 10,2 W/K (gegenüber 19,8 W/K beim offenen Kellerabgang). Die Modernisierung mit Passivhaus-Komponenten führt zu zusätzlichen Wärmeverlusten von 8,7 W/K, beim offenen Kellerabgang betrug er 18,1 W/K. Dies zeigt, dass der geschlossene Kellerabgang energetisch günstiger ist und besonders bei einer Modernisierung mit Passivhaus-Komponenten bevorzugt werden sollte, da neben den reduzierten Transmissionswärmeverlusten die luftdichte Ebene weniger Durchdringungen enthält.

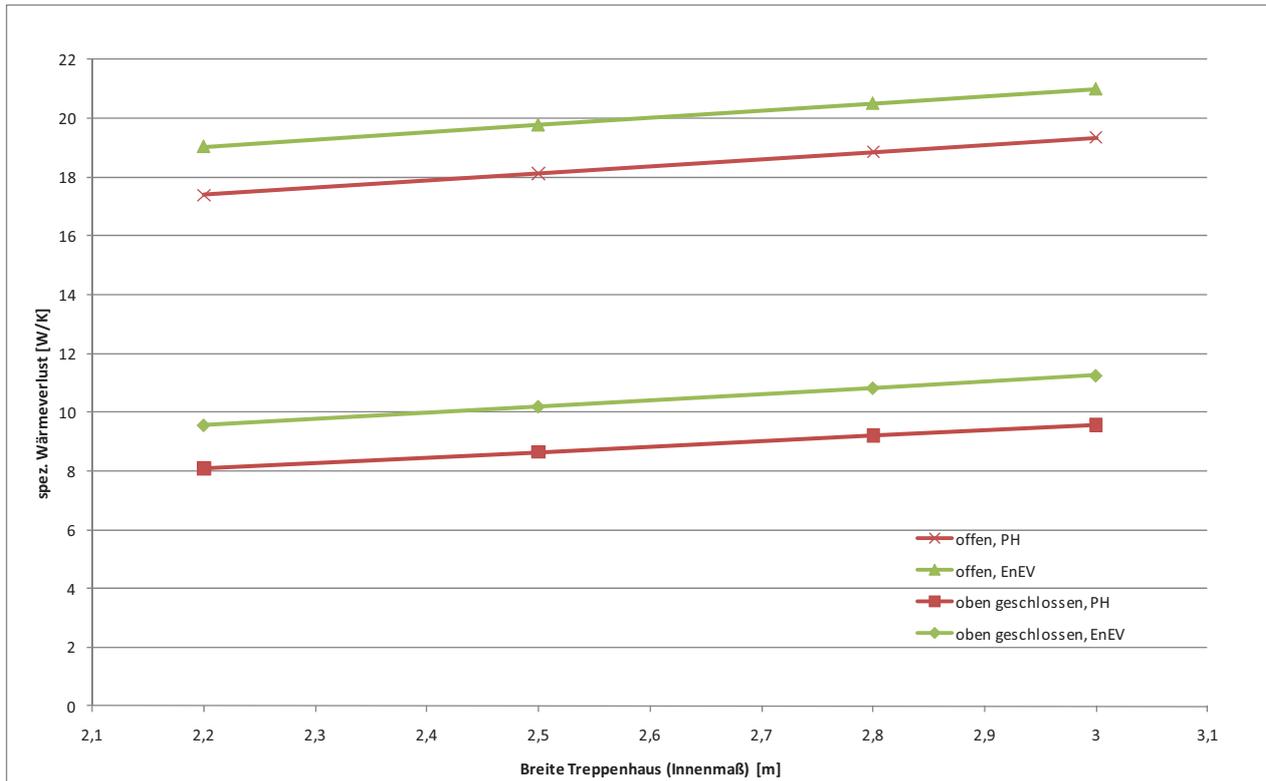
**Tab. 2-9: Spezifische Wärmeverluste des oben geschlossenen Treppenabgangs**

|    |                                     | unsaniert    | EnEV         | PH-Komponenten |
|----|-------------------------------------|--------------|--------------|----------------|
|    |                                     | $H_{Tr}$     | $H_{Tr}$     | $H_{Tr}$       |
|    |                                     | W/K          | W/K          | W/K            |
| F1 | Treppenhauswand zum Kellerabgang    | 1,70         | 1,33         | 1,38           |
| F2 | Wand um Kellertür                   | 1,39         | 0,93         | 0,97           |
| F3 | Wand linke Wohnung zum Kellerabgang | 0,97         | 0,40         | 0,41           |
| F4 | Treppenhaus an Keller               | 2,67         | 0,93         | 0,92           |
| F5 | Fläche Eingangspodest (inkl AW)     | 5,10         | 1,47         | 1,03           |
| F6 | Treppe an Keller                    | 5,37         | 1,42         | 0,99           |
| F7 | Außenwand an Eingangsbereich        | 4,56         | 0,75         | 0,42           |
| F8 | Kellertür                           | 1,63         | 1,92         | 1,24           |
|    | Wärmebrücken                        | -1,73        | 1,06         | 1,28           |
|    | <b>Summe</b>                        | <b>21,65</b> | <b>10,20</b> | <b>8,65</b>    |

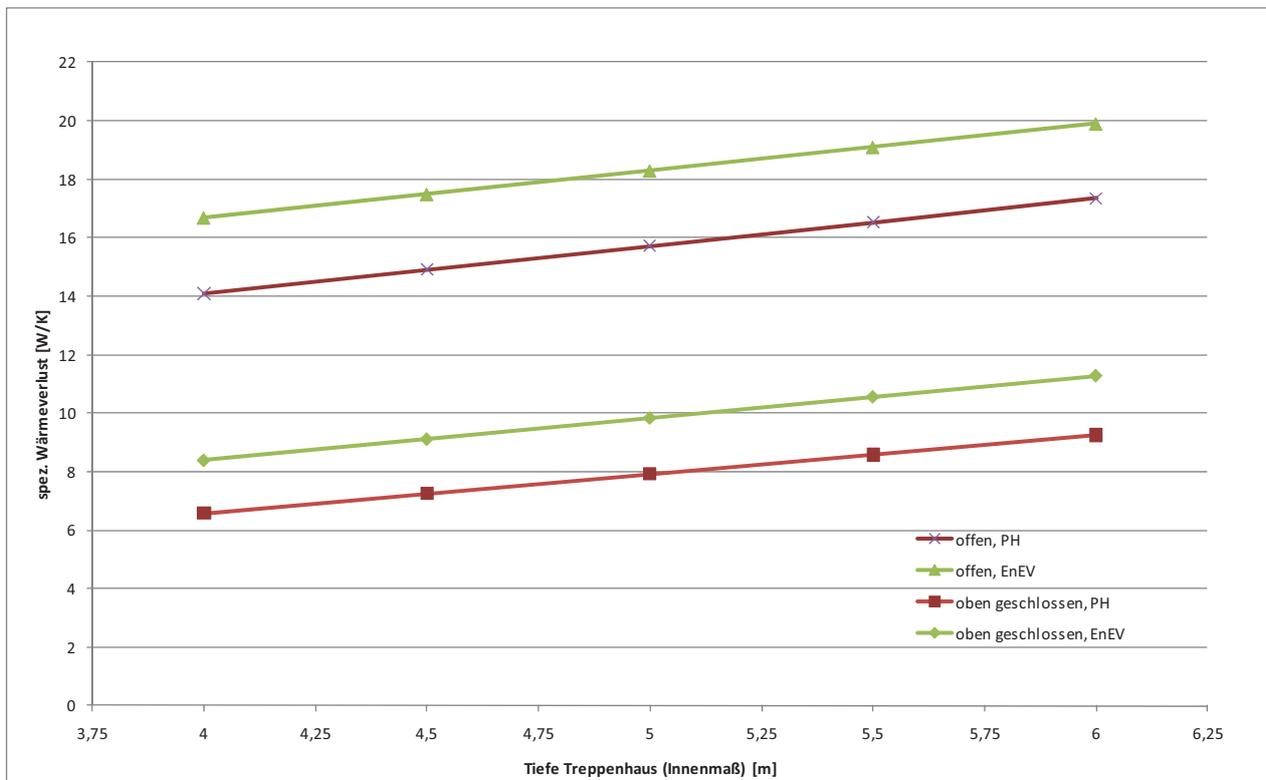
Bestimmt man einen äquivalenten U-Wert der Kellerdecke an Stelle des unteren Treppenhausabschlusses, so ergeben sich beim oben geschlossenen Kellerabgang für den unsanierten Ist-Zustand  $1,66 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ , für die EnEV-Modernisierung  $0,78 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  und für die Modernisierung mit Passivhaus-Komponenten  $0,66 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ .

#### Einfluss unterschiedlicher Treppenhaus-Geometrien

Im Folgenden sind die Einflüsse unterschiedlicher Abmessungen des Treppenhauses auf die Wärmeverluste am Hauseingang/Kellerabgang dargestellt. Variiert wurden einerseits die lichte Breite des Treppenhauses (Abb. 2-10), andererseits die lichte Tiefe des Treppenhauses (Abb. 2-11). Mit Hilfe dieser Diagramme können die Wärmeverluste für andere Geometrien am Treppenabgang angepasst werden.



**Abb. 2-10: Spez. Wärmeverlust am Kellerabgang in Abhängigkeit der Breite des Treppenhauses (Innenmaße)**



**Abb. 2-11: Spez. Wärmeverlust am Kellerabgang in Abhängigkeit der Tiefe des Treppenhauses (Innenmaße)**

### 3 Bilanzierung von Treppenhäusern

Je nach Berechnungsverfahren werden Treppenhäuser unterschiedlich in der Energiebilanz eines Gebäudes berücksichtigt, teilweise ist die Vorgehensweise auch nicht klar definiert oder es bieten sich unterschiedliche Möglichkeiten an.

Generell muss dabei unterschieden werden, ob der Kellerabgang geschlossen oder offen ausgeführt wird. Energetisch ist ein geschlossener Kellerabgang meist günstiger (siehe Kapitel 2.3.5), im Rahmen dieser Untersuchung sollen aber beide Varianten betrachtet werden.

#### 3.1 Energieeinsparverordnung (EnEV)

Die Energieeinsparverordnung regelt die energetische Effizienz von Neubauten sowie für Bestandsgebäude, bei denen wesentliche Änderungen an der Gebäudehülle durchgeführt werden [EnEV 2009]. Da die vorliegende Untersuchung für Gebäude durchgeführt wird, die einer wesentlichen energetischen Ertüchtigung unterzogen werden, sind die Regelungen der EnEV für Bestandsgebäude auch hier generell anzuwenden.

Die EnEV definiert die Gebäudenutzfläche  $A_N$  auf Basis des umbauten Gebäudevolumens  $V_e$ , worin auch Treppenhäuser eingeschlossen sein können, wenn sie beheizt oder als niedrig beheizt angesetzt werden und innerhalb des umbauten Volumens liegen.

Das Treppenhaus kann unterschiedlich in der Bilanz berücksichtigt werden (siehe Tab. 3-1):

**Tab. 3-1: Unterschiedliche Möglichkeiten der Bilanzierung/Modernisierung von Treppenhäusern**

| <i>Berücksichtigung Treppenhaus</i>                                       | <i>Erläuterung bzw. Vor- / Nachteile</i>  |
|---|---|
| Außerhalb der thermische Hülle  | wenn das Treppenhaus in die thermische Hüllfläche hineinragt, sind die Treppenhauswände wie Außenwände zu dämmen; dies reduziert im Bestand die freie Lauffläche der Treppe; es müssen die Wärmebrücken an den Treppenläufen sowie die Verluste der Treppenhauswände berücksichtigt werden; Wohnungstüren sind als Außentüren auszuführen |
| Mit dem zusätzlichen Wärmewiderstand des unbeheizten Treppenhauses        | Vereinfachte Betrachtung, die die U-Werte der Treppenhausinnen- und -außenwände sowie die den Luftaustausch berücksichtigt  |
| Als Raum reduzierter Temperatur innerhalb der thermischen Hülle (2 Zonen) | Realistischere Abschätzung der Wärmeverluste durch das Treppenhaus (je nach Berechnungsverfahren); höherer Aufwand für die Datenerhebung und Bilanzierung, da die Verluste zwischen Wohnung und Treppenhaus ermittelt werden müssen   |
| Als (beheizter) Raum innerhalb der thermischen Hülle                      | wenn die thermische Hülle um das Treppenhaus herum verläuft, unkomplizierteste Variante; die Wärmeverluste im Treppenhaus werden überschätzt, da mit der normalen Wohnraumtemperatur gerechnet wird   |

In dieser Untersuchung sollen die Vorteile einer vereinfachten Bilanzierung als beheizter Raum innerhalb der thermischen Hülle mit genaueren Bilanzierungsansätzen verglichen werden.

### Vereinfachte Betrachtung von Kellerabgängen

Eine mögliche Vereinfachung bei der Bilanzierung von Gebäuden für die Erstellung von Energiebedarfsausweisen ist das Übermessen des Kellertreppenabgangs. Dabei wird dieser nur mit der Fläche des ungestörten Bauteils – normalerweise der Kellerdecke – berücksichtigt. In [BMBVS 2009] bzw. [dena2009] wird dieses Übermessen bei der Erstellung von Energieausweisen oder Änderungen im Sinne des § 9 Abs. 1 EnEV ermöglicht. In Kapitel 2.3.5 wurde jedoch gezeigt, dass diese Vereinfachung abhängig vom energetischen Standard nur bedingt einsetzbar ist. Bei oben geschlossenem Kellerabgang ist ein Zuschlag zwischen 140 % (unsaniert) und 500 % (PH-Komponenten), beim offenen Kellerabgang zwischen 270 % (unsaniert) und 620 % (PH-Komponenten) zu berücksichtigen.

In [BMBVS 2007] wurde beim Übermessen eine Korrektur für den Berechnungsgang festgelegt, bei der für den Kellerabgang ein pauschaler Zuschlag von 50 W/K pro Kellerabgang auf den Transmissionswärmeverlust aufgeschlagen werden muss. Der für das Mustertreppenhaus berechnete Aufschlag lag im unsanierten Gebäude bei 21 W/K beim oben geschlossenen Kellerabgang und 45 W/K beim offenen Kellerabgang. Die mittlerweile zurückgezogene Regelung lag somit bei beiden Ausführungsvarianten auf der sicheren Seite. Zusätzlich sah die frühere Regelung eine Volumenerhöhung  $\Delta V_e$  von 35 m<sup>3</sup> je Kellerabgang vor, die ebenfalls nicht in die Neufassung [BMBVS 2009] übernommen wurde.

Werden keine Vereinfachungen bei der Bilanzierung nach EnEV verwendet, müssen auch die Normen berücksichtigt werden, auf die die EnEV verweist. An dieser Stelle sollen folgende Normen auf ihre Regelung zu Treppenhäusern untersucht werden:

### **Rechtliche Anforderungen**

#### DIN 4108-2:2003

Die DIN 4108-2 legt den Mindestwärmeschutz von Bauteilen fest. Für Wände zu einem Treppenhaus mit Innentemperaturen von  $\leq 10$  °C wird ein Wärmedurchlasswiderstand R von 0,25 m<sup>2</sup>K/W gefordert, bei Treppenhäusern mit reduzierten Temperaturen  $> 10$  °C wird ein R von 0,07 m<sup>2</sup>K/W gefordert. Die energetischen Mindestanforderungen sind somit als gering anzusehen.

Für Kellerdecken und Flächen gegen unbeheizte Hausflure muss der R-Wert bei 1,75 m<sup>2</sup>K/W liegen. Decken auf Erdreich müssen einem R-Wert von 0,90 m<sup>2</sup>K/W entsprechen.

#### DIN V 4108-6:2003

Die [DIN V 4108-6] bildete lange Zeit die alleinige Basis für die Berechnung der Wärmeverluste der Gebäudehülle nach EnEV.

Für Wärmeverluste über Flächen, die nicht an Außenluft grenzen, werden Temperaturkorrekturfaktoren  $F_x$  definiert, um die verringerten Wärmeverluste zu berücksichtigen. Die Werte stellen konservative Abschätzungen dar, die zu höheren Wärmeverlusten in der Bilanz führen als bei Anwendung der b-Werte nach DIN EN 13789. Für die Bilanzierung von Treppenhäusern sind folgende  $F_x$ -Werte relevant, die bei Flächen, die an das Erdreich grenzen aber nicht für die Monatsbilanzierung verwendet werden dürfen:

**Tab. 3-2: Auszug der Temperatur-Korrekturfaktoren  $F_{xi}$  [DIN V 4108-6]**

| Wärmestrom  | Faktor         | Temperatur-Korrekturfaktor $F_x$ |          |      |
|---|----------------|----------------------------------|----------|------|
|   |                | B' [m] <sup>a)</sup>             |          |      |
|   |                | <5                               | 5 bis 10 | >10  |
| Wände und Decken zu Abseiten  | $F_u$          | 0,8                              |          |      |
| Wände und Decken zu unbeheizten Räumen                                  | $F_u$          | 0,5                              |          |      |
| Wände und Decken zu niedrig beheizten Räumen                            | $F_{nb}$       | 0,35                             |          |      |
| Fußboden des beheizten Kellers  | $F_G$          | 0,45                             | 0,4      | 0,35 |
| Wand des beheizten Kellers  | $F_G$          | 0,6                              | 0,6      | 0,6  |
| Fußboden auf Erdreich ohne Randdämmung                                  | $F_G = F_{bf}$ | 0,6                              | 0,5      | 0,35 |
| Kellerdecke und –innenwand zum unbeheizten Keller mit Perimeterdämmung  | $F_G$          | 0,55                             | 0,5      | 0,45 |
| Kellerdecke und –innenwand zum unbeheizten Keller ohne Perimeterdämmung | $F_G$          | 0,7                              | 0,65     | 0,55 |
| Bodenplatte von niedrig beheizten Räumen                                | $F_G$          | 0,55                             | 0,55     | 0,35 |

a) B' ist das charakteristische Bodenplattenmaß ( $A_G/(0,5 \cdot P)$ ), die angegebenen Werte gelten jeweils für eine Wärmedurchlasswiderstand  $R_f$  bzw.  $R_w > 1$

Temperatur-Korrekturfaktoren für Flächen, die nicht an Außenluft grenzen, entsprechen dem b-Wert nach DIN EN ISO 13789 und berücksichtigen bei Bodenplatten und Kellerwänden nach DIN EN ISO 13370 [DIN EN ISO 13370] auch den instationären Anteil aufgrund des Jahresgangs der Außentemperatur.

Im Anhang D der Norm sind vereinfachte Korrekturfaktoren für das Heizperiodenverfahren angegeben (Tab. 3-3).

**Tab. 3-3: Auszug der Temperatur-Korrekturfaktoren  $F_{xi}$  (Heizperiodenverfahren) [DIN V 4108-6]**

| Wärmestrom   | Faktor $F_x$ | Temperatur-Korrekturfaktor |
|--|--------------|----------------------------|
| Wände und Decken zu unbeheizten Räumen   | $F_u$        | 0,5                        |
| Unterer Gebäudeabschluss (Kellerdecke zum unbeheizten Keller, Fußboden auf Erdreich, Flächen des beheizten Kellers auf Erdreich) | $F_G$        | 0,6                        |

Weiterhin zitiert die DIN V 4108-6 die Berechnung der Wärmeverluste über das Erdreich nach DIN EN ISO 13370, die weiter unten dargestellt ist.

DIN V 18599:2007

Die [DIN V 18599] bietet die Möglichkeit, die Wärmeverluste eines Gebäudes in unterschiedlichen Zonen abzubilden. Auf diese Weise können auch Bereiche mit reduzierter Temperatur (Treppenhäuser) realistischer in der Energiebilanz des Gebäudes berücksichtigt werden.

Im Teil 2 der Norm werden zwei Verfahren zur Bilanzierung von angrenzenden, unbeheizten Zonen definiert. Im vereinfachten Verfahren wird darauf verwiesen, dass unbeheizte Räume nach DIN EN 6946 als Aufschlag im U-Wert der beheizten Zonen berücksichtigt werden können. Diese vereinfachte Betrachtungsweise ist jedoch ungeeignet, um die in dieser Untersuchung angestrebten differenzierten Ergebnisse zu erzielen.

Ein anderer Ansatz zur Bilanzierung in der DIN V 18599 berechnet monatsweise die Temperaturen der unbeheizten Zone und anschließend die Wärmeverluste der Zone. Die Temperaturen können vereinfacht über den Reduktionsfaktor  $F_x$  aus Tabelle 3 der Norm entnommen werden. Als Anwendungsfälle nennt die Norm z. B. nicht beheizte Keller, nicht ausgebaute Dachgeschosse, aber auch nicht beheizte, angebaute Treppenhäuser. Durch den festen Reduktionsfaktor zur Differenz zwischen Innen- und Außentemperatur ist es jedoch nicht möglich, eine differenzierte Betrachtung für unterschiedliche energetische Standards durchzuführen.

Bei der differenzierten Berechnung wird die Mitteltemperatur der unbeheizten Zone aus den Wärmegewinnen, der Temperatur der angrenzenden beheizten Zone, den Wärmetransferkoeffizienten für Transmission und Lüftung sowie der Außentemperatur nach folgender Formel bestimmt.

$$\vartheta_u = \frac{\Phi_u + \vartheta_i * (H_{T,iu} + H_{V,iu}) + \vartheta_e * (H_{T,ue} + H_{V,ue})}{H_{T,iu} + H_{V,iu} + H_{T,ue} + H_{V,ue}} \quad (1)$$

Die Übergangswiderstände zur unbeheizten Zone sind nach DIN EN 6946 oder DIN EN ISO 10077-1 zu wählen.

Bei Zonen gegen Erdreich, die besonders am unteren Treppenabschluss von Bedeutung sind, ist  $H_{T,s}$  nach DIN EN ISO 13370 wie  $L_s$  (stationärer Leitwert) zu wählen, die Wärmeleitfähigkeit des Erdreichs ist mit 2 W/(mK) anzusetzen, wenn keine genaueren Daten vorliegen. Es ist auch möglich, den Wärmeverlust  $Q_{T,s}$  nach DIN EN ISO 13370 zu bestimmen, dann wird  $\Phi_{m,t}$  berechnet. Allerdings wird in der DIN V 18599:2007 noch auf die Fassung der DIN EN ISO 13370 von 1998 verwiesen, die mittlerweile novelliert und grundlegend überarbeitet wurde.

Das vereinfachte Verfahren liefert im Allgemeinen niedrigere Temperaturen für die unbeheizte Zone als die differenzierte Betrachtung.

Die Monatsbilanz wird für einen durchschnittlichen Tag je Monat durchgeführt, wobei als Randbedingungen durchschnittliche Tagesmittelwerte angesetzt werden müssen.

$$Q_{T,e} = \sum_j H_{T,D} * (\vartheta_i - \vartheta_j) * t \quad (2)$$

mit

$$H_{T,D} = \sum (U_j * A_j) + \Delta U_{WB} * \sum A_j \quad (3)$$

$H_{T,D}$  wird aus den U-Werten und Flächen der Bauteile nach DIN EN ISO 13789 und DIN EN ISO 13370 unter Berücksichtigung linien- und punktförmiger Wärmebrücken bestimmt. Die Wärmebrücken können auch pauschal angesetzt werden (analog zur EnEV). Bei hohem Wärmeschutz darf nicht mit den pauschalen Wärmebrückenzuschlägen  $\Delta U_{WB}$  gerechnet werden, sondern die  $\Psi$ -Werte sind gemäß DIN EN ISO 10211-1 mit den Randbedingungen aus DIN 4108 Bbl. 2 zu berechnen.

In Kapitel 5.2.1 wird das Berechnungsverfahren mit einer zweidimensionalen Wärmestromberechnung verglichen.

#### DIN EN ISO 13789:2008

Der Berechnungsansatz in DIN EN ISO 13789 zur Temperatur unbeheizter angrenzender Räume bei stationären Bedingungen entspricht weitgehend dem beschriebenen Ansatz der DIN V 18599 und wurde bei der Erstellung des vereinfachten Treppenhausmodells verwendet (siehe Kapitel 3.5).

#### DIN EN ISO 13370:2008

[DIN EN ISO 13370] beschreibt ein Berechnungsverfahren zur Bestimmung des Wärmeverlustes gegen Erdreich. Dabei wird berücksichtigt, dass das Erdreich unter dem Gebäude eine Pufferwirkung auf die jährliche Schwankung der Außentemperatur bewirkt. Das Verfahren wurde im Wesentlichen in das Passivhaus-Projektierungs-Paket übernommen, das in dieser Untersuchung zur vereinfachten Bestimmung der Wärmeverluste zum Erdreich bzw. zum unbeheizten Keller verwendet wurde.

## **3.2 Passivhaus-Projektierungs-Paket (PHPP)**

Das Passivhaus-Projektierungs-Paket [PHPP 2007] widmet dem Treppenhaus sowie dem Abgang in den Keller einen eigenen Abschnitt.

Nach PHPP können neben der reinen Wohnfläche nach Wohnflächenverordnung auch Keller- und Nebenräume, die nach Wohnflächenverordnung nicht als Wohnfläche gelten aber innerhalb der thermischen Hülle liegen und eine Raumhöhe von mindestens 2 m aufweisen, zu 60 % ihrer Fläche zur Energiebezugsfläche gezählt werden. Andererseits werden Flächen von Treppen mit mehr als drei Stufen und deren Treppenabsätze in Wohngebäuden ausdrücklich ausgeschlossen. Auch bei Nichtwohngebäuden werden Treppen und Aufzugsschächte explizit aus der Energiebezugsfläche ausgeschlossen. Somit dürfen nach PHPP Treppen innerhalb der thermischen Hüllfläche nicht für die Energiebezugsfläche nach PHPP angerechnet werden.

Im PHPP werden für unterschiedliche Ausführungen der Ankopplung des Treppenhauses an die thermische Hülle folgende Temperaturkorrekturfaktoren  $f_T$  vorgegeben (Tab. 3-4).

**Tab. 3-4: Reduktionsfaktoren  $f_T$  für Treppenhäuser nach [PHPP 2007]**

| Lage Treppenhaus im Gebäude und der thermischen Hüllfläche  | Wert für $f_T$ |
|---|----------------|
| vollständig innerhalb des Gebäudes und der thermischen Hülle  | 0,98           |
| vollständig innerhalb des Gebäudes, zu $\geq 2/3$ der Dämmung gegen außen und $\geq 1/2$ der Dämmung zwischen Treppenhaus und Wohnungen | 0,85           |
| vollständig innerhalb des Gebäudes aber außerhalb der thermischen Hülle   | 0,8            |
| vor dem Gebäude und innerhalb der thermischen Hülle   | 0,86           |
| vor dem Gebäude und außerhalb der thermischen Hülle   | 0,97           |

Die Berücksichtigung dieser Reduktionsfaktoren erfordert jedoch eine separate Bestimmung der betroffenen Flächen bzw. U-Werte, was den Bilanzierungsaufwand erhöht.

Für freie Öffnungsquerschnitte im Treppenhaus nach unten kann als einfache Abschätzung ein U-Wert der freien Öffnung von  $12 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  angesetzt werden [PHI 2005], der Luftaustausch über ein Treppenhaus mit offenem Abgang in eine Tiefgarage wurde messtechnisch zu maximal  $20 \text{ m}^3/\text{h}$  pro  $\text{m}^2$  freier Querschnittsfläche bestimmt.

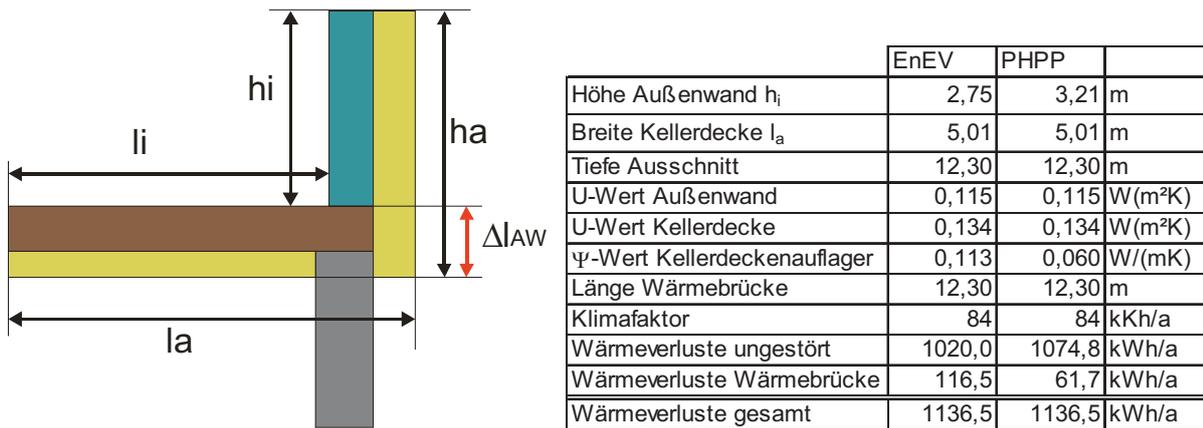
Grundsätzlich muss bei der Bilanzierung im Hinblick auf den Infiltrationsluftwechsel beachtet werden, welches Volumen belüftet wird. Die EnEV berechnet die Lüftungswärmeverluste – auch diejenigen durch Infiltration – auf Basis des umbauten Volumens mit einem festen Reduktionsfaktor von 0,8 (beim Heizperiodenbilanzverfahren), was bedeutet, dass das Volumen des Treppenhauses mit berücksichtigt ist, wenn dieses als innerhalb der thermischen Hülle liegend bilanziert wird. Beim PHPP wird normalerweise nur auf Basis der Energiebezugsfläche bilanziert, zu der Treppenhäuser nicht gehören. Im Blatt Lüftung wird dann eine Korrektur zwischen wirksamem Volumen  $V_L$  und dem in der luftdichten Hülle enthaltenen Volumen  $V_{50}$  durchgeführt, die Bilanzierung erfolgt dann aber mit dem geringeren Volumen  $V_L$ .

### 3.3 Maßbezüge und Vereinfachungen bei der Bilanzierung

Die [DIN EN ISO 13790] definiert, dass die Gebäudehülle oberhalb des Erdreichs mittels ebener und balkenförmiger Bauteile modelliert werden soll. Insbesondere für Treppenläufe bedeutet dies, dass sie mit ihrer Projektionsfläche in die Gebäudebilanz eingehen müssen. Als unterer Abschluss der Wärme abgebenden Gebäudehülle wird bei Böden auf Erdreich, Kriechböden und unbeheizten Kellern die Oberkante der Rohdecke des Erdgeschossfußbodens definiert, in der früheren Fassung (1999) war dies die Innenoberfläche des Erdgeschossfußbodens. Bei beheizten Kellern im Erdreich ist dies das äußere Erdbodenniveau. In gleicher Weise ist die Bezugslänge durch die EnEV definiert.

Davon abweichend wird für Passivhäuser der Außenmaßbezug – auch für den unteren Gebäudeabschluss – vorgeschlagen. So legt das [PHPP2007] die „Abmessungen der äußeren Schicht der Wärme übertragenden Hülle“ als Bezugsebene fest. In [Schnieders 2004] wird explizit für den unteren Abschluss des Gebäudes generell der Außenmaßbezug empfohlen.

Durch den veränderten Maßbezug ändert sich die Energiebilanz des Gebäudes nicht (Abb. 3-1): der geringere Wärmeverlust der vertikalen Außenwand bei EnEV-Bezug ( $\Delta I_{AW}$ ) wird durch einen höheren Zuschlag aus der Wärmebrückenberechnung berücksichtigt, so dass der geringere Wärmeverlust bei einem Bezug auf die Oberseite der Rohdecke (EnEV) kompensiert wird. Dies bedeutet aber, dass die  $\Psi$ -Werte des einen Maßsystems nicht direkt für das andere verwendet werden können.



**Abb. 3-1:** Unterschiedliche Maßbezüge am unteren Gebäudeabschluss nach EnEV (bzw. DIN EN ISO 13370)  $l_a$  und  $h_i$  sowie Außenmaß (PHPP)  $l_a$  und  $h_a$  sowie Vergleich der Gesamtwärmeverluste eines Gebäudeausschnitts am Kellerdeckenaufleger mit Längenbezug auf der Rohdecke (EnEV) und unterhalb der thermischen Hülle (PHPP)

In dieser Untersuchung wird, wenn nichts anderes festgelegt ist, die Bezugsebene der EnEV verwendet.

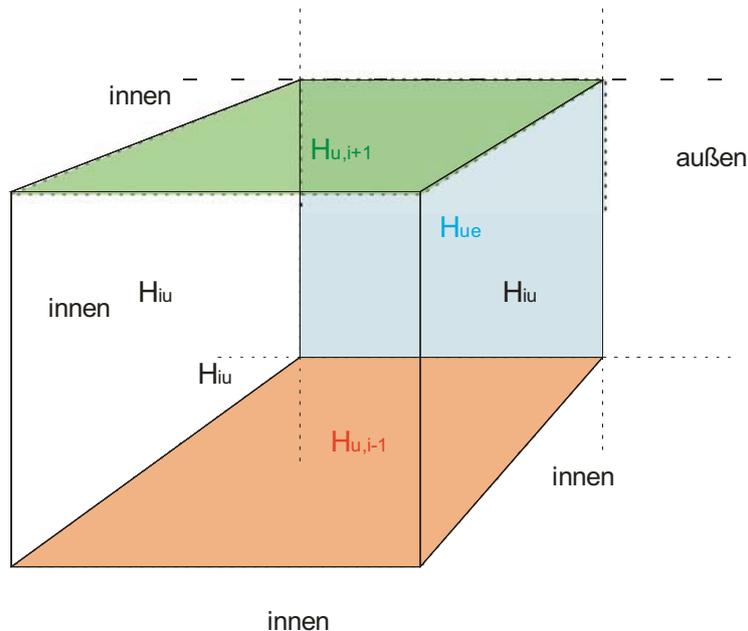
### 3.4 Modellierung mittels dynamischer Gebäudesimulation

Bei allen bisher genannten Berechnungsansätzen muss berücksichtigt werden, dass die komplexe Situation des Treppenhauses besonders im Bereich der Ankopplung zum Keller nur bedingt abgebildet werden kann. Dies gilt insbesondere für die Kopplung der Wärmeströme aus den angrenzenden Wohnungen mit der Ankopplung des Kellerabgangs sowie die Strahlungs- und Strömungsverhältnisse im Treppenhaus. Dynamische Gebäudesimulationsprogramme wie TAS oder TRNSYS können eingesetzt werden, um die Verhältnisse im Treppenhaus zeitlich höher aufgelöst und ggf. realistischer abzubilden. Dies gilt insbesondere für die Berücksichtigung der Speichermassen und die Reaktion des Gebäudes auf kurzfristige Schwankungen des Außenklimas.

Der Aufwand für die Eingabe und die Simulation ist in der Regel jedoch deutlich größer als bei statischen Berechnungsverfahren. Aus diesem Grund werden in Kapitel 5.3 die Ergebnisse der dynamischen Simulation des Mustergebäudes mit dem Programm TAS dargestellt und ein Vergleich zu dem vereinfachten Verfahren gezogen, das im folgenden Kapitel 3.5 dargestellt ist. Ziel dieser Berechnungen ist es, das vereinfachte Verfahren zu kalibrieren, um anschließend damit unkompliziert Varianten des Gebäudes abbilden zu können.

### 3.5 Vereinfachtes Modell des Treppenhauses bei der energetischen Bilanzierung

Um unterschiedliche Ausführungen des Treppenhauses vereinfacht miteinander vergleichen zu können, wurde ein vereinfachtes Modell des Mustertreppenhauses erstellt, das im Wesentlichen auf den Berechnungsansätzen der DIN EN ISO 13789 basiert. Das Modell besteht aus einer Heizperiodenbilanz, die für alle vier Stockwerke des Treppenhauses sowie den Kellerabgang separate Zonen definiert und die spezifischen Wärmeübertragungskoeffizienten in vier Richtungen bestimmt (oben, unten, außen, Wohnungen). Die Transmissionswärmeverluste werden über die U-Werte der Wände sowie die Wärmebrücken am Kellerabgang berücksichtigt. Weiterhin geht der Strahlungsaustausch zwischen der Ober- und Unterseite der Zone (zwischen den Stockwerken) ein. Schließlich wird der Luftaustausch über Infiltration und ggf. eine Lüftungsanlage sowie über einen pauschalen Ansatz die Konvektion im Treppenhaus berücksichtigt. Abb. 3-2 zeigt für eine Zone die Zuordnung der Wärmeübertragungskoeffizienten. Die Dokumentation des mathematischen Modells findet sich in Anhang I.



**Abb. 3-2: Skizze der spezifischen Wärmeübertragungskoeffizienten einer Treppenhauszone**

Mit diesem Treppenhausmodell werden im Kapitel 5.4 die Temperaturen der einzelnen Zonen für unterschiedliche Ausführungen des Treppenhauses und der thermischen Hülle berechnet. Die Ergebnisse dienen als Input für die energetische Bilanzierung des Treppenhauses unter Berücksichtigung der resultierenden Temperaturen.

## 4 Luftaustausch in Treppenhäusern und Belüftungskonzepte

### 4.1 Auftriebsinduzierter Luftaustausch in Treppenhäusern

Treppenhäuser sind geometrisch sehr komplexe Gebilde, bei denen die Bestimmung der tatsächlichen Luftströmungen durch thermischen Auftrieb nicht ohne Weiteres möglich ist. In der Literatur finden sich zahlreiche Untersuchungen zum Luftaustausch durch vertikale Öffnungen, z. B. Türen zwischen Räumen, mit dem Luftaustausch über horizontale Öffnungen, z. B. über ein Treppenhaus, beschäftigt sich die Wissenschaft erst seit wenigen Jahren intensiver. Erste Ansätze zur Modellierung von Luftströmungen in Treppenhäusern finden sich bei [Reynolds 1986] und [Reynolds et al. 1988].

Grundsätzlich entsteht ein thermischer Auftrieb, wenn bei zwei miteinander verbundenen Zonen die untere Zone eine höhere Temperatur besitzt als die obere Zone. Die aufsteigende warme Luft verdrängt kältere Luft in der oberen Zone, die sich durch die horizontale Öffnung (Treppenhaus) nach unten bewegt. Bei einer horizontalen Öffnung steigt somit in einem Bereich die Luft aufwärts und in einem anderen fällt sie nach unten (Abb. 4-1 links).

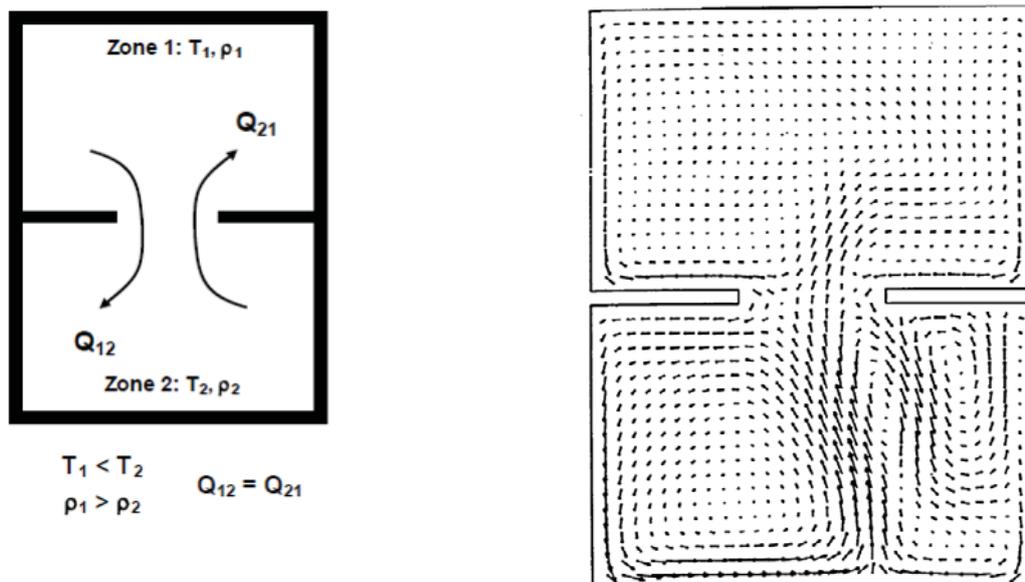
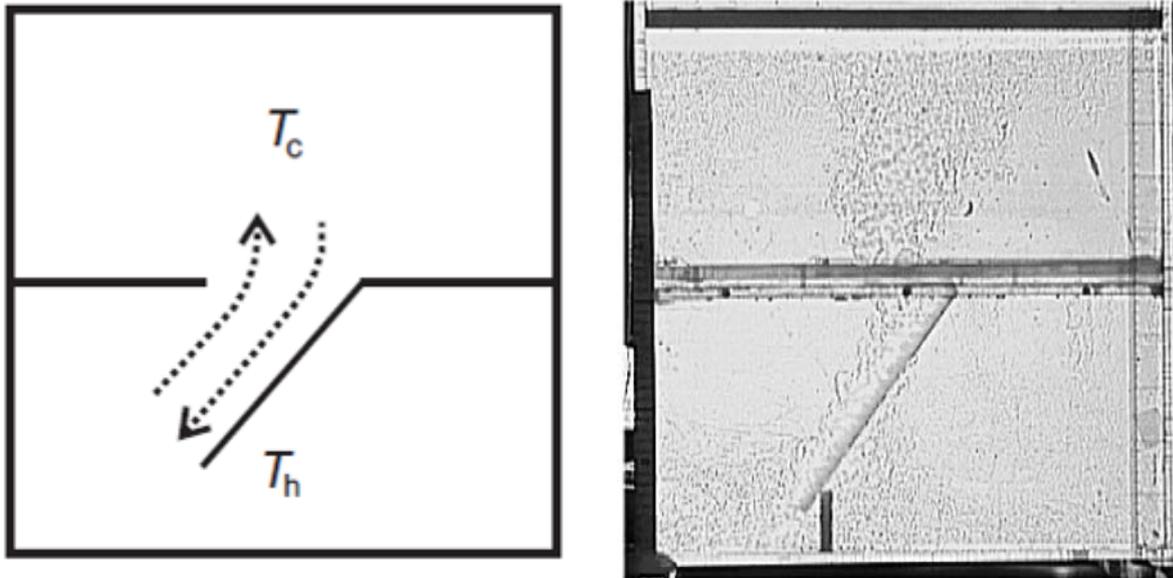


Abb. 4-1: Links: Lufttransport in einer horizontalen Öffnung [Vera et al. 2007]; rechts: Strömungsprofil zwischen zwei Zonen mit horizontaler Öffnung (Ergebnis der Berechnungen nach 1090 s für  $T_u=27\text{ °C}$  und  $T_o=10\text{ °C}$ ) [Riffat, Shao 1995];

In einer Untersuchung von [Riffat, Shao 1995] wurde der Luftaustausch zwischen diesen beiden Zonen auf Basis von CFD-Simulationen mit Hilfe von Strömungsvektoren visualisiert (Abb. 4-1 rechts). Bei den gewählten Randbedingungen steigt die warme Luft in der Mitte der horizontalen Öffnung nach oben, die kalte Luft fällt links und rechts an den Rändern ab. Dabei bilden sich jeweils Strömungswirbel aus.

Am Ende dieses Austauschs entsteht eine vertikale Temperaturschichtung mit warmer Luft oben und kälterer Luft unten, die stabil bestehen bleibt, wenn nicht äußere Kräfte (Wind, mechanische Lüftung, Wärmeverluste im oberen Bereich, Wärmestrom im unteren Bereich) die Schichtung zerstören.



**Abb. 4-2:** Links: Schematische Darstellung des Luftaustauschs in einem Treppenhaus [Blomqvist 2009]; rechts: Visualisierung der Strömung durch eine horizontale Öffnung mit einer Schrägen zur Modellierung des Treppenlaufs [Blomqvist 2009]

Noch komplexer wird die Situation, wenn man die realen Geometrien von Treppenhäusern betrachtet, da durch die Treppensteigung der Luftaustausch zusätzlich beeinflusst wird. Abb. 4-2 links zeigt, wie sich prinzipiell die Strömung durch den Treppenlauf verändert. In [Blomqvist 2009] ist für eine solche Situation ein Strömungsmodell erstellt und vermessen worden. In Abb. 4-2 rechts ist zu erkennen, dass sich ein Teil der Strömung an die Schräge anlegt. Die Messungen ergaben, dass der Volumenstrom durch die horizontale Öffnung um 10 % - 15 % erhöht wurde, wenn die Schräge angelegt war.

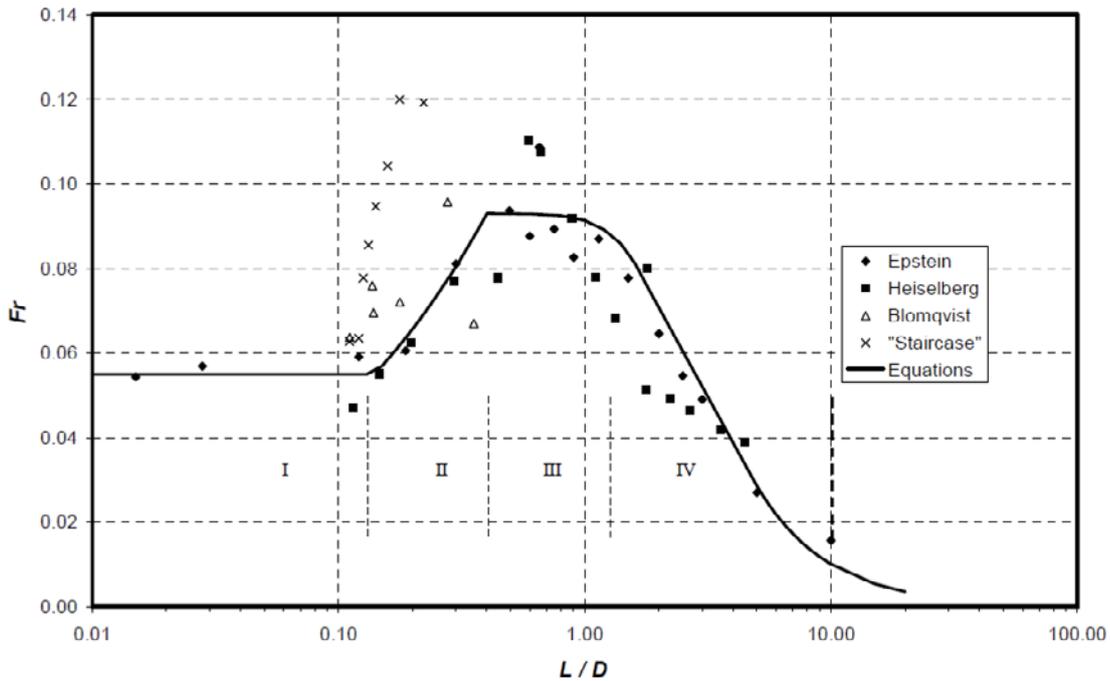
In [Blomqvist 2009] sind einige Studien zusammengetragen, die sich experimentell mit dem Luftaustausch durch eine horizontale Öffnung beschäftigten (durchgeführt mit Ähnlichkeitsmodellen in Wassertanks). Es konnten vier unterschiedliche Gesetzmäßigkeiten der Abhängigkeit des Volumenstroms von dem Verhältnis  $L/D$  festgestellt werden, wobei  $L$  die vertikale Höhe der Trennwand an der horizontalen Öffnung und  $D$  der Durchmesser eines flächengleichen runden Ausschnitts ist (siehe Abb. 4-3). Die Froude-Zahl ( $Fr$ ) in der Abbildung ist definiert als dimensionsloser Volumenstrom

$$Fr = \frac{q}{\sqrt{\frac{g(T_u - T_o)L^5}{T_u}}} \quad (4)$$

mit

- q     Volumenstrom [m<sup>3</sup>/h]
- g     Erdbeschleunigung [m/s<sup>2</sup>]
- $T_u$    Temperatur der unteren Zone [K]
- $T_o$    Temperatur der oberen Zone [K]
- L     Höhe der horizontalen Öffnung [m]

Bei kleinem Verhältnis  $L/D$  ist die Froude-Zahl annähernd konstant (Bereich I: oszillierender Luftaustausch), dann folgt ein Bereich mit nahezu linear ansteigender Froude-Zahl (Bereich II: Bernoulli Strömung). Anschließend folgt ein linearer Übergangsbereich mit turbulenter Diffusion und Bernoulli Strömung (Bereich III) und schließlich geht die Strömung in turbulente Diffusion (Bereich IV) über, in dem die Froude-Zahlen wieder sinken. [Heiselberg, Li] haben den Übergangsbereich nicht definiert, sondern an Bereich II direkt den Bereich IV angeschlossen.



**Abb. 4-3: Dimensionsloser Volumenstrom, ausgedrückt über die Froude-Zahl, als Funktion von  $L/D$  [Blomqvist 2009]**

Für die Größe des Luftaustauschs und deren Bestimmung ist somit die Kenngröße  $L/D$  wichtig. Abb. 4-4 zeigt für unterschiedliche horizontale Öffnungen und Höhen der Öffnung diesen Kennwert. In dem baupraktischen Bereich von ca.  $5 \text{ m}^2$  Öffnungsfläche ( $2,30 \text{ m} \times 2,15 \text{ m}$ ) und einer Höhe von  $15 \text{ cm}$  bis  $25 \text{ cm}$  liegt  $L/D$  unter  $0,15$ , so dass oszillierender Luftaustausch angesetzt werden kann.

|                     |       | L [m] |      |      |      |      |      |      |      |      |
|---------------------|-------|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| A [m <sup>2</sup> ] | D [m] | 0,05  | 0,10 | 0,20 | 0,30 | 0,40 | 0,50 | 1,00 | 1,50 | 2,00 |
| 2,0                 | 1,60  | 0,03  | 0,06 | 0,13 | 0,19 | 0,25 | 0,31 | 0,63 | 0,94 | 1,25 |
| 4,0                 | 2,26  | 0,02  | 0,04 | 0,09 | 0,13 | 0,18 | 0,22 | 0,44 | 0,66 | 0,89 |
| 6,0                 | 2,76  | 0,02  | 0,04 | 0,07 | 0,11 | 0,14 | 0,18 | 0,36 | 0,54 | 0,72 |
| 10,0                | 3,57  | 0,01  | 0,03 | 0,06 | 0,08 | 0,11 | 0,14 | 0,28 | 0,42 | 0,56 |
| 15,0                | 4,37  | 0,01  | 0,02 | 0,05 | 0,07 | 0,09 | 0,11 | 0,23 | 0,34 | 0,46 |
| 20,0                | 5,05  | 0,01  | 0,02 | 0,04 | 0,06 | 0,08 | 0,10 | 0,20 | 0,30 | 0,40 |
| 25,0                | 5,64  | 0,01  | 0,02 | 0,04 | 0,05 | 0,07 | 0,09 | 0,18 | 0,27 | 0,35 |

|  |            |                              |
|--|------------|------------------------------|
|  | Regime I   | oszillierender Luftaustausch |
|  | Regime II  | Bernoulli-Strömung           |
|  | Regime III | turbulent und Bernoulli      |

**Abb. 4-4: Berechnung der Kenngröße  $L/D$  für unterschiedlich geometrische Parameter der horizontalen Öffnung**

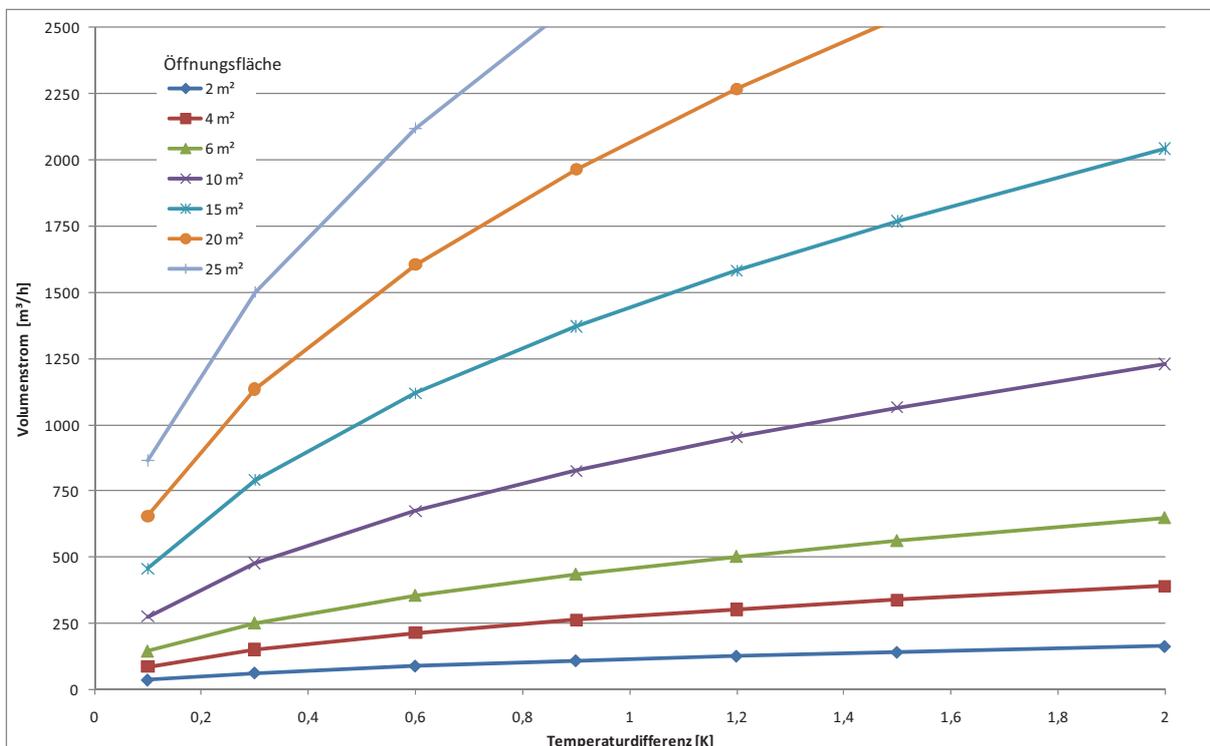
Der Volumenstrom ergibt sich dann aus

$$q = 0,055 * \sqrt{g' * D^5} \quad (5)$$

mit

|            |  |
|------------|--|
| q          | Volumenstrom (m <sup>3</sup> /s)   |
| g'         | reduzierte Erdbeschleunigung (m/s <sup>2</sup> ) mit $g' = g * \Delta T / T$ |
| D          | effektive Dicke der Trennschicht zwischen den Stockwerken (m)                |
| $\Delta T$ | mittlere Temperaturdifferenz zwischen zwei benachbarten Stockwerken (K)      |
| T          | mittlere absolute Temperatur zweier benachbarter Stockwerke (K)              |

Für eine Höhe der Treppenhausöffnung von 16 cm ist in Abb. 4-5 für unterschiedliche Öffnungsflächen der zu erwartende Volumenstrom dargestellt. Für sehr große Öffnungen ergeben sich sehr hohe Volumenströme über 1000 m<sup>3</sup>/h bereits bei Temperaturdifferenzen von 0,5 K. Bei realen Treppenhausöffnungen von Bestandsgebäuden mit ca. 5 m<sup>2</sup> lichter Öffnungsfläche ergibt sich nach den Daten ein Volumenstrom von ca. 250 m<sup>3</sup>/h bei 0,5 K Temperaturdifferenz. Unter Berücksichtigung der Ergebnisse von Blomqvist kann bei einem realen Treppenhaus durch den Einfluss des Treppenlaufs mit noch höheren Werten gerechnet werden. Dies belegen die Messwerte, die in Abb. 4-3 als Kreuze eingetragen sind und die Messdaten mit einer Schräge als Treppenersatz im Versuchsaufbau repräsentieren.

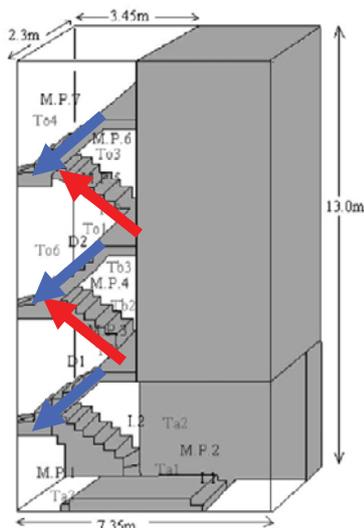


**Abb. 4-5: Auftriebsbedingter Volumenstrom über eine horizontale Öffnung in Abhängigkeit der Temperaturdifferenz der Zonen und für eine Höhe der Öffnung von 16 cm**

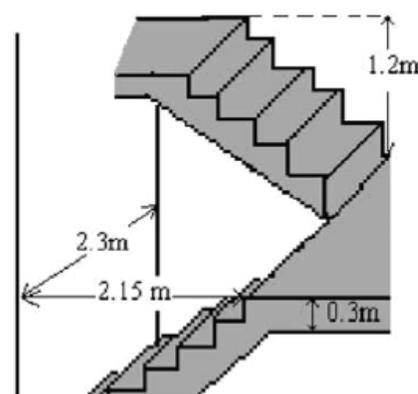
Viele Untersuchungen behandeln meist zwei Stockwerke [z. B. Ergin-Ozkan et al. 1993] oder nur einen Ausschnitt aus der horizontalen Öffnung. Die Übertragbarkeit dieser Ergebnisse auf größere Treppenhäuser ist bisher nicht geklärt. Eine weitere Schwierigkeit bei der Bestimmung

von auftriebsinduzierten Strömungen in einem Treppenhaus besteht in den geringen Temperaturunterschieden zwischen den Stockwerken, die für den Antrieb der Strömung verantwortlich sind. Geringe Temperaturunterschiede führen zu niedrigen Reynoldszahlen, die bei der Simulation mit Computermodellen (CFD) zu Instabilitäten bei der Berechnung führen können. Aus diesem Grund sollten Simulationen immer mit Messdaten abgeglichen werden, um die Ergebnisse auf Plausibilität überprüfen zu können.

In [Peppes et al. 2001] und [Peppes et al. 2002] wird ein reales Treppenhaus mit drei Stockwerken sowohl messtechnisch als auch mit CFD-Simulationen auf seine Auftriebsströmungen untersucht. Die Größe des Treppenhauses und seine inneren und äußeren Abmessungen passen recht gut mit deutschen Treppenhäusern überein. Bei der Arbeit wurde versucht, den Einfluss der Undichtigkeiten der Gebäudehülle weitgehend durch nachträgliches Abdichten zu eliminieren (Luftwechselrate 0,0118 bis 0,0142 m<sup>3</sup>/s). Um für die Messungen eine definierte Temperaturdifferenz zu erhalten, wurde das Erdgeschoss beheizt, so dass eine Auftriebsströmung entstand. Diese Randbedingungen sind jedoch nur bedingt mit der Situation in unbeheizten Treppenhäusern gut gedämmter Gebäude zu vergleichen, da die Temperaturdifferenz zwischen den Stockwerken bei den Messungen teilweise bei 4,5 K und die Außentemperatur zwischen 17,2 °C und 19,1 °C lag, somit nicht den Winterfall repräsentieren. Interessant für die hier vorliegende Studie ist jedoch die Situation im Winter bei hohen Temperaturunterschieden zwischen innen und außen und unterschiedlichen, aber geringen Temperaturdifferenzen zwischen den Stockwerken (im EG größer als oben), die nicht untersucht wurden. Dennoch gibt die Arbeit von [Peppes et al. 2002] wichtige Aufschlüsse über die Strömungsverhältnisse im Treppenhaus. Denn grundsätzlich zeigten die Berechnungen, dass die warme Luft an der glatten Unterseite der Treppe aufsteigt, die kältere Luft auf der Oberseite der Treppenstufen nach unten abfällt (Abb. 4-6). Je niedriger die antreibende Temperaturdifferenz ausfällt, desto instabiler wurde die Strömung. Abb. 4-7 zeigt eine Skizze, wie die effektive Querschnittsfläche der horizontalen Öffnung definiert wird.

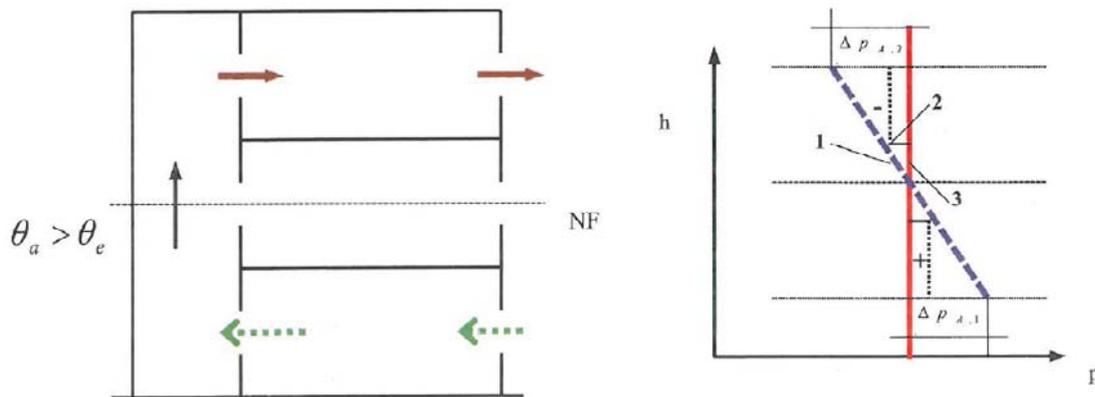


**Abb. 4-6:** Treppenhausmodell nach [Peppes et al. 2002], in das nachträglich die Strömungsrichtung der Luftmassen eingezeichnet wurde, wenn die Temperatur im Erdgeschoss höher liegt als in den darüber liegenden Stockwerken



**Abb. 4-7:** Bestimmung der geometrischen horizontalen Öffnungsfläche nach [Peppes et al. 2002]

Bei Treppenhäusern in Wohngebäuden ist auch die Ausbreitung von Geruchs- und Schadstoffen in das Treppenhaus und von diesem in die Wohnungen von Interesse. Durch die im Allgemeinen vorhandenen Auftriebskräfte von unten nach oben können im Keller Substanzen angesaugt werden, die sich bei undichten Wohnungstüren auch in die Wohnungen ausbreiten können. Je undichter die Wohnungen gegen das Treppenhaus sowie gegen außen sind, desto mehr Luft kann über das Treppenhaus angesaugt werden. Abb. 4-8 zeigt schematisch diesen Luftaustausch. Dies unterstreicht die Wichtigkeit einer möglichst luftdichte Gebäudehülle herzustellen.



**Abb. 4-8: Lufttransport und Verteilung des Auftriebsdrucks im Gebäude, wenn die Innentemperatur über der Außentemperatur liegt [Trogisch]**

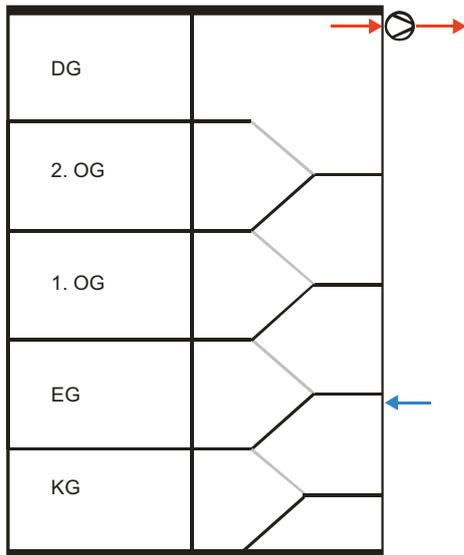
Wird das Treppenhaus mit einem Lufteinlass oben und einem Luftauslass unten mechanisch belüftet, so muss zusätzlich der Massenstrom der mechanischen Lüftung durch die horizontale Öffnung berücksichtigt werden. Für den Fall, dass die Temperatur der oberen Zone höher liegt als die der unteren Zone und die Strömungsrichtung der mechanischen Lüftung von der unteren zur oberen Zone gerichtet ist, konnten in der Literatur keine Untersuchungen gefunden werden.

Die Ausführungen zeigen, dass die prinzipiellen Strömungsvorgänge in Treppenhäusern mittlerweile bekannt sind, eine exakte mathematische oder numerische Bestimmung mittels CFD-Simulation bisher aber nur mit hohem Aufwand möglich ist und für die Validierung kaum Messdaten zur Verfügung stehen.

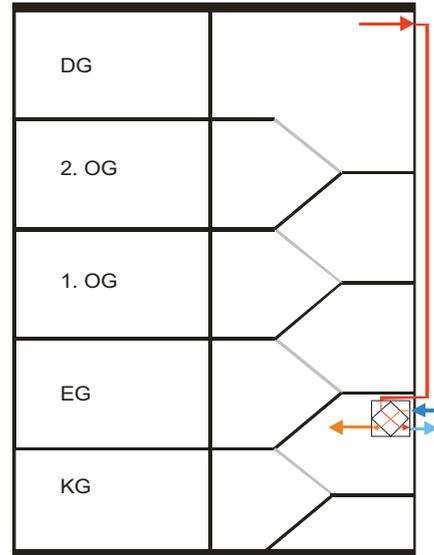
Zur Bestimmung der Auswirkungen von Treppenhausdurchströmung auf Grund von geöffneten Fenstern wird in Kapitel 5.3 ein Fenstermodell in dem Mehrzonen-Simulationsprogramm TAS verwendet.

## 4.2 Varianten der Belüftung von Treppenhäusern

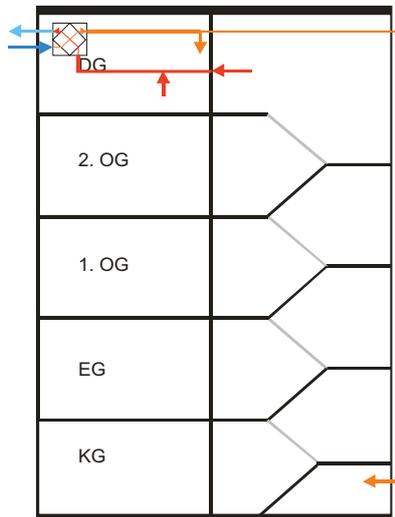
Bisher wurden Treppenhäuser normalerweise über Fenster belüftet. Neben der reinen Fensterlüftung sind aber weitere Belüftungsmöglichkeiten denkbar, die den Energiebedarf des Gebäudes reduzieren – aber auch erhöhen können. Einige von diesen sollen im Folgenden kurz dargestellt werden, die Liste erhebt aber keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Abb. 4-9 zeigt die prinzipiellen Ausführungsvarianten.



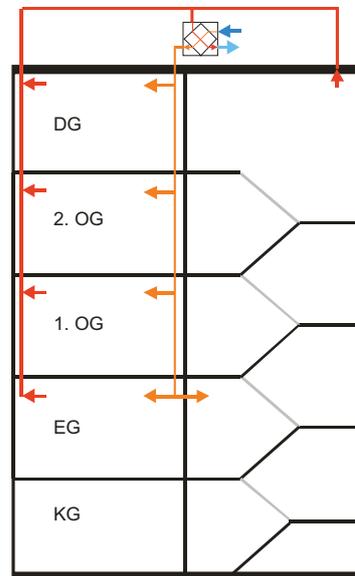
Mechanische Abluft im Dachgeschoss, Zuluftventil im Eingangsbereich



Mechanische Zu- und Abluft mit Wärmerückgewinnung, Lüftungsgerät nur für Treppenhaus



Mechanische Zu- und Abluft, Lüftungsgerät für Treppenhaus gemeinsam mit einer Wohnung



Mechanische Zu- und Abluft, zentrales Lüftungsgerät für Wohnungen und Treppenhaus

**Abb. 4-9: Varianten der mechanischen Lüftung im Treppenhaus mit Wärmerückgewinnung**

### 4.2.1 Abluftanlage

Die Abluftanlage stellt die einfachste Form einer kontrollierten mechanischen Belüftung im Treppenhaus dar. Der Abluftventilator kann im Bereich des Treppenhauskopfes einfach angebracht werden und die Fortluft direkt nach außen fördern. Im Eingangsbereich wird ein Außenluftdurchlass (ALD) montiert, durch den die Zuluft mit Außenlufttemperatur im Eingang nachströmt. Damit das System funktioniert, muss der Abluftventilator einen Unterdruck im Treppenhaus erzeugen, damit am ALD im Erdgeschoss eine Druckdifferenz von ca. 4 Pa - 8 Pa entsteht. Der elektrische Energieaufwand für diese Form der Lüftung ist sehr gering, da keine Druckverluste von Lüftungsleitungen überwunden werden müssen und außerdem der thermische Auftrieb im Gebäude in der Regel (abhängig von der Windanströmung) für einen Unterdruck im Erdgeschoss des Gebäudes sorgt und so den Abluftventilator unterstützt.

Nachteilig an dieser Art der Belüftung ist die Tatsache, dass kontinuierlich kalte Außenluft in das Gebäude strömt und somit den Energiebedarf gegenüber einer reinen Fensterlüftung deutlich erhöhen kann. Außerdem führt der Unterdruck im Treppenhaus dazu, dass auch aus den Wohnungen oder aus dem Keller Luft angesaugt werden kann und damit die Luftqualität im Treppenhaus u. U. verschlechtert wird.

Eine Variante der Abluftanlage könnte eine motorisch gesteuerte Fensterlüftung im Treppenhaus sein. Dafür wären an zwei Fenstern (erstes Treppenpodest und Treppenhauskopf) Stellmotoren erforderlich, die auf Anforderung von Luftqualitätssensoren zeitlich begrenzt beide Fenster kippen, bis wieder eine ausreichende Luftqualität vorhanden ist. Schwierigkeit dieses Systems ist, dass es bisher kein marktgängiges Produkt gibt, das diese Regelung übernehmen kann. Insbesondere für die Festlegung der Schwellwerte für die verschiedenen möglichen Sensorsignale fehlen gegenwärtig die Grundlagen. Hinzu kommt, dass normalerweise im Treppenhaus kaum mit definierten Stoffquellen (z. B. Kohlendioxid  $\text{CO}_2$ ) zu rechnen ist, Gerüche aber in kleinsten Konzentrationen von der Nase wahrgenommen werden können. Kleine Konzentrationen von Geruchsstoffen sind aber von elektronischen Sensoren kaum zu erfassen, so dass die Basis für eine Nutzer-kongruente Regelung fehlt [IWU 2011]. Aus diesen Gründen wird die motorische Fensterlüftung in dieser Untersuchung nicht weiter untersucht. Für die Abluftanlage wäre ebenfalls eine bedarfsgerechte Regelung denkbar, die aber den gleichen Einschränkungen unterliegt wie die automatisch geöffneten Fenster.

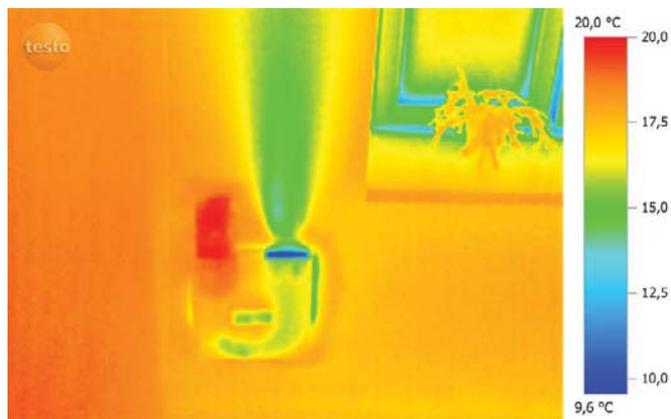
### 4.2.2 Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung für das Treppenhaus

#### Beschreibung

Für das Treppenhaus wird ein eigenes Lüftungsgerät mit Wärmerückgewinnung eingesetzt. Um im Eingangsbereich für frische Luft zu sorgen, wird die Zuluft neben der Haustür platziert, die Abluft im Treppenhauskopf abgesaugt (Abb. 4-9 rechts). Sollte es aus statischen Gründen oder weil der Platz im Bereich des Eingangspodestes nicht ausreicht, nicht möglich sein die Zuluft am Hauseingang einzubringen, kann sie auch im ersten Treppenpodest eingeblasen werden, dann ist eine ausreichende Zuluftversorgung am Eingang aber nicht gesichert.

Bei der Platzierung des Lüftungsgerätes muss darauf geachtet werden, dass die oft recht engen Treppenhausgrundrisse in Bestandsgebäuden nicht zusätzlich durch das Lüftungsgerät verkleinert werden bzw. dieses z. B. durch den Transport von Möbeln beim Umzug nicht beschädigt wird. Hier bietet sich z. B. eine Platzierung am Treppenhauskopf im Dachgeschoss an, wobei aber berücksichtigt werden muss, dass das Gerät für Wartung und Filterwechsel

zugänglich sein muss. Geräte für den Wandeinbau ragen weniger in das Treppenhaus hinein (Abb. 4-10). Gleichzeitig kann ein Kanal eingespart werden (Zu- oder Abluft). Allerdings können sich je nach Mauerwerk statische Begrenzungen für den Einbau geben. Denkbar ist auch ein Einbau im Keller im Bereich unter dem Eingangspodest, der üblicherweise kaum sinnvoll genutzt werden kann. Dort befindet sich das Gerät aber im unbeheizten Bereich, wenn nicht ein offener Kellerabgang vorliegt, was die Effizienz reduziert. Außerdem müssen Zu- und Abluft als Kanal zu den jeweiligen Bereichen geführt werden. Die Einbringung der Zuluft ist im Bereich zwischen Eingangspodest und Geschossdecke zum Erdgeschoss meist unkompliziert möglich. Die Abluft kann – zumindest bei Gebäuden, die mit Passivhauskomponenten saniert werden, in einem Flachkanal auf der Außenwand innerhalb der Außendämmung verlegt werden (Abb. 4-11 links). Die Schallentwicklung der Geräte sollte bei einer Platzierung im Treppenhaus – somit außerhalb der Wohnungen – bei den hier erforderlichen geringen Volumenströmen unkritisch sein.



**Abb. 4-10: Beispiel eines nachträglich eingebauten Lüftungsgeräts im Treppenhaus: links Ansicht, rechts Thermografie, die das Einblasen der Zuluft nach oben zeigt**

### Regelung

Die einfachste Variante des Betriebs ist ein konstanter Volumenstrom der Anlage. Im Sommer könnte die Anlage aus energetischen Gründen abgeschaltet werden (z. B. über eine Jahreszeitschaltuhr). Da der Luftaustausch über gekippte Fenster in dieser Jahreszeit aufgrund der geringen Temperaturunterschiede nicht garantiert ist, bietet ein ganzjähriger Betrieb der Anlage dennoch Vorteile. Dann muss jedoch noch stärker auf einen niedrigen Stromverbrauch geachtet werden.

Alternativ ist eine Regelung über einen Luftqualitätssensor möglich – einige Firmen bieten eine solche Regelung an – allerdings erhöht dies die Kosten der Anlage.

### Besonderheiten

Wird das Lüftungsgerät im Treppenhaus montiert, stellt sich die Frage nach einer geeigneten Kondensatableitung. Die anfallende Kondensatmenge ist abhängig von der Feuchte im Treppenhaus, dem Außenklima und der Rückwärmzahl des Gerätes. Für die Treppenhausfeuchte liegen kaum Messdaten vor. Theoretisch besitzt es keine Feuchtequellen, praktisch sind diese in Form von nassen Böden, Schuhen oder Kinderwagen oft trotzdem vorhanden. Außerdem kann über undichte Wohnungstüren Feuchte in das Treppenhaus gelangen.

Einige Hersteller bieten spezielle Außenabdeckungen an, die ein Abtropfen des Kondensats ermöglichen (Abb. 4-11 rechts). Optimal ist ein separater Ablauf in die Entwässerung, den aber nicht alle Lüftungsgeräte besitzen. Der Kondensatablauf ist auf jeden Fall mit einem Siphon auszustatten, da er das Innere des Gebäudes mit der Außenluft bzw. der Kanalisation verbindet. Wird das Lüftungsgerät auch im Sommer bei hoher Außentemperatur und -feuchte betrieben, so kann auch zu dieser Zeit Kondensat ausfallen, das dann im Frischluftstrang entsteht und ebenfalls abgeleitet werden muss.



**Abb. 4-11: Links: Montage des Abluftkanals auf der Außenwand innerhalb der Wärmedämmung, rechts: Frischluft- und Fortluftdurchführung an der Außenwand**

Die Frage, ob für das Lüftungsgerät im Treppenhaus auch ein Frostschutz vorgesehen werden muss, um ein Einfrieren des Wärmetauschers zu verhindern, hängt in starkem Maß von der Rückwärmzahl des Gerätes ab. Je niedriger diese Zahl ist, desto höher liegt die Fortlufttemperatur bei gleicher Innen- und Außentemperatur. Allerdings sinkt dabei auch die Energieeinsparung. In der Literatur wird betont, dass eine mathematische Bestimmung der Einfriergrenze nur mit erhöhtem Aufwand (Finite-Elemente-Methode) und nur für spezielle Fälle möglich ist [Beck 1992]. Generell gilt, dass bei niedrigen Rückwärmzahlen und hoher Abluftfeuchte diese Grenze bei unter  $-10\text{ °C}$  liegen kann, bei hohen Rückwärmzahlen ist jedoch ab Temperaturen von ca.  $-2\text{ °C}$  mit einem Einfrieren zu rechnen.

Je nach Betriebsverhalten des Ventilators sind die Auswirkungen von Frostansatz im Wärmetauscher unterschiedlich zu beurteilen. Bei einem Ventilator mit flacher Kennlinie führt eine teilweise Vereisung des Plattenwärmetauschers zu einer Reduktion des Abluftvolumenstroms und in der Folge zu einer vollständigen Vereisung des Wärmetauschers. Bei Ventilatoren mit steiler Kennlinie wird auch bei verengten Querschnitten der Abluftvolumenstrom in den noch nicht vereisten Regionen des Wärmetauschers im Wesentlichen konstant gehalten. In den nicht vereisten Regionen steigt die Strömungsgeschwindigkeit und dadurch sinkt die lokale Rückwärmzahl, so dass der Wärmetauscher in der Regel nicht komplett zufriert [Beck 1992].

Wichtig für die Einfriergrenze ist auch das Massenstromverhältnis zwischen Zu- und Abluft, das für eine hohe Energieeinsparung möglichst ausgeglichen sein sollte. Allerdings liegen Zu- und Abluftventil auf unterschiedlichen Höhen, so dass ein zusätzlicher Druckunterschied zwischen den beiden Ventilen berücksichtigt werden muss. Aus diesem Grund ist eine Einmessung der Volumenströme der Treppenhauslüftung wichtig.

### Hilfsstrom

Essentiell für eine hohe Effizienz der Lüftung im Treppenhaus ist ein geringer Hilfsstrombedarf, da der Primärenergieeinsatz für Strom ca. beim 2,5-Fachen von Wärme liegt. Grundsätzlich liegen günstige Voraussetzungen vor, wenn kurze, möglichst gerade und glatte Kanäle mit wenig Abzweigungen und Einbauten (z. B. Schalldämpfer) vorhanden sind. Als Mindestanforderung an die Elektroeffizienz sind die Anforderungen für Lüftungsanlagen in Passivhäusern zu stellen. Bei diesen darf ein Elektroenergiebedarf von  $0,45 \text{ Wh/m}^3$  geförderter Luft nicht überschritten werden [PHPP 2007]. Bei den kurzen Lüftungsleitungen im Treppenhaus, die meist ohne weitere Einbauten auskommen, ist ein Wert von unter  $0,35 \text{ Wh/m}^3$  anzustreben.

### Dezentrale Lüftungsgeräte

Nicht weiter betrachtet werden dezentrale Lüftungsgeräte, die alternierend betrieben werden. Bei diesen arbeiten je zwei Geräte mit entgegengesetzter Durchströmung zusammen. Während über Gerät 1 die Zuluft in den Raum eingebracht wird, wird über Gerät 2 Luft an anderer Stelle abgesaugt. Dabei wird eine Speichermasse von der Abluft erwärmt. Nach ca. 80 Sekunden wird die Strömungsrichtung umgedreht und die Zuluft wird über den nun warmen Speicher geführt. Die Schwierigkeit dieses Systems besteht beim Einsatz in Treppenhäusern in dem thermischen Auftrieb über mehrere Stockwerke, der zu ungleichen Volumenströmen der beiden Geräte führt, wenn eines unten und eines oben im Treppenhaus eingebaut ist. Aus diesem Grund rät der Anbieter eines solchen Systems von einem Einsatz über mehr als zwei Stockwerke hinaus ab [Meltem 2011].

Dezentrale Lüftungsgeräte mit Wärmerückgewinnung, bei denen Zu- und Abluft an der gleichen Stelle montiert sind, können ebenfalls kaum für eine ausreichende Luftqualität im Treppenhaus sorgen, da sie nur ein Stockwerk mit frischer Luft versorgen. In der Konsequenz müsste je Stockwerk ein Gerät montiert werden, was jedoch die Kosten deutlich erhöht.

## **4.2.3 Anschluss an zentrales Lüftungsgerät des Gebäudes**

Einfacher ist die Belüftung des Treppenhauses, wenn ein zentrales Lüftungsgerät für das gesamte Gebäude oder größere Teile davon zur Verfügung stehen. Dann kann das Treppenhaus an diese zentrale Lüftung angeschlossen werden (Abb. 4-9 rechts unten). Disbalancen zwischen Zu- und Abluft im Treppenhaus wirken sich nur wenig auf die Rückwärmzahl der Gesamtanlage aus, da sie nur einen geringen Anteil am Gesamtvolumenstrom ausmachen. Ist das Treppenhaus als Bereich innerhalb der thermischen Hülle gut gedämmt, liegen die Temperaturen auch in vergleichbarer Höhe wie in den Wohnungen, so dass durch den Treppenhausvolumenstrom die Effizienz der Anlage nicht wesentlich beeinflusst wird.

Ein weiterer Vorteil ist darin zu sehen, dass die Rückwärmzahl einer zentralen Anlage meist höher ausfällt als bei dezentralen Anlagen. Es tritt kaum zusätzlicher Wartungsaufwand auf (nur Reinigung der Ventile), als zusätzliche Kosten müssen vor allem die Zu- und Abluftkanäle von der Zentrale zum Treppenhaus und zusätzliche Schalldämpfer angesetzt werden (je nach Aufstellungsort des Zentralgeräts). Beispiele in der Literatur, in denen eine Treppenhauslüftung erwähnt wird, finden sich z. B. in den Passivhäusern Pinnasberg [PHI 2005] oder Sophienhof [Füßler 2007].

Allerdings kann der Aufwand für Brandschutzmaßnahmen ansteigen, wenn Wohnungen und Treppenhaus unterschiedliche Brandabschnitte bilden.

#### 4.2.4 Anschluss an ein Wohnungslüftungsgerät

Problematischer ist die Kopplung der Treppenhauslüftung mit einem Wohnungslüftungsgerät. Einerseits wird die zurückgewonnene Wärme für die Wohnung sinken, da die Lufttemperatur im Treppenhaus aufgrund geringer innerer Wärmequellen im Allgemeinen unter derjenigen der Wohnung liegen wird. Außerdem steigen Geräuschentwicklung sowie Stromverbrauch der Anlage aufgrund der größeren Volumenströme.

Somit stellt der Anschluss der Treppenhauslüftung an eine Wohnung eine eher theoretische Möglichkeit der Treppenhauslüftung dar und wird nicht empfohlen.

### 4.3 Luftwechsel im Treppenhaus

Die Festlegung des geeigneten Luftwechsels im Treppenhaus ist pauschal kaum möglich. Der erforderliche Luftwechsel ist einerseits von den Verunreinigungsquellen im Treppenhaus, zum Teil aber auch vom Luftaustausch über Infiltration abhängig. Je besser der energetische Standard des Gebäudes, desto niedriger ist der zu erwartende Luftaustausch über Infiltration (deren Höhe auch von den Klimabedingungen abhängt und keinesfalls ganzjährig konstant ist). In der Konsequenz ist bei hoher Dichtheit der Gebäudehülle und fehlender mechanischer Lüftung mit schlechterer Luftqualität im Treppenhaus zu rechnen.

Festlegungen für Luftwechsel in Treppenhäusern von Wohngebäuden konnten nicht gefunden werden, es finden sich in den einschlägigen Normen aber Empfehlungen für vergleichbare Zonen.

Die DIN V 18599-10 sieht für Verkehrsflächen (Flure und Treppenhäuser) keinen Mindestvolumenstrom vor. Nebenflächen ohne Aufenthaltsräume sollen mit  $0,15 \text{ m}^3/(\text{m}^2\text{h})$  belüftet werden. Bei einem Treppenhaus mit einer Grundfläche von ca.  $12 \text{ m}^2$  ergeben sich damit  $1,8 \text{ m}^3/\text{h}$  entsprechend einem Luftwechsel von  $0,06 \text{ h}^{-1}$ . Für Wohngebäude werden  $0,5 \text{ h}^{-1}$  ohne, und  $0,45 \text{ h}^{-1}$  mit bedarfgeführter Regelung vorgeschlagen. Beide Ansätze erscheinen wenig praxisgerecht für Treppenhäuser in Wohngebäuden.

Die DIN EN ISO 13789:2008 nennt übliche Luftwechselraten zwischen unkonditioniertem Raum und der Außenluft (Tab. 4-1). Diese scheinen für die in dieser Untersuchung angestrebten energetischen Standards ebenfalls nur bedingt geeignet zu sein.

**Tab. 4-1: Übliche Luftwechselraten zwischen unconditioniertem Raum und Außenumgebung [DIN EN ISO 13789]**

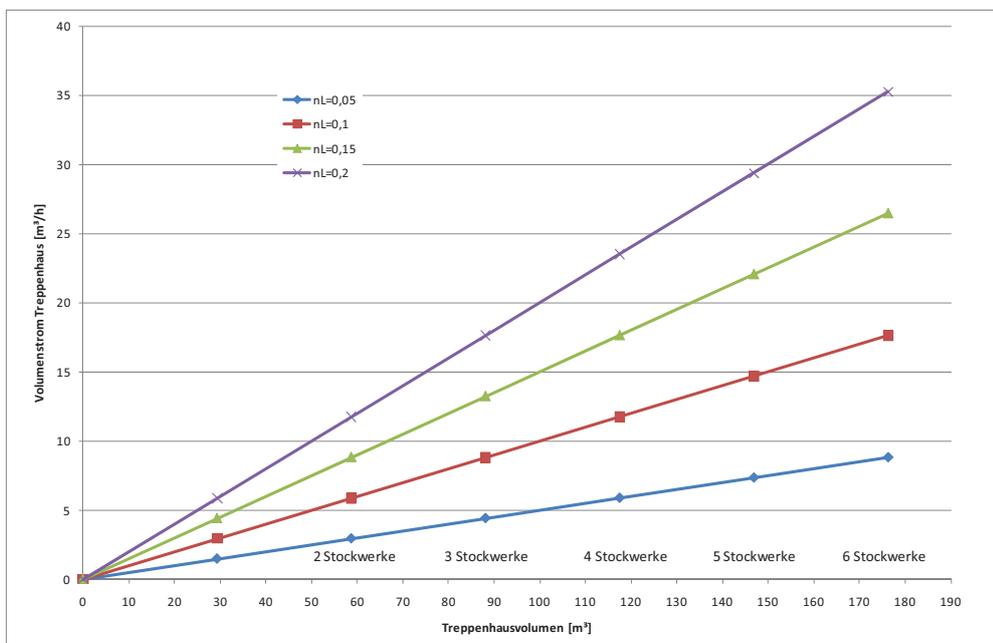
| Nr. | Typ der Luftdichtheit   | $n_{ue}$<br>h <sup>-1</sup> |
|-----|---|-----------------------------|
| 1   | Keine Türen oder Fenster, alle Fugen zwischen Bauteilen sind gut abgedichtet, es sind keine Lüftungsöffnungen vorgesehen. | 0,1                         |
| 2   | Alle Fugen zwischen den Bauteilen sind gut abgedichtet, es sind keine Lüftungsöffnungen vorgesehen.                       | 0,5                         |
| 3   | Alle Fugen sind gut abgedichtet, es sind kleine Lüftungsöffnungen vorgesehen.   | 1                           |
| 4   | Aufgrund einiger örtlich offener Fugen oder ständig offener Lüftungsöffnungen nicht dicht.                                | 3                           |
| 5   | Aufgrund zahlreicher offener Fugen oder großer bzw. zahlreicher, ständig offener Lüftungsöffnungen nicht dicht.           | 10                          |

Alternativ kann die Luftwechselrate aus dem  $n_{50}$ -Wert nach der Formel abgeschätzt werden:

$$n = \frac{n_{50}}{20} \quad (6)$$

Im Anhang C ist (informativ) ein Verfahren zur Bestimmung der Luftwechselrate beschrieben. Allerdings ergibt sich auch bei einer hohen Gebäudedichtheit bei nur einer Einwirkungsseite des Windes ein Luftwechsel  $n$  von 0,5 1/h, was höher liegt als die üblichen Luftwechsel für Wohnungen im Passivhaus-Standard.

Abb. 4-12 zeigt den resultierenden Volumenstrom für unterschiedliche Treppenhausvolumina und Luftwechselraten. Es zeigt sich, dass die erforderlichen Volumenströme im Bereich zwischen 5 m<sup>3</sup>/h (2 Stockwerke, Luftwechsel 0,1 h<sup>-1</sup>) und 35 m<sup>3</sup>/h (6 Stockwerke, Luftwechsel 0,2 h<sup>-1</sup>) liegen.



**Abb. 4-12: Resultierender Volumenstrom im Treppenhaus in Abhängigkeit von Luftwechsel und Treppenhausvolumen**

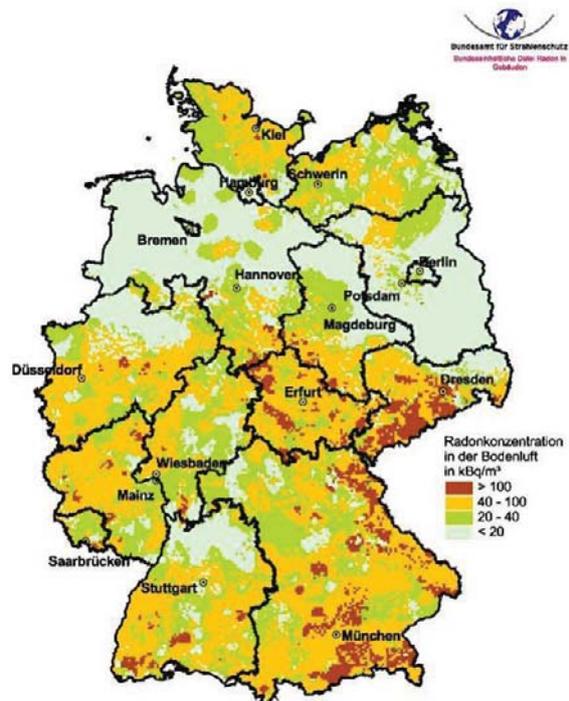
Die [DIN 1946-6] definiert in Tabelle 5 Mindestwerte der Gesamt-Außenluftströme für eine Nutzungseinheit. Diese Nutzungseinheit kann neben einer Wohnung oder einem Gebäude (EFH) auch eine mehrgeschossige Raumgruppe umfassen, so dass die Festlegung grundsätzlich auch auf Treppenhäuser übertragbar ist. Der Mindestluftwechsel zum Feuchteschutz bei Gebäuden mit hohem Wärmeschutzniveau, der für diese Untersuchung unterstellt wird, liegt bei  $15 \text{ m}^3/\text{h}$ . Dies entspricht ungefähr einem Luftwechsel von  $0,1 \text{ h}^{-1}$  bei einem Treppenhaus mit vier Stockwerken. Dieser Luftwechsel erscheint für die weiteren Untersuchungen recht geeignet. Eine abweichende Anzahl von Stockwerken würde jedoch zu einem anderen Luftwechsel führen.

### Fazit

Da die Luftwechsel der DIN EN ISO 13789 für unbeheizte Räume unrealistisch hoch festgelegt sind, wird für die weiteren Untersuchungen ein Treppenhausluftwechsel von  $0,1 \text{ h}^{-1}$  festgelegt, der an den Mindestwerten der DIN 1946-6 orientiert ist.

## 4.3.1 Auswirkungen von Undichtigkeiten im Treppenhaus

Aus mehreren Gründen ist eine Abdichtung des Treppenhauses entweder zum Kellerabgang oder zu den Kellerräumen bei einem offenen Abgang sehr wichtig. Zum einen werden an Kellerräume keine Anforderungen an die Luftdichtigkeit gestellt, so dass die luftdichte Hülle des Gebäudes im Allgemeinen im Bereich der Kellertüren verläuft. Sind diese nicht ausreichend dicht, so kann sich bei zusätzlichen Undichtigkeiten im oberen Bereich des Treppenhauses oder bei einem gekippten Treppenhausfenster ein nennenswerter Volumenstrom durch den thermischen Auftrieb ergeben, der zu zusätzlichen Wärmeverlusten führt. Dabei wird Kellerluft in das Treppenhaus geführt, die mit zusätzlichen Gerüchen belastet sein kann und so die Luftqualität im Treppenhaus reduziert (siehe Abb. 4-8).



**Abb. 4-13: Übersicht über die Radonkonzentration in der Bodenluft in ein Meter Tiefe [BfS 2010]**

Bedenklicher ist ein möglicher Eintrag von Radon, das über Risse in den Wänden und Böden aus dem Erdreich in den Keller eingedrungen ist und in das Treppenhaus und über die Wohnungstüren in den Aufenthaltsbereich der Bewohner gelangt. Abb. 4-13 zeigt Gebiete, in denen mit erhöhten Radonbelastungen gerechnet werden muss. Auch in Hessen gibt es solche Regionen mit mittlerem oder hohem Radongehalt in der Bodenluft. Auch unter diesen Aspekten kann eine Abdichtung des Kellers und ggf. die Abführung von vorhandenen Stoffen sinnvoll sein.

## 4.4 Brandschutz

Treppenhäuser spielen als Fluchtweg im Brandfall eine wichtige Rolle. Aus diesem Grund müssen bei der Betrachtung der energetischen Modernisierung im Treppenhaus wie bei der mechanischen Belüftung auch Brandschutzaspekte berücksichtigt werden. Im Rahmen dieser Untersuchung können jedoch keine allgemeingültigen Brandschutzkonzepte für Treppenhäuser entwickelt werden. Ebenso können nicht alle für den Brandschutz relevanten Bestimmungen dargestellt werden. Einige grundsätzliche Randbedingungen sollen im Folgenden aber beleuchtet werden.

Nach der Hessischen Bauordnung [HBO2011] müssen notwendige Treppen, d. h. Treppen, die für Zugänglichkeit zu den Geschossen erforderlich sind, in einem durchgehenden Treppenraum liegen und dieser Treppenraum muss die Benutzung des Treppenraumes im Brandfall ausreichend lange ermöglichen. Dies gilt auch für Kellergeschosse. Bei Mehrfamilienhäusern kann auf den Treppenraum in der Regel nicht verzichtet werden. Der Treppenraum muss an einer Außenwand liegen und einen unmittelbar ins Freie führenden Ausgang besitzen. Werden diese Anforderungen nicht erfüllt, sind zusätzliche Randbedingungen einzuhalten. Notwendige Treppenräume müssen belüftet werden können und unmittelbar ins Freie führende, offenbare Fenster mit 0,50 m<sup>2</sup> Fläche besitzen. Bei innen liegenden Treppenhäusern bzw. bei Gebäuden der Gebäudeklasse 5 (Gebäude zwischen 13 m und 22 m Höhe oder mit mehr als 400 m<sup>2</sup> Brutto-Grundfläche in einem Geschoss) müssen an der obersten Stelle eine Öffnung zur Rauchableitung mit einem freien Querschnitt von mindestens 1 m<sup>2</sup> besitzen. Fahrschächte von Aufzügen müssen ebenfalls zu lüften sein und einen freien Querschnitt entsprechend 2,5 % der Grundfläche enthalten (mindestens 0,1 m<sup>2</sup>). Aufzüge können in notwendigen Treppenräumen ohne separaten Fahrschacht angeordnet werden.

Ab einer bestimmten Größe des Gebäudes dürfen ausschließlich nicht brennbare Materialien im Treppenhaus eingesetzt werden. Die [HBO 2011] fordert für Bekleidungen oder Dämmstoffe bei notwendigen Treppenräumen ab Gebäudeklasse 3 (Gebäude mit mehr als zwei Wohneinheiten) Baustoffklasse A (nach DIN 4102-1). Die Baustoffklasse B kann grundsätzlich jedoch auf der dem Treppenhaus abgewandten Seiten der Wand eingesetzt werden.

An Lüftungsleitungen werden nach [HBO 2011] Anforderungen bezüglich Brennbarkeit der Dämmstoffe sowie bei der Überbrückung von Wänden und Decken mit Brandschutzanforderungen gestellt.

Rauch- und Wärmeabzugsanlagen (RWA-Anlagen) können als natürliche Abzugsanlagen mit offenbaren Jalousieklappen, Lichtkuppeln oder Fenstern im oberen Bereich des Treppenhauses angeordnet werden, oder als mechanische Abluftanlagen. Mittlerweile bieten mehrere Hersteller Systeme an, die im Normalfall geschlossen sind und somit den unkontrollierten Wärmeverlust im Treppenhaus durch die RWA-Anlage begrenzen. Trotzdem stellt eine solche Anlage meist eine energetische Schwachstelle dar. Aufgabe der Planung ist es, für den jeweiligen energetischen Standard die geeigneteste Anlage unter Berücksichtigung der Brandschutzanforderungen auszuwählen. Auch der Hilfsstromeinsatz für unterschiedliche Konzepte sollte bei den Herstellern abgefragt werden.

Werden Brandrauchabsaugungen eingesetzt, so sind diese meist auf sehr hohe Luftwechsel (z. B. 12-fach) ausgelegt. Außerdem benötigen sie eine entsprechend groß dimensionierte Zuluftnachströmung. An Ventilatoren zur Entrauchung von Treppenhäusern werden erhöhte Anforderungen an die maximal zulässigen Temperaturen gestellt.

Rauchverdrängungsanlagen (RVA) oder Druckbelüftungsanlagen (DBV) erzeugen in den Fluchtwegen (Treppenhäuser, Flure) einen Überdruck von ca. 50 Pa um eine gerichtete Luftströmung vom Treppenhaus zu den Wohnungen zu erreichen und somit eine Rauchausbreitung zum Treppenhaus zu verhindern [hhpberlin 2008]. Solche Anlagen werden für Treppenträume als Kompensation für einen fehlenden 2. Rettungsweg eingesetzt. Allerdings sind diese technisch und finanziell aufwändig und kommen z. B. bei Hochhäusern in Betracht, bei denen der 2. Rettungsweg über eine Anleiterung aufgrund der Gebäudehöhe nicht mehr möglich ist. Solche Gebäude sind jedoch nicht Gegenstand dieser Untersuchung.

## 5 Modellrechnungen

Um die Auswirkungen der unterschiedlichen Ausführungen des Kellerabgangs sowie der energetischen Standards auf die Temperaturverteilung im Treppenhaus und dessen Wärmeverluste bestimmen zu können, wurden unterschiedliche Modellrechnungen durchgeführt. Neben der Bilanzierung der unterschiedlichen energetischen Standards mit dem Passivhaus-Projektierungs-Paket (Monatsbilanzverfahren) (Kapitel 5.1) wurde das Mustergebäude mit dem Programm TAS dynamisch simuliert (siehe Kapitel 5.3), um vor allem die Temperaturschichtung im Treppenhaus beim offenen Kellerabgang realistisch berücksichtigen zu können. Für die weiteren Varianten wurde das vereinfachte Treppenhausmodell eingesetzt, mit dem unterschiedliche Ausführungen des Treppenhauses in Form von Parametervariationen berechnet werden können (siehe Kapitel 5.4). Für die unterschiedlichen Temperaturverteilungen im Treppenhaus wurden anschließend in Kapitel 5.5 die Energiebilanzen berechnet.

### 5.1 Bilanzierung mit Standardrandbedingungen

Für den Vergleich der unterschiedlichen energetischen Standards wurde das Mustergebäude mit dem Passivhaus-Projektierungs-Paket (PHPP) bilanziert. Dabei wurden auch die Varianten „EnEV“ und „unsaniert“ mit dem PHPP berechnet. Bei der unsanierten Variante wurde eine reduzierte mittlere Raumtemperatur von 18,5 °C für räumliche und zeitliche Teilbeheizung angesetzt, „EnEV“ und „PH“ wurden jeweils mit 20 °C Raumtemperatur gerechnet. Die Variante „EnEV“ spiegelt somit die Anforderungen der Energieeinsparverordnung an die Gebäudehülle wider, ist aber nicht mit dem Berechnungsverfahren bzw. den Randbedingungen der EnEV durchgerechnet. Für die Bilanzierung wurden neben den Wärmebrücken am Kellerabgang die Einbauwärmebrücken der Fenster sowie die Wärmebrücke am Kellerdeckenaufleger berücksichtigt.

Die Gebäudedichtheit ( $n_{50}$ -Wert) wurde abhängig vom energetischen Standard gemäß Tab. 2-2 gesetzt und zwischen unbelüftetem (nur Infiltrationsluftwechsel berücksichtigt) und belüftetem Treppenhaus (mechanische Lüftung für Treppenhaus vorhanden) unterschieden.

Zur Berücksichtigung der reduzierten Wärmeverluste gegen den unbeheizten Keller bzw. gegen Erdreich wurden mit dem „Erdreich“-Blatt des PHPP die unterschiedlichen Situationen für das Mustergebäude abgebildet (Tab. 5-1). Dieses berechnet die Temperatur-Korrekturfaktoren in Anlehnung an die DIN EN ISO 13370. Die Teilunterkellerung bei offenem Kellerabgang wurde gemäß [Schild et al.] flächengewichtet aus beheiztem und unbeheiztem Keller bestimmt.

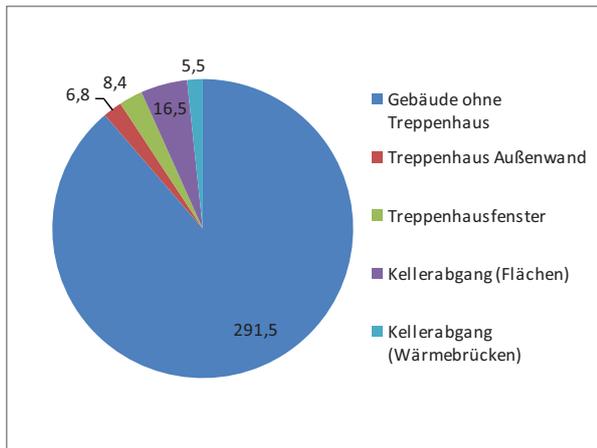
**Tab. 5-1: Temperatur-Korrekturfaktoren für die Wärmeverluste gegen unbeheizten Keller bzw. Erdreich für das Mustergebäude für unterschiedliche energetische Standards und Ausführungen des Kellerabgangs**

|           | oben<br>geschlossen | offen |
|-----------|---------------------|-------|
| PH        | 0,621               | 0,601 |
| EnEV      | 0,586               | 0,570 |
| unsaniert | 0,420               | 0,392 |

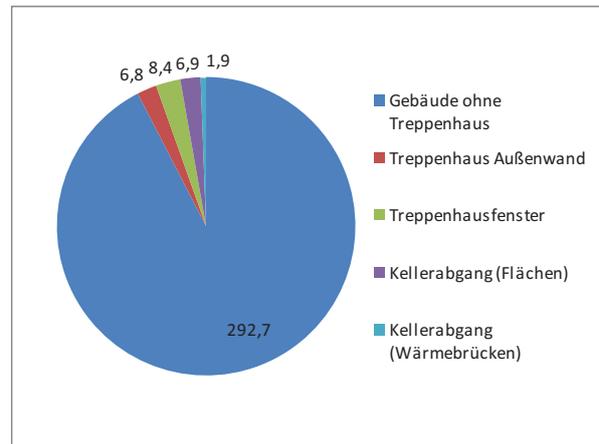
In Abb. 5-1 sind für die beiden Varianten EnEV bzw. PH jeweils für den offenen und den oben geschlossenen Kellerabgang die Transmissionswärmeverluste in W/K unterteilt für die Komponenten des Treppenhauses (Treppenhaus-Außenwand, Treppenhausfenster, Flächen Kellerabgang sowie Wärmebrücken Kellerabgang) und den Rest des Gebäudes dargestellt. Bei einem offenen Kellerabgang besitzen die Flächen zum Keller die größten Wärmeverluste, beim geschlossenen Kellerabgang sind die einzelnen Anteile relativ gleichmäßig verteilt.

Der Grund, warum beim offenen Kellerabgang die Transmissionswärmeverluste etwas geringer sind als beim geschlossenen, ist darin zu suchen, dass für den Temperatur-Korrekturfaktor gegen den unbeheizten Bereich des Kellers die größeren Wärmebrückenverluste beim offenen Kellerabgang zu einem leicht verminderten Reduktionsfaktor auch für die Kellerdecke führen und die Transmissionsverlusten an dieser Stelle etwas niedriger ausfallen.

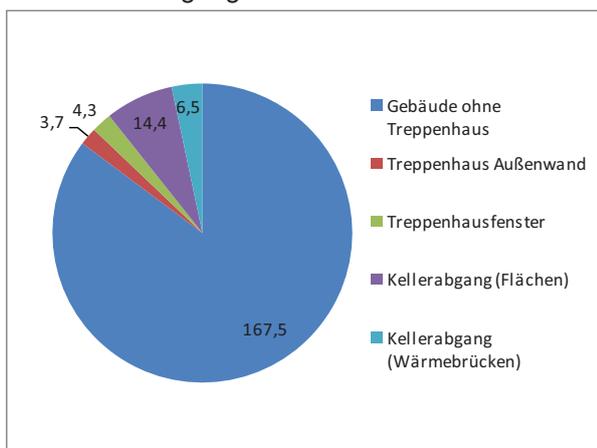
Insgesamt beträgt der Anteil des Treppenhauses an den Transmissionswärmeverlusten des Mustergebäudes 11 % (EnEV) bzw. 15 % (PH) beim offenem und 8 % (EnEV) bzw. 9 % (PH) bei geschlossenem Kellerabgang. Beim unsanierten Gebäude liegt der Anteil des Treppenhauses an den Transmissionswärmeverlusten bei 4 % (geschlossener Kellerabgang) bzw. 6 % (offener Kellerabgang).



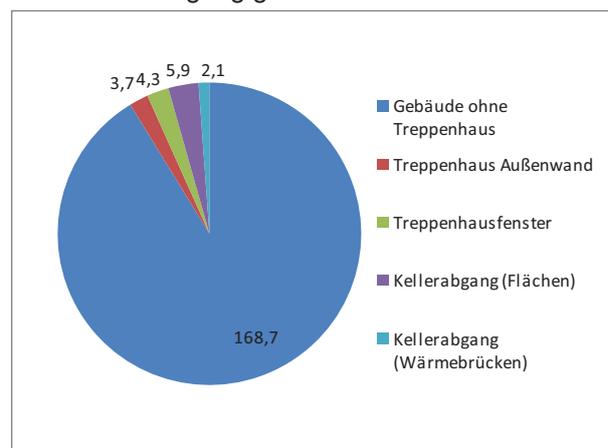
EnEV-Kellerabgang offen



EnEV-Kellerabgang geschlossen



PH-Kellerabgang offen



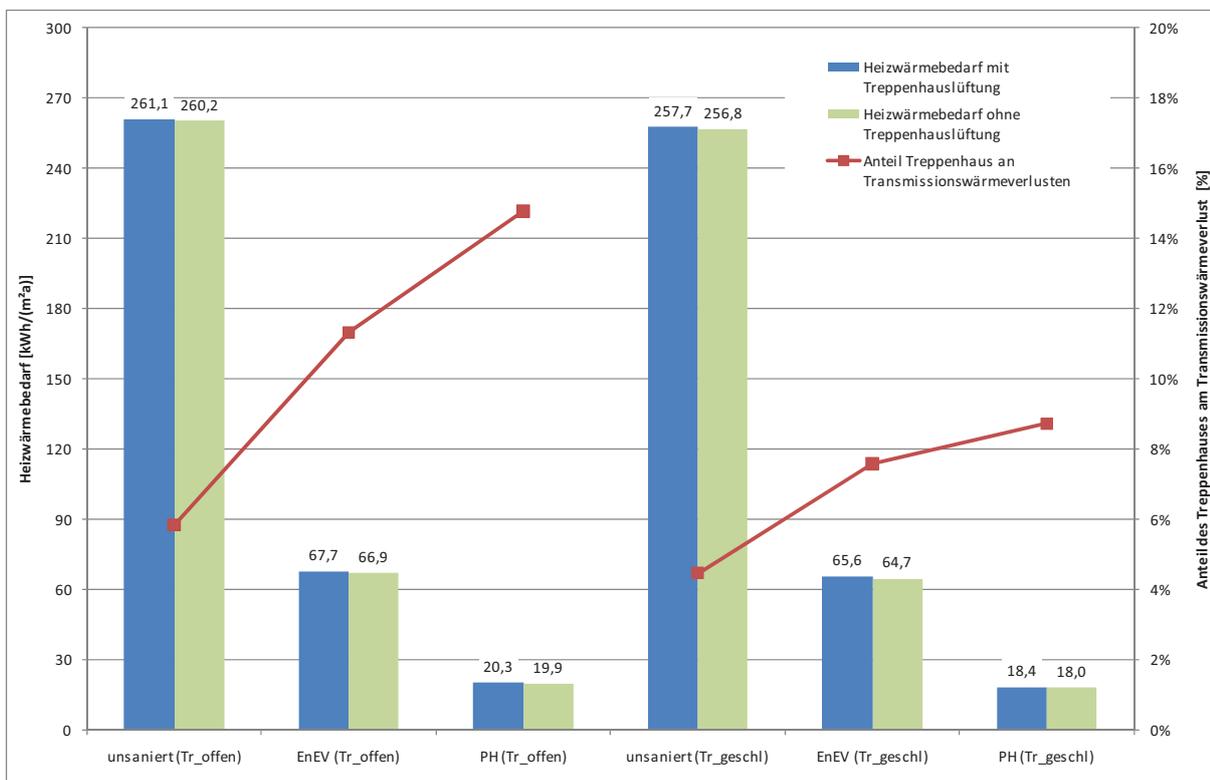
PH-Kellerabgang geschlossen

**Abb. 5-1: Aufteilung der Transmissionswärmeverluste des Gebäudes zwischen Treppenhaus und übrigen Bauteilen, Werte in [W/K]**

Abb. 5-2 zeigt den Heizwärmebedarf der unterschiedlichen energetischen Varianten und den Anteil des Treppenhauses an den Transmissionswärmeverlusten. In Blau ist der Heizwärmebedarf des Gebäudes für die drei Standards mit einer Lüftungsanlage im Treppenhaus dargestellt, die grünen Balken zeigen die Ergebnisse für das Gebäude ohne Lüftungsanlage im Treppenhaus. Es zeigt sich, dass der nominelle Heizwärmebedarf ohne Lüftungsanlage im Treppenhaus niedriger liegt (u. a. 18,0 kWh/(m<sup>2</sup>a) bei der Variante PH mit geschlossenem Kellerabgang ohne Treppenhauslüftung und 18,4 kWh/(m<sup>2</sup>a) mit Lüftungsanlage im Treppenhaus). Die Ursache liegt in dem Gesamtluftwechsel mit Lüftungsanlage, der trotz Wärmerückgewinnung effektiv höhere Werte erreicht als ohne. Die in diesem Fall erforderliche Fensterlüftung im Treppenhaus berücksichtigt der Berechnungsansatz jedoch nicht.

Bei der Bilanzierung wurde das Treppenhaus als Teil der thermischen Hülle berücksichtigt, was bedeutet, dass dort die gleiche Temperatur wie in den Wohnungen herrscht. Da die realen Temperaturen niedriger liegen, werden die Wärmeverluste über das Treppenhaus bei dieser Berechnung überschätzt.

Im Kapitel 5.5 wird die Energiebilanz des Mustergebäudes unter Berücksichtigung der sich real einstellenden Treppenhaustemperaturen dargestellt.



**Abb. 5-2: Heizwärmebedarf und Anteil des Treppenhauses an den Transmissionswärmeverlusten für unterschiedliche energetische Standards und Ausführungen des Kellerabgangs**

## 5.2 Temperaturen des Treppenhauses als unbeheizter Bereich

Im folgenden Kapitel sollen unterschiedliche Ansätze zur Bestimmung der Temperatur im Treppenhaus miteinander verglichen werden. Es werden Vergleichsrechnungen zwischen den Rechenansätzen der DIN EN ISO 13789 bzw. DIN V 18599 und den Berechnungsergebnissen des numerischen Finite-Differenzen-Programms Heat2D dokumentiert.

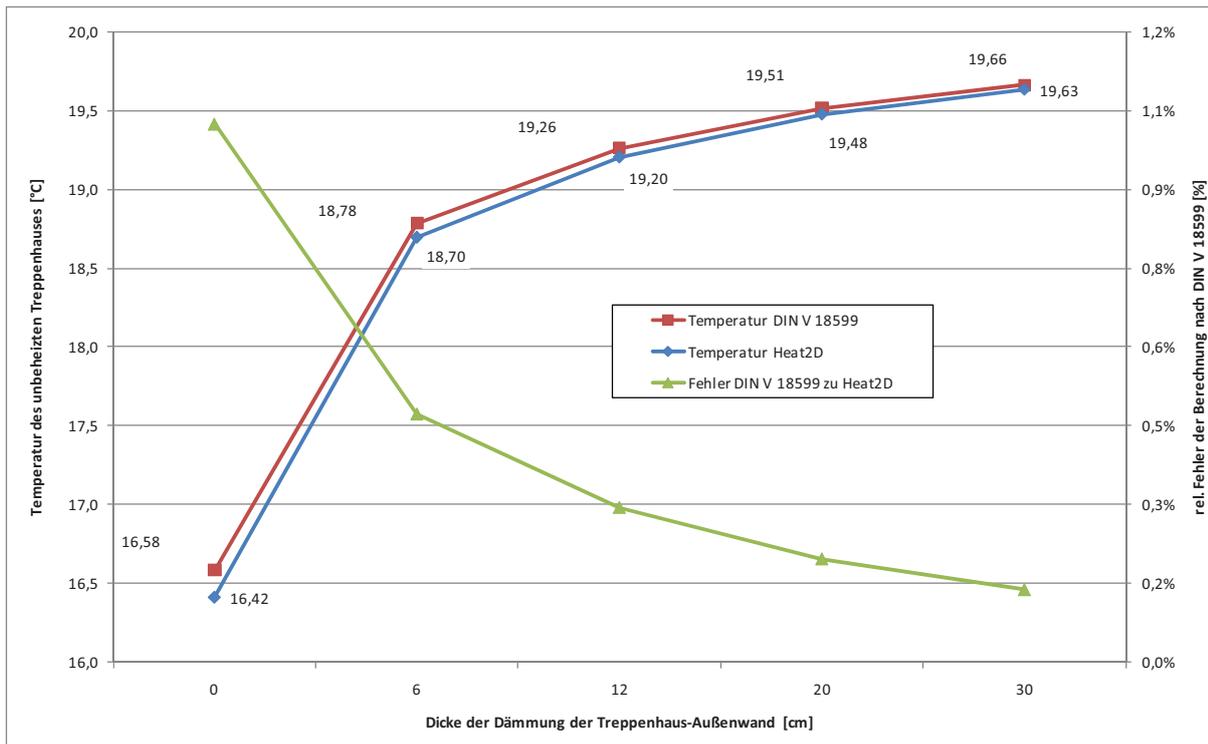
### 5.2.1 Vergleich von vereinfachtem Ansatz und Wärmestrom-Berechnung

Die DIN V 18599 enthält einen Berechnungsansatz zur Bestimmung der Temperatur unbeheizter Räume als Nachbarzonen beheizter Bereiche (siehe Kapitel 3.1). Damit soll die Temperatur der unbeheizten Zone exakter vorausberechnet werden können, als dies bei der Verwendung von pauschalen Temperatur-Reduktionsfaktoren möglich ist. Dieser Ansatz wurde auf Basis des Mustertreppenhauses überprüft. Dafür wurde für verschiedene Dämmstandards jeweils die Mitteltemperatur im Treppenhaus für ein Geschoss untersucht.

Zum Vergleich wurde mit dem Finite-Differenzen-Programm [Heat2D] jeweils die Temperatur in der Mitte des Treppenhauses berechnet und dargestellt. Hierbei muss berücksichtigt werden, dass das Programm Heat2D den Hohlraum im Treppenhaus unterteilt in eine Randzone mit der eingestellten Gitterweite entlang der Treppenhauswand und dem restlichen Treppenvolumen. Für die Mittelzone wird eine einheitliche Temperatur berechnet, die Temperatur der Randzone wird abhängig von der Temperatur der Treppenhauswand und Temperatur in der Mittelzone bestimmt.

Bei Heat2D wurde zur Modellierung des unbeheizten Luftraumes mit der internen Modifikation „Hole with air (radiation+vent.)“ gerechnet, wobei der Luftwechsel auf Null gesetzt wurde.

Abb. 5-3 zeigt für Dämmdicken der Außenwand zwischen 0 cm und 30 cm (Wärmeleitfähigkeit des Dämmstoffs 0,040 W/(mK)) die sich ergebenden Temperaturen im Treppenhaus sowie den Fehler der Berechnung nach DIN V 18599, wenn unterstellt wird, dass die Finite-Differenzen-Berechnung den exakten Wert darstellt. Es zeigt sich, dass die Abweichung zwischen der vereinfachten Berechnung und der zweidimensionalen Wärmestromberechnung bei gedämmten Treppenhäusern unter 0,5 % liegen, beim ungedämmten Gebäude steigt er auf 1 %.



**Abb. 5-3: Vergleich der Temperatur im Treppenhaus als unbeheizter Bereich nach DIN V 18599 und mit dem Finite-Differenzen-Programm Heat2D**

Aus dem Ergebnis wird gefolgert, dass der Berechnungsansatz nach DIN V 18599 in dem vereinfachten Treppenhausmodell gut verwendet werden kann.

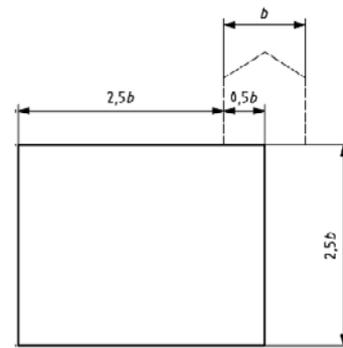
## 5.2.2 Temperaturdifferenzierung im Treppenhaus

Im Folgenden soll die Frage untersucht werden, welche vertikale Temperaturdifferenzierung sich im Treppenhaus einstellt. Dazu wird ein zweidimensionales Modell des gesamten Gebäudes mit unbeheiztem Treppenhaus untersucht, das mit dem Finite-Differenzen-Programm Heat2D erstellt wurde. Das Modell in Abb. 5-5 zeigt einen Vertikalschnitt durch das Gebäude im Bereich des Treppenhauses. Der Dachbereich wurde zur Vereinfachung als gedämmtes Flachdach modelliert. Der Keller des Gebäudes ragt 1,20 m aus dem Erdreich. Der Hauseingang ist um diese Höhe gegenüber dem Erdgeschoss versetzt, der Kellerabgang ist nicht modelliert (Kellerabgang oben geschlossen). Es wird unterstellt, dass alle beheizten Räume eine konstante Temperatur von 20 °C besitzen, wobei im Erdgeschoss keine direkte Koppelung zwischen der Raumtemperatur-Randbedingung und dem Fußboden stattfindet, sondern diese 1 m über dem Fußboden endet. Die Außentemperatur ist mit einer mittleren Außentemperatur von 4,4 °C angesetzt.

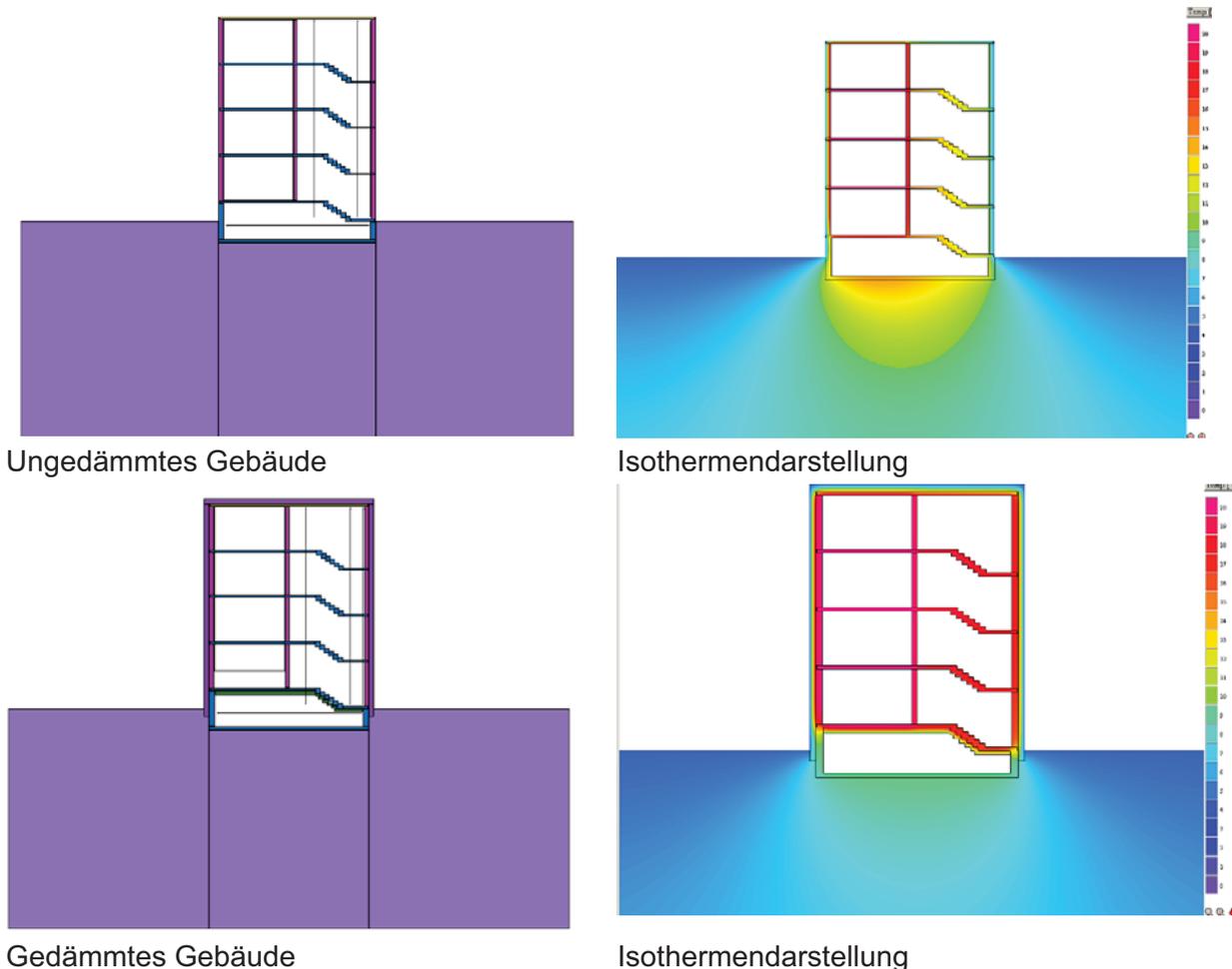
Die Gebäudebreite liegt bei 9,47 m, die Höhe bei 11 m (4 Stockwerke von Oberkante Erdgeschoss-Fußboden bis Oberkante Dach). Als gedämmte Variante wurde der Dämmstandard mit Passivhaus-Komponenten angesetzt.

Das Erdreich ist als adiabater Bereich unter dem nicht beheizten Keller des Gebäudes mit dem 2,5-Fachen der halben Gebäudebreite (entsprechend 11,84 m in horizontaler und vertikaler Richtung) entsprechend den Anforderungen der DIN EN ISO 10211 modelliert (siehe auch Abb. 5-4). Als Material für das Erdreich wurde Sand mit einer Wärmeleitfähigkeit von  $2 \text{ W/(mK)}$  und einer volumenbezogenen Wärmekapazität von  $1,95 \text{ MJ/(m}^3\text{K)}$  angesetzt.

Das Modell berücksichtigt den Wärmestrom über Transmission und Strahlungsaustausch zwischen den Flächen, jedoch weder einen Luftwechsel zwischen Treppenhaus und Außenluft noch zwischen Treppenhaus und dem beheizten Bereich.

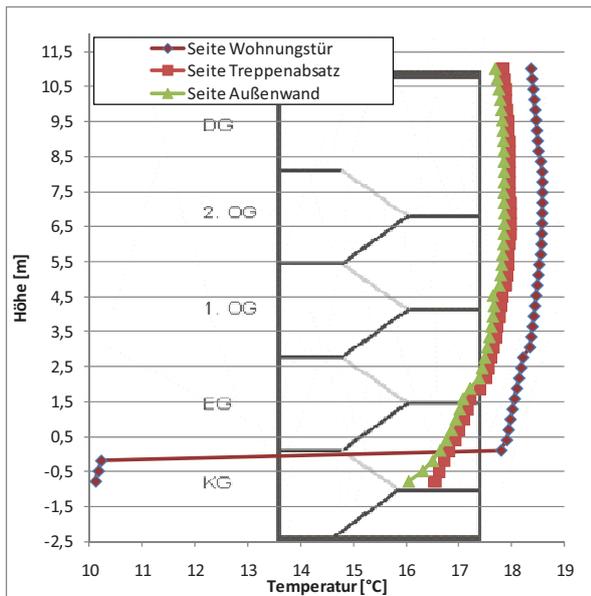


**Abb. 5-4: Modellierung des Erdreichs nach [DIN EN ISO 10211]**

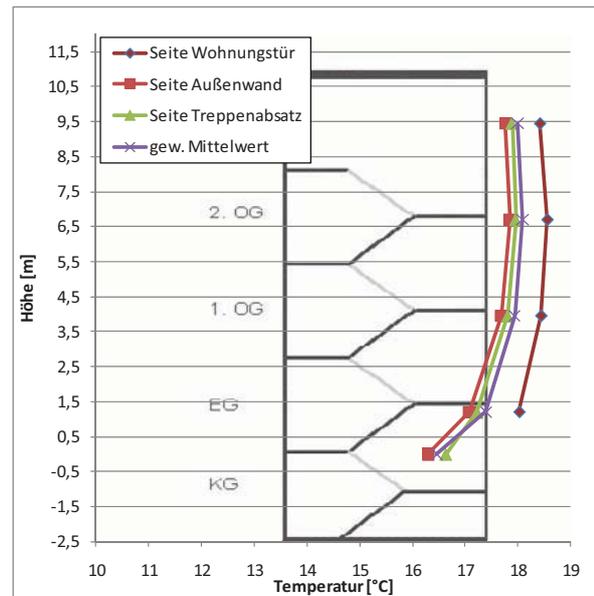


**Abb. 5-5: 2D-Modellierung des Treppenhauses im Ist-Zustand (oben) und mit PH-Komponenten modernisiert (unten) sowie jeweils die Isothermendarstellungen**

Der Temperaturverlauf im Treppenhaus ist in drei Ebenen in Abb. 5-6 zu sehen. Dargestellt sind die in Abb. 5-5 als dünne Linien dargestellten vertikale Ebenen im Treppenhaus: in der Ebene der Eingangspodeste, in der Ebene vor den Treppen und direkt vor der Außenwand. Die Skalierung der X-Achse zeigt die Entfernung ab oberem Ende des Treppenhauses.



**Abb. 5-6: Temperaturverlauf im Treppenhaus des gedämmten Gebäudes in drei vertikalen Ebenen; detaillierte Darstellung**



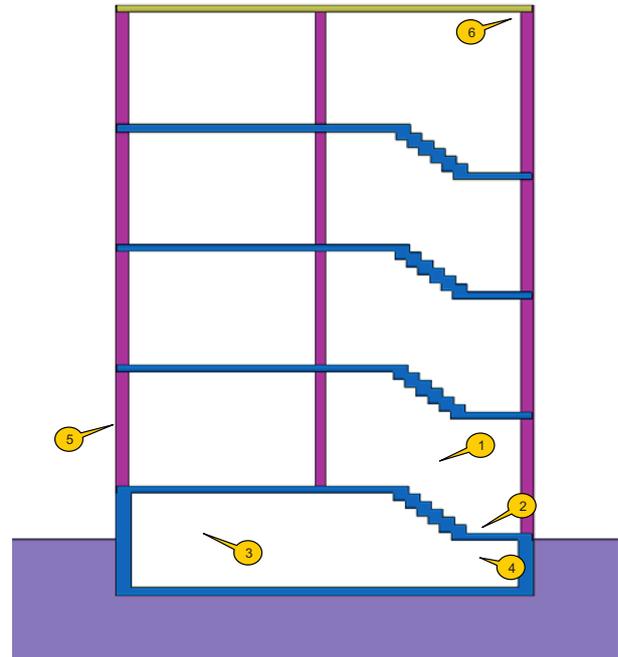
**Abb. 5-7: Temperaturverlauf im Treppenhaus als zonenweise Mittelwerte beim gedämmten Gebäude**

Es zeigt sich eine deutliche Temperaturdifferenzierung innerhalb des Treppenhauses, die in der Realität aufgrund von Luftströmungen (angetrieben durch die Temperaturdifferenzen sowie durch zusätzlich vorhandene Infiltrationsluftwechsel) geringer auftreten wird. Die Knicke in den Kurven treten an den Treppenpodesten auf, an denen die Wärmestromverhältnisse durch die hohe Wärmeleitung der Betondecke deutlich geändert werden. Die Daten für die „Seite Wohnungstür“ springen an der Erdgeschossdecke zum unbeheizten Keller, so dass dort die Temperatur schlagartig abfällt.

Die Berechnungen zeigen die vertikale Temperaturverteilung im Treppenhaus ohne Berücksichtigung von Konvektionseinflüssen. Im Mittel ergibt sich beim gewählten energetischen Standard eine Temperatur von 17,6 °C beim geschlossenen Kellerabgang. Allerdings muss berücksichtigt werden, dass das zweidimensionale Modell unterstellt, dass das Treppenhaus in der nicht dargestellten dritten Dimension eine große Ausdehnung besitzt. In der Realität besitzt das Treppenhaus jedoch nur eine Breite von ca. 2,20 m bis 2,50 m und besitzt zusätzliche Wärme übertragende Flächen zu den Wohnräumen, so dass die tatsächlichen Temperaturen höher liegen werden. Abb. 5-7 zeigt die zonenweise gemittelten Temperaturen im Treppenhaus.

### 5.2.3 Temperaturen im Treppenhaus im Jahresverlauf

Um untersuchen zu können, welche Treppenhaustemperatur sich im Jahresverlauf einstellt, wurde das Gebäudemodell aus dem vorherigen Kapitel dynamisch auf Basis des Testreferenzjahres [TRY] simuliert. Die Mitteltemperatur wurde mit 9,2 °C angesetzt, die Amplitude mit 11 °C. Zusammen mit einer Phasenverschiebung von 110 Tagen ergibt sich eine gute Übereinstimmung zwischen Testreferenzjahr und Temperaturfunktion, wobei diese die Dynamik des Außentemperaturganges nicht im Detail abbilden kann. Die Berechnungen wurden für 2 Jahre durchgeführt, wobei ein zusätzlicher Vorlauf von 3 Monaten zum Einschwingen des Modells vorangestellt wurde. In Abb. 5-8 sind die Temperaturmessstellen gekennzeichnet, die in den folgenden Diagrammen ausgegeben werden.

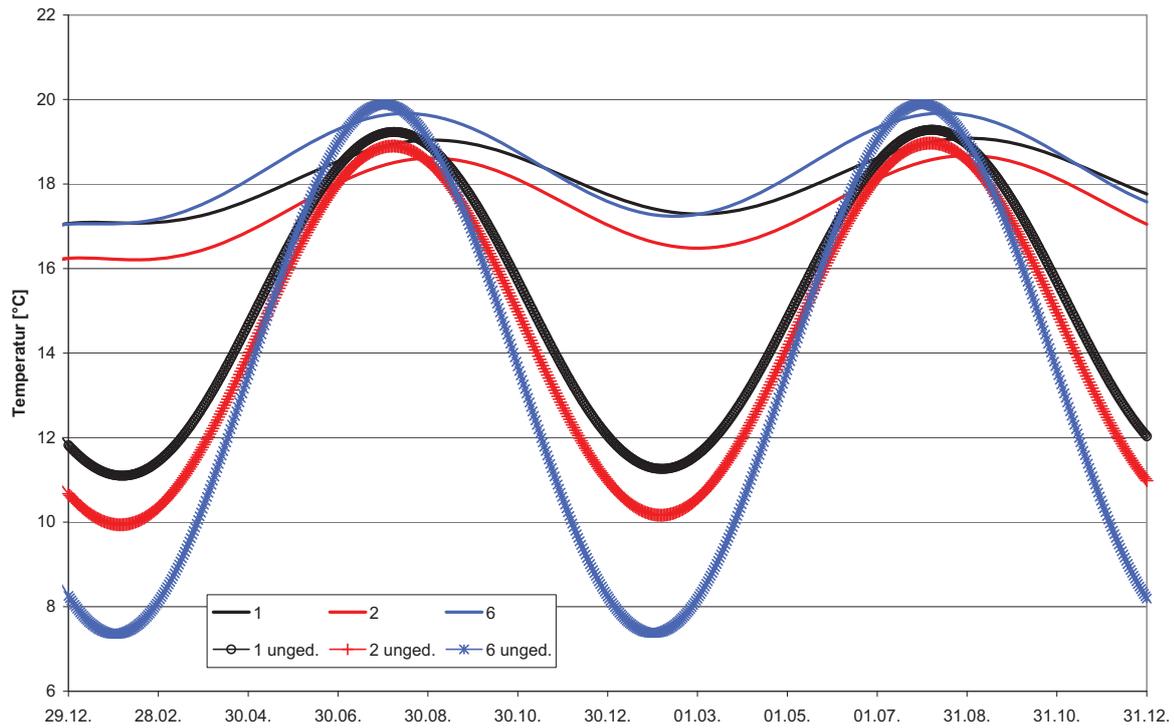


**Abb. 5-8: Lage der Messstellen bei der dynamischen Simulation**

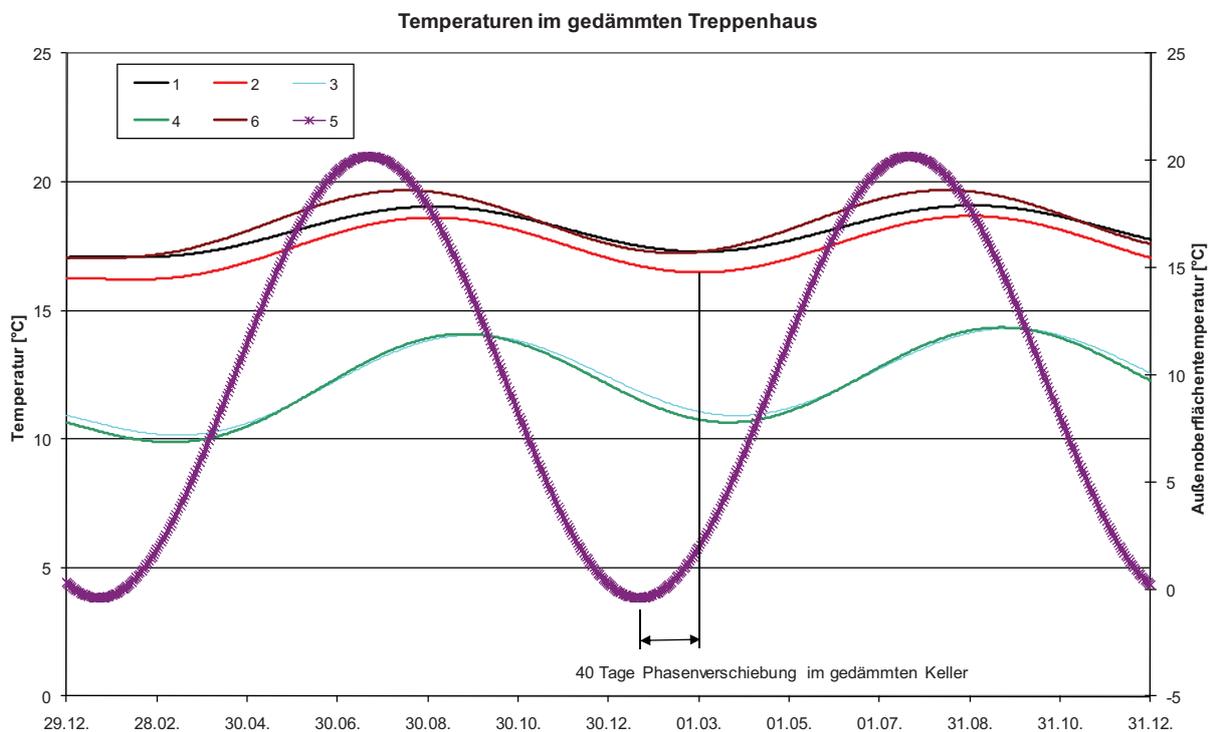
Abb. 5-9 zeigt die Temperaturen im Treppenhaus. Im ungedämmten Fall weisen die Messstellen 1, 2 und 6 einen ausgeprägten Jahresgang auf, die Amplitude der Temperaturen liegt zwischen 8 und 12,5 °C, wobei die größten Schwankungen am Punkt 6 (Treppenhausdecke oben) auftreten. Der Mittelwert der Temperatur über eine angenommene Heizperiode von Anfang Oktober bis Ende März liegt zwischen 10,1°C und 12,7 °C (siehe Tab. 5-2).

**Tab. 5-2: Mitteltemperaturen an den Messpunkten bei der dynamischen Berechnung**

|                                   | MP 1 | MP 2 | MP 3 | MP 4 | MP 5 | MP 6 |
|-----------------------------------|------|------|------|------|------|------|
| Gebäude ungedämmt                 |      |      |      |      |      |      |
| Okt.-März                         | 12,7 | 11,7 | 15,3 | 12,8 | 3,9  | 10,1 |
| Jahr                              | 14,8 | 14,1 | 16,4 | 14,5 | 10,0 | 13,6 |
| Modernisierung mit PH-Komponenten |      |      |      |      |      |      |
| Okt.-März                         | 18,3 | 17,8 | 13,3 | 13,2 | 5,7  | 18,4 |
| Nov.-März                         | 18,1 | 17,5 | 13,0 | 12,9 | 3,3  | 18,1 |
| Jahr                              | 18,0 | 17,4 | 12,0 | 11,9 | 9,9  | 18,4 |



**Abb. 5-9:** Temperatur im gedämmten und ungedämmten Treppenhaus im Jahresverlauf (dynamische Berechnung)



**Abb. 5-10:** Temperaturen im gedämmten Gebäude mit Darstellung der Phasenverschiebung zum Jahresgang der Außentemperatur

Ganz anders ist das Verhalten im gedämmten Gebäude, bei dem das Treppenhaus innerhalb der thermischen Hülle liegt. Die Amplitude im Jahresverlauf reduziert sich auf maximal 2,4 °C an Punkt 6. Die Mitteltemperaturen in der Zeit von Oktober bis März liegen zwischen 17,8 °C und 18,4°C, wird die kürzere Heizzeit im Passivhaus von Anfang November bis Ende März zugrunde gelegt, so liegen sie zwischen 17,5 °C und 18,1 °C. Durch die gute Dämmung ist die Temperaturspreizung im Treppenhaus somit deutlich zurückgegangen und liegt näher an der Raumtemperatur von 20 °C in den Wohnungen.

Vergleicht man die Ergebnisse der dynamischen Berechnung mit der statischen, so ist die Temperatur am Messpunkt MP6 nahezu identisch (18,1 °C bzw. 18,0 °C), die Temperaturen im Eingangsbereich und im Erdgeschoss liegen bei der dynamischen Berechnung 0,7 K (MP 1) bzw. 1 K (MP2) über dem Ergebnis der statischen Berechnung. Ursache sind die Puffereffekte der Speichermassen sowie des Erdreichs. Auch hier muss berücksichtigt werden, dass das Modell einen geringeren Wärmeeintrag von den Wohnungen in das Treppenhaus besitzt als ein reales Treppenhaus.

Die Phasenverschiebung zwischen Außentemperatur und Temperatur im Treppenhaus liegt beim ungedämmten Gebäude bei 24 Tagen, durch die Dämmung steigt diese auf 40 Tage an (Abb. 5-10).

### 5.3 Dynamische Simulation des Modellgebäudes

Dynamische Simulationen ermöglichen gegenüber statischen Berechnungen die Einbeziehung der sich im Jahresverlauf kontinuierlich ändernden Außentemperatur und damit verbunden die Berücksichtigung des Einflusses der Speichermassen des Gebäudes bei der Bestimmung der Temperaturen und Wärmeströme. Weiterhin können sie teilweise den Luftaustausch über geöffnete Fenster und Türen berücksichtigen. Dynamische Simulationsprogramme sind aus diesem Grund bei geeigneter Wahl der Randbedingungen in der Lage, die tatsächlichen Situationen im Gebäude am realistischsten abzubilden.

Im Rahmen dieser Untersuchung wurden für das Modellgebäude im Passivhaus-Standard verschiedene Simulationen mit dem Programm TAS durchgeführt. Im Folgenden werden das Gebäudemodell, die Varianten und die Berechnungsergebnisse dokumentiert.

#### 5.3.1 Beschreibung des TAS-Modells

Das Programm TAS ermöglicht eine dynamische, dreidimensionale Mehrzonen-Mehrknoten-Netzwerk-Simulation unter Berücksichtigung von Luftbewegungen zwischen den Zonen, Strahlung durch transparente Bauteile und dynamische Wärmeleitung. Pro Zone wird ein Raumluftknoten, pro Oberfläche ein Knoten mit getrennter Betrachtung von Strahlung und Konvektion verwendet. Weiterhin wird der langwellige Strahlungsaustausch aller Innenoberflächen im Raum berücksichtigt. Das Programm wurde unter anderem mit Messdaten des Passivhauses Darmstadt-Kranichstein validiert [Knissel 2002]. Für die hier vorgestellten Berechnungen wurde die Programmversion 9.2.1 verwendet.

Bei dem Simulationsmodell handelt es sich im Wesentlichen um das in 2.2 beschriebene Mustergebäude. Dieses wurde in 9 Zonen unterteilt, Tab. 5-3 zeigt die einzelnen Zonen.

Es wurden sechs unterschiedliche Varianten simuliert:

## Kellerabgang offen

- Alle Türen und Fenster geschlossen
- Treppenhausfenster im 3.OG dauerhaft gekippt
- Treppenhausfenster im 3.OG dauerhaft gekippt und Haustür wird 2-mal am Tag für je eine halbe Stunde ganz geöffnet

## Kellerabgang geschlossen

- Alle Türen und Fenster geschlossen
- Treppenhausfenster im 3.OG dauerhaft gekippt
- Treppenhausfenster im 3.OG dauerhaft gekippt und Haustür wird 2-mal am Tag für je eine halbe Stunde ganz geöffnet

**Tab. 5-3: Zonen der TAS-Simulationen**

| Zone                | Beschreibung   |
|---------------------|--|
| Keller1             | Der gesamte Kellerbereich außerhalb des Treppenhauses bildet eine Zone   |
| Trp_Keller          | Unterer Teil der Treppenhauses im Keller, bei geschlossenem Kellerabgang von Zone Trp_Keller_EG durch Tür getrennt |
| TrP_Keller_EG       | Eingangspodest des Treppenhauses, um ca. 1 m unterhalb des EG Niveau   |
| Trp_EG              | Treppenhaus im EG  |
| Trp_1.OG            | Treppenhaus 1. OG  |
| Trp_2.OG            | Treppenhaus 2. OG  |
| Trp_3.OG            | Treppenhaus 3. OG  |
| Wohnen1,<br>Wohnen2 | Je Geschoss, je eine Wohnung links / rechts, vom EG bis 3. OG gleiche, feste Raumtemperatur von 20 °C              |

Alle Simulationen wurden mit dem Modellgebäude, das mit Passivhaus-Komponenten modernisiert wurde, durchgerechnet. Das Erdreich wurde in einer Stärke von 3 m unter dem Kellerboden modelliert.

Die dynamischen Simulationen berücksichtigen – im Gegensatz zum vereinfachten Treppenhaus-Modell – auch solare Energiegewinne in den Wohnungen und im Treppenhaus.

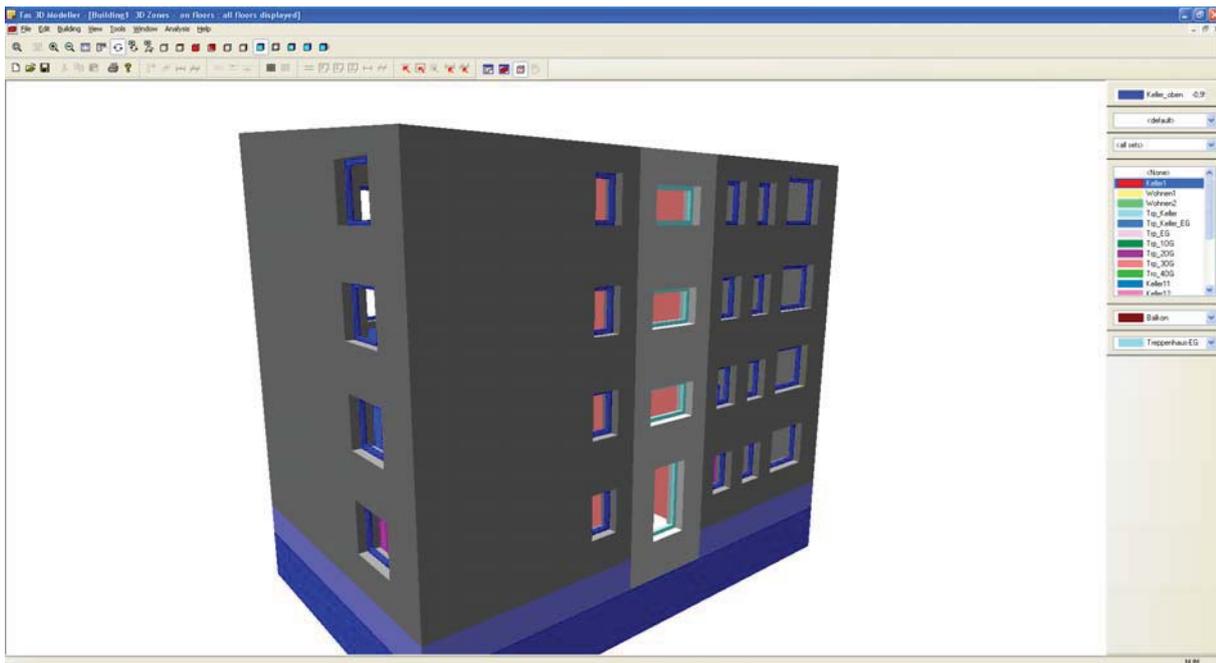


Abb. 5-11: Nordost-Ansicht des TAS-Modells mit Treppenhaus (hellgrau)

Beim Luftaustausch aufgrund der geöffneten Haustür wurde eine vollständig geöffnete Tür über 2-mal 30 Minuten angesetzt. Das gekippte Fenster im 3. Obergeschoss ist mit seiner äquivalenten Öffnungsfläche berücksichtigt.

Abb. 5-11 zeigt die Nordost-Ansicht des Gebäudes mit dem Treppenhausbereich (in hellgrau), weitere Randbedingungen der Simulation zeigt Tab. 5-4.

Tab. 5-4: Randbedingungen der TAS-Simulationen

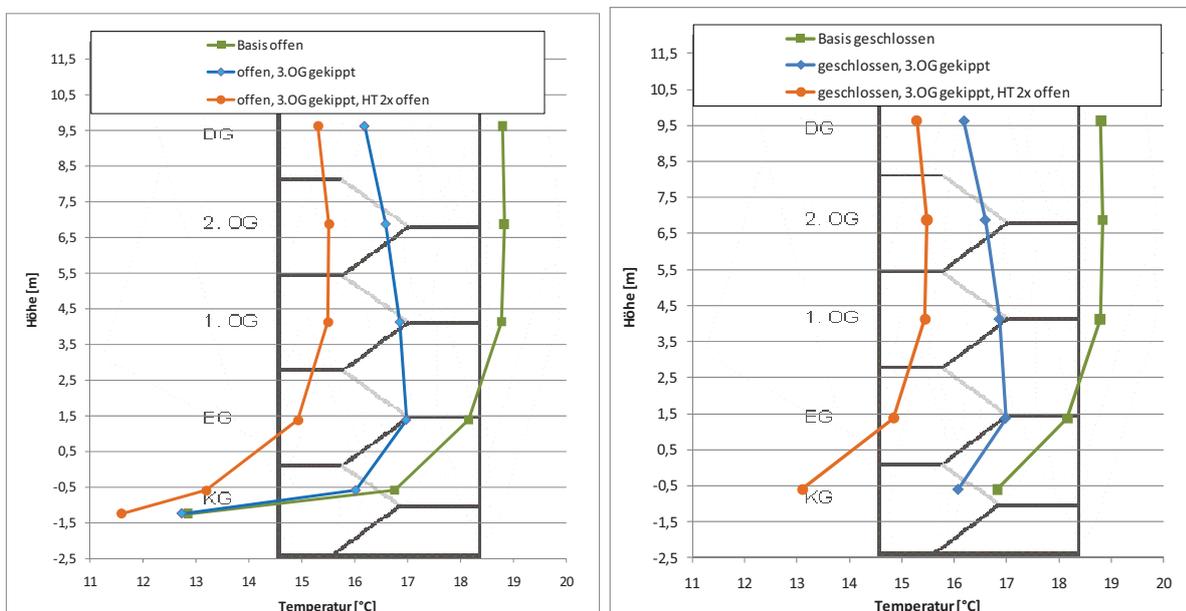
|   |   |
|---|---|
| Wetterdatensatz   | Testreferenzjahr Region 6 (nördlicher Oberrheingraben)                    |
| Temperatur Wohnräume  | 20 °C über 24 h   |
| Temperatur Treppenhaus und Keller   | freischwiegend  |
| Offener Querschnitt zwischen den Zonen im Treppenhaus                             | 7 m <sup>2</sup>  |
| Offener Querschnitt zwischen Trp_Keller und Trp_Keller_EG bei offenem Treppenhaus | 6,6 m <sup>2</sup>  |
| Infiltration aller Zonen  | 0,087 h <sup>-1</sup>   |
| Energierrelevanter Luftwechsel Wohnen   | 0,075 h <sup>-1</sup> (nach PHPP für Lüftungsanlage mit $n_{WRG} = 0,8$ ) |
| Innere Wärmequellen   | 2,1 W/m <sup>2</sup> kontinuierlich (nach PHPP)                           |
| Lage  | Innerstädtische Lage mit 10 m Abstand zum nächsten Gebäude                |

### 5.3.2 Temperaturschichtung im Treppenhaus

#### Treppenhaus mit offenem Kellerabgang

Beim Modellgebäude mit offenem Kellerabgang wurde die Trennfläche am Eingangspodest zum Kellerabgang als ganz geöffnet berücksichtigt, so dass ein Luftaustausch zum Vorraum im Keller vorhanden ist. Abweichend zu den vorgeschlagenen Modernisierungsmaßnahmen in Kapitel 2.3 wurde bei den Simulationen keine Dämmung der Kellerwände am Fuß des Kellerabgangs und am Kellerboden berücksichtigt. Nur die Kellerdecke und die Flächen unter dem Treppenlauf sind im Modell gedämmt. Weiterhin wurden keine Wärmebrücken berücksichtigt.

In Abb. 5-12 (links) sind die berechneten Temperaturen der einzelnen Treppenhaus-Zonen in Abhängigkeit der Höhe über Oberkante Erdgeschoss-Rohdecke dargestellt. Berechnet wurde ein ganzes Jahr, dargestellt ist der Mittelwert über die Zeit von Anfang November bis Ende März (entspricht etwa der Heizperiode im Passivhaus). Für die Basisvariante (grüne Linie mit Quadraten), bei der die Treppenhausfenster und -türen geschlossen sind, ergibt sich zwischen 1. OG und 3.OG eine gleichmäßige mittlere Temperatur von ca. 18,8 °C (bei 20 °C Raumtemperatur in den Wohnungen). Im 3.OG liegt die Treppenhaustemperatur leicht unter der im 2.OG, da die Verluste durch die zusätzliche Dachfläche im Treppenhauskopf geringfügig höher ausfallen. Die Temperatur im Erdgeschoss des Treppenhauses wird deutlich stärker von den zusätzlichen Wärmeverlusten durch die schlechter gedämmte Kellerdecke und die Haustür sowie die Verluste zum offenen Kellerabgang beeinflusst, liegt aber noch bei 18,1 °C. Am Eingangspodest sinkt die Temperatur auf 16,8 °C und im Kellervorraum, vor der Treppe sinkt sie – aufgrund der im Modell nicht berücksichtigten Dämmung im Keller – auf 12,85 °C und somit fast auf Kellertemperatur, die bei 12,5°C liegt (hier nicht dargestellt). Es zeigt sich somit ein deutliches Temperaturgefälle im unteren Bereich des Treppenhauses.



**Abb. 5-12:** Temperaturschichtung im Treppenhaus für den Zeitraum November bis Ende März in der TAS-Simulation für unterschiedliche Varianten mit offenem Kellerabgang (links) und geschlossenem Kellerabgang (rechts)

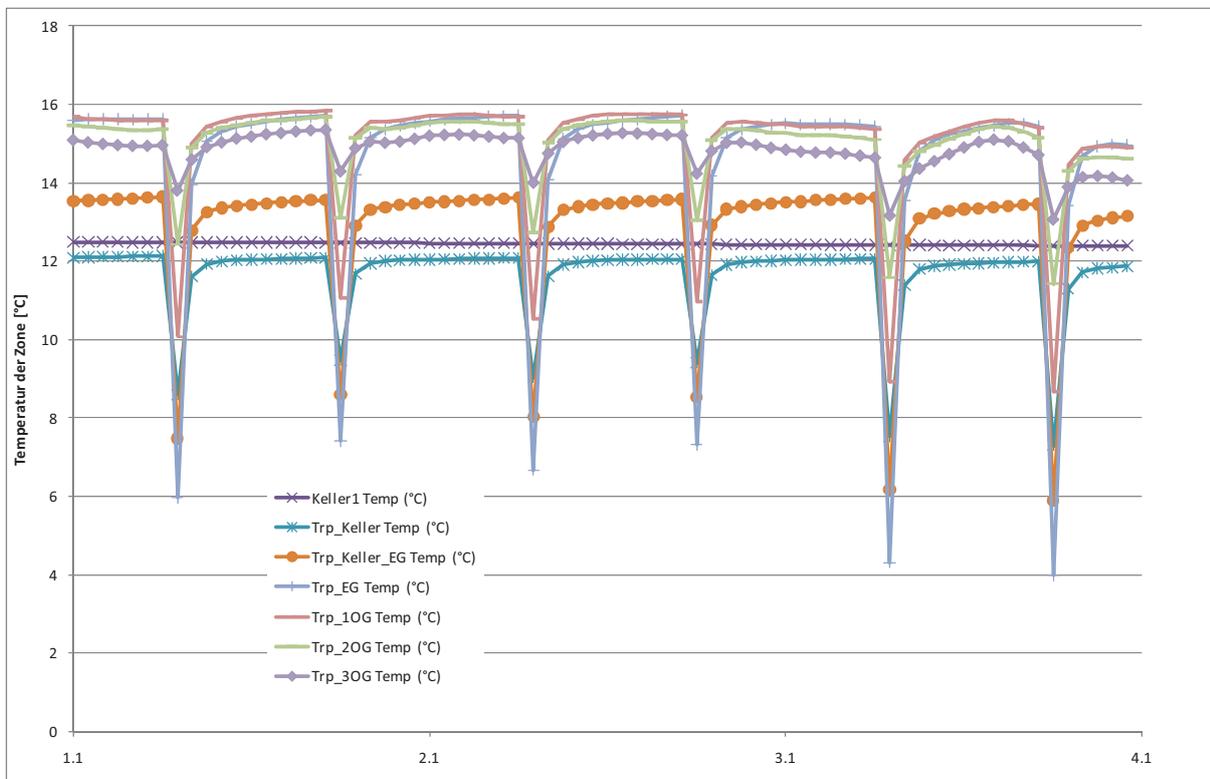
Wird unterstellt, dass das Treppenhausfenster im 3.OG dauerhaft gekippt ist (linkes Diagramm, blaue Linie mit Rauten), so entsteht durch dieses ein kontinuierlicher Luftaustausch mit der

Außenluft. Die Temperatur im 3.OG liegt dann nur noch bei 16,2 °C. In den Stockwerken darunter erreicht das Treppenhaus Temperaturen zwischen 16,6 °C und 17,0 °C, so dass aufgrund des thermischen Auftriebs ein kontinuierlicher Transport warmer Luft aus den darunter liegenden Stockwerken in das 3.OG und dort nach außen auftritt.

Wird zu dem dauerhaft gekippten Fenster auch noch zweimal am Tag für eine halbe Stunde die Haustür geöffnet (7:30 - 8:00 und 18:30 - 19:00), steigt in dieser Zeit der Luftaustausch im Treppenhaus deutlich an, so dass die Mitteltemperatur in den Stockwerken weiter absinkt (linkes Diagramm, orange Linie mit Kreisen). Durch die Auftriebsströmung im Treppenhaus stellt sich im Mittel über die Heizperiode eine vergleichsweise niedrige Temperatur zwischen 15,0 °C (EG) und 15,5 °C (1. OG) ein. Am Eingangspodest liegt die Temperatur nur noch bei 13,2 °C und im Vorraum im Keller bei 11,6 °C.

Es ergibt sich eine volumengewichtete Mitteltemperatur im Basisfall von 17,7 °C, beim geöffneten Fenster im 3. OG sinkt diese auf 16,1 °C und wenn das Fenster im 3.OG dauerhaft gekippt ist und die Haustür 2-mal täglich 30 Minuten geöffnet wird auf 14,7 °C.

Abb. 5-13 zeigt über drei Tage im Januar den Temperaturverlauf der einzelnen Treppenhauszonen für den Fall, dass das Treppenhausfenster im 3. OG gekippt ist und die Haustür zweimal am Tag für 30 Minuten geöffnet wird. Man erkennt den deutlichen Temperatureinbruch im Treppenhaus durch die Durchströmung des Treppenhauses bei offener Haustür. Bei niedrigen Außentemperaturen dauert es am dritten Tag länger, bis die Temperatur sich durch den Wärmefluss aus den Wohnungen und die im Treppenhaus gespeicherten Wärme wieder auf das Ausgangsniveau eingestellt hat.



**Abb. 5-13: Temperaturverlauf über 3 Tage bei Treppenhaus mit offenem Kellerabgang, gekipptem Fenster im 3.OG und 2x täglich 30 Minuten Öffnen der Haustür in der TAS-Simulation**

### **Treppenhaus mit geschlossenem Kellerabgang**

Das rechte Diagramm von Abb. 5-12 zeigt die Situation beim oben geschlossenen Kellerabgang. Auch hier ergibt sich in der Basisvariante (grüne Linie mit Quadraten) zwischen dem 1.OG und dem 3.OG eine nahezu gleiche Temperatur von ca. 18,8 °C. Im Erdgeschoss sinkt sie auf 18,1 °C und am Eingangspodest auf 16,8 °C. Die Mitteltemperatur im Treppenhaus liegt beim geschlossenen Kellerabgang bei 18,5 °C (zum Vergleich: offener Abgang 17,7 °C).

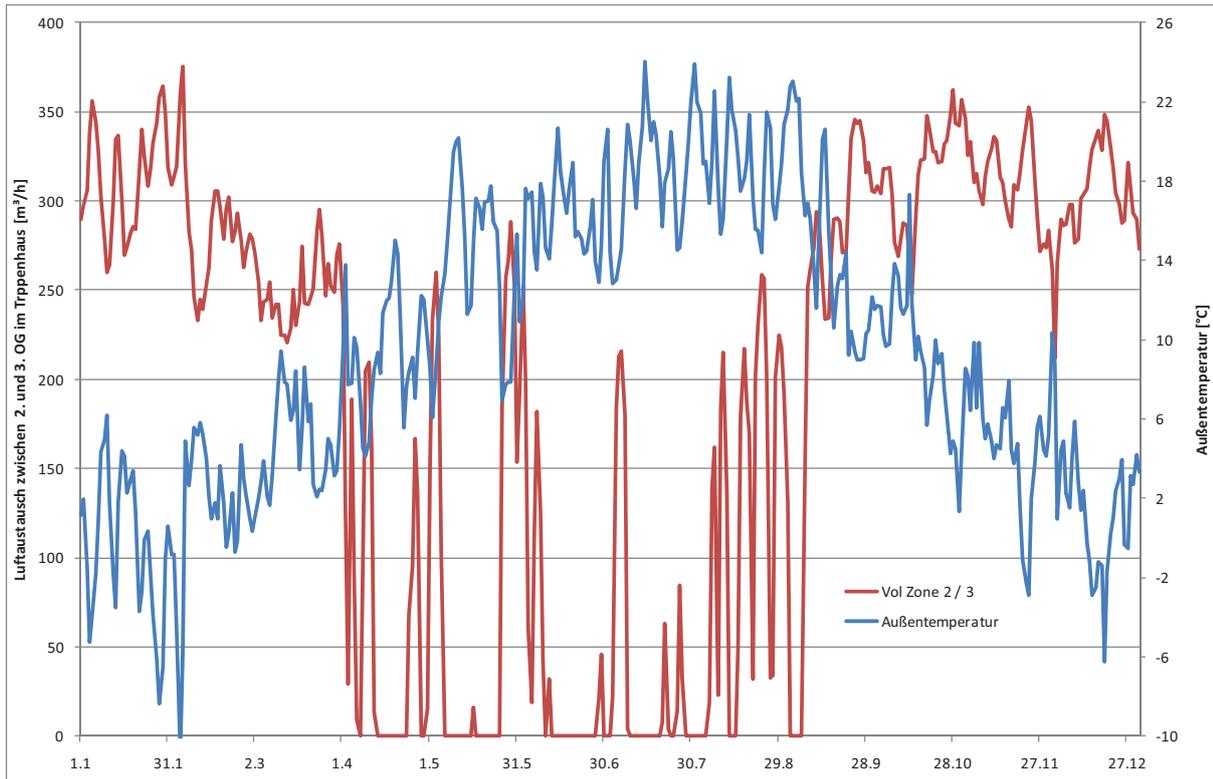
Wird das Treppenhausfenster im 3.OG dauerhaft gekippt (blaue Linie mit Rauten), sinkt die Temperatur ähnlich wie beim offenen Kellerabgang – im Mittel liegt sie dann nur noch bei 16,6 °C.

Wird die Haustür bei gekipptem Fenster im 3.OG im Winter regelmäßig geöffnet, so stellt sich eine gleichmäßigere Temperaturverteilung über die Geschosse ein, die Mitteltemperatur erreicht dann nur noch einen Wert von 15,1 °C.

### **5.3.3 Volumenströme im Treppenhaus**

#### Volumenströme innerhalb des Treppenhauses

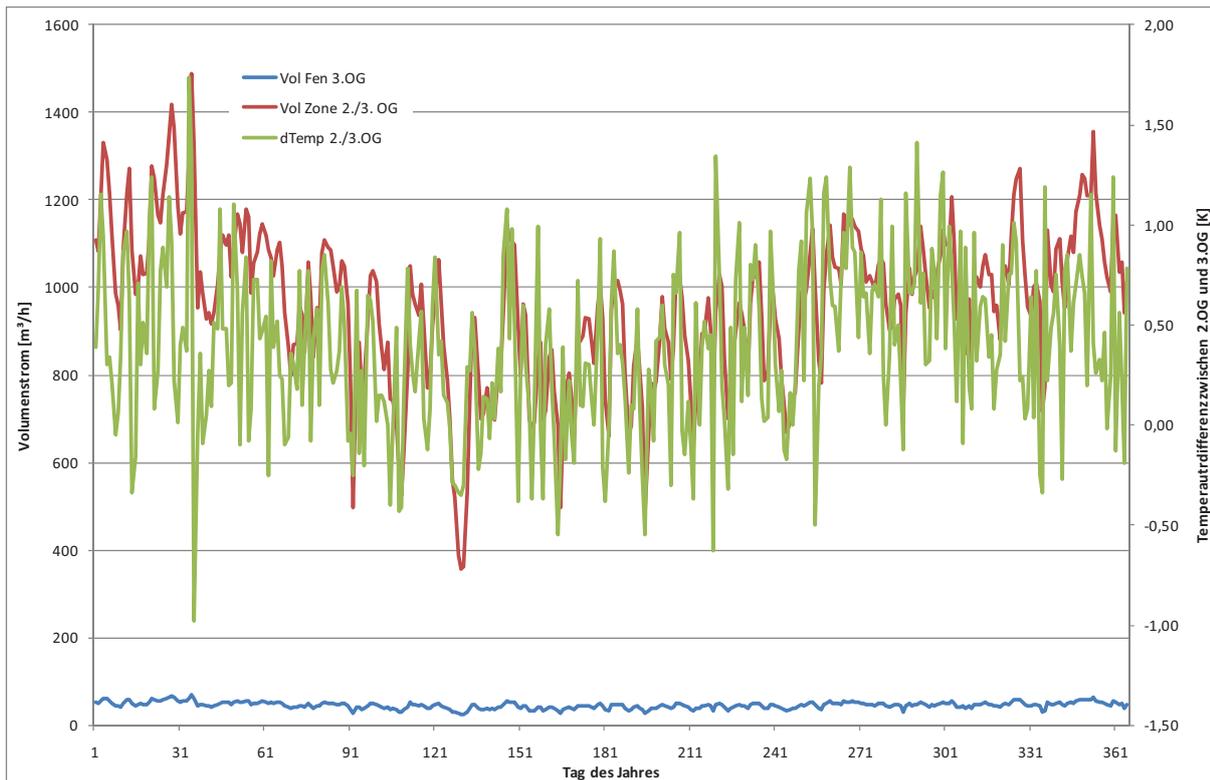
Abb. 5-14 zeigt die Volumenströme innerhalb des Treppenhauses bei geschlossenen Fenstern und Türen im Jahresverlauf, wobei ein gleich hoher Volumenstrom in die Zone berechnet wird, wie aus der Zone heraus (Masseerhaltungssatz). Dargestellt ist der Austausch zwischen der Treppenhauszone im 2.OG und 3. OG, der für beide Basisvarianten (Kellerabgang offen/geschlossen) identisch ist. Im Winter ist ein hoher Luftaustausch im Treppenhaus von ca. 280 m<sup>3</sup>/h vorhanden, der im Sommer teilweise auf Null abnimmt. Die mittlere Temperaturdifferenz zwischen dem Treppenhaus im 2. OG und im 3. OG im Winter beträgt lediglich ca. 0,033 K. Somit liegt der Luftaustausch innerhalb des Treppenhauses deutlich höher, als sich aus Abb. 4-5 bzw. Gl. (6) ergeben würde (ca. 100 m<sup>3</sup>/h bei den vorhandenen Temperaturen). Welcher Wert der Realität näher kommt, könnte nur mit aufwändigen Volumenstrommessungen vor Ort geklärt werden, die aber nicht vorliegen.



**Abb. 5-14: Volumenströme im Treppenhaus zwischen dem 2. und 3.OG aus der TAS-Simulation im Jahresverlauf für den geschlossenen und offenen Kellerabgang sowie die Außentemperatur**

#### Volumenströme durch gekipptes Fenster im 3.OG

Wir das Fenster im 3.OG des Treppenhauses gekippt, so stellt sich ein Luftaustausch durch das Fenster von ca. 50 m<sup>3</sup>/h im Jahresmittel ein. In der Folge steigt die Temperaturdifferenz zwischen 2. OG und 3.OG und somit der thermische Auftrieb zwischen den Zonen. Ein ganzjährig geöffnetes Treppenhausfenster führt im Mittel zu einer Erhöhung des Luftaustauschs innerhalb des Treppenhauses um ca. 760 m<sup>3</sup>/h bei einer um 0,35 °C höheren Temperatur im 2. OG. Betrachtet man nur die Heizperiode, so steigt der Luftaustausch um 778 m<sup>3</sup>/h (Abb. 5-15).

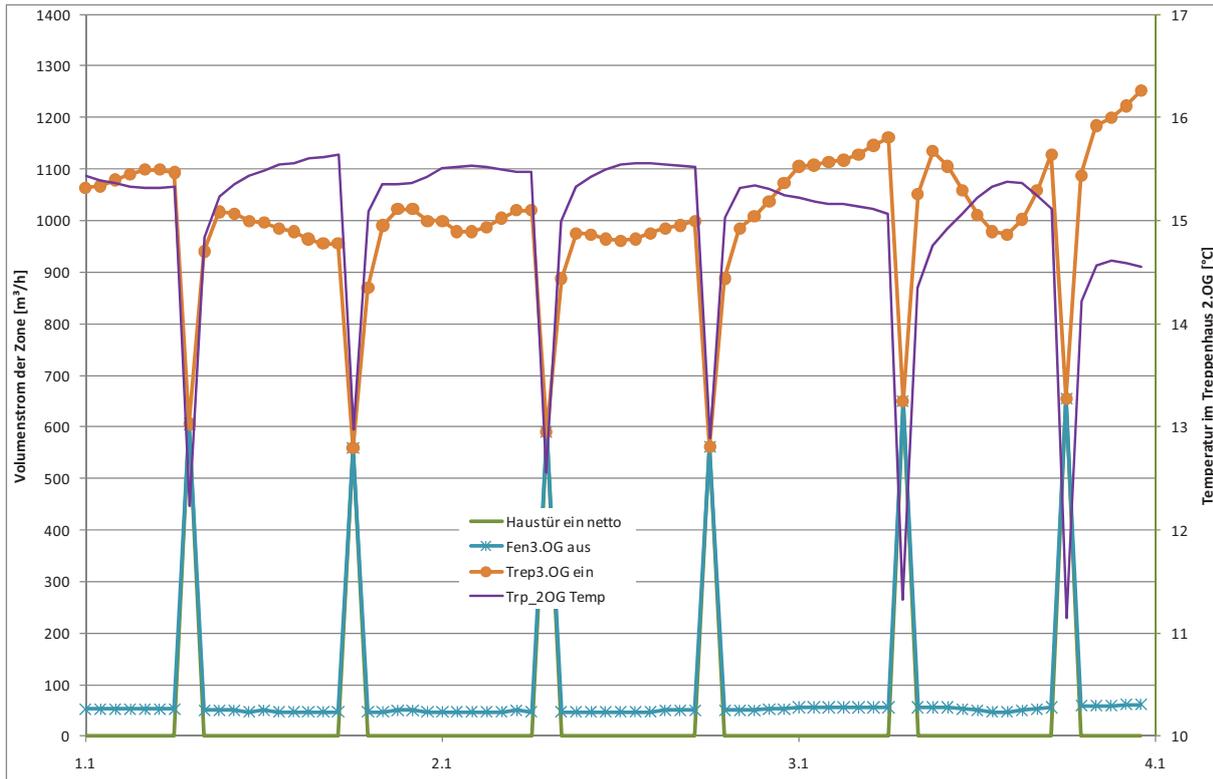


**Abb. 5-15:** Volumenströme im Treppenhaus zwischen dem 2. und 3.OG aus der TAS-Simulation im Jahresverlauf für das gekippte Fenster im 3. OG und offenen Kellerabgang sowie die Temperaturdifferenz zwischen Treppenhaus 2.OG – 3.OG

#### Volumenströme durch gekipptes Fenster im 3.OG und Öffnen der Haustür

Wird in dem Treppenhaus, in dem im 3. OG ein Fenster gekippt ist, die Haustür geöffnet, so stellt sich ein sehr hoher Volumenstrom von ca. 600 m<sup>3</sup>/h für die Zeit der Fensteröffnung im gesamten Treppenhaus ein (Winterfall). Dann „brechen“ die Zirkulationsströmungen zwischen den Zonen ein und es entsteht eine gerichtete Durchströmung von der Haustür aufwärts zum gekippten Fenster. Im Jahresmittel liegt dieser Luftaustausch bei ca. 500 m<sup>3</sup>/h bei geöffneter Haustür.

In der Folge sinkt die Temperaturen im Treppenhaus deutlich ab. In der Abb. 5-16 ist exemplarisch die Temperatur im 2. OG dargestellt, die von 15,5 °C auf unter 11,5 °C abfällt. In der Konsequenz sinkt die Temperatur im Treppenhaus immer weiter ab. Der Mittelwert der Temperatur im 2.OG für die drei dargestellten Tage liegt bei 15,0 °C, ohne Fensterlüftung und offene Haustür würde sie bei 18,5 °C liegen.



**Abb. 5-16: Volumenströme im Treppenhaus für 3 Tage, Variante: Treppenhaus mit oben geschlossenem Kellerabgang für das gekippte Fenster im 3. OG und 2x 30 Minuten geöffnete Haustür**

## 5.4 Modellrechnungen mit dem vereinfachten Treppenhausmodell

Das in Kapitel 3.5 beschriebene vereinfachte Treppenhausmodell soll im Folgenden mit Messdaten validiert werden und anschließend zur Berechnung der Temperaturen bei unterschiedlichen Ausführungen des Treppenhauses herangezogen werden.

### 5.4.1 Validierung des Treppenhausmodells mit Messdaten

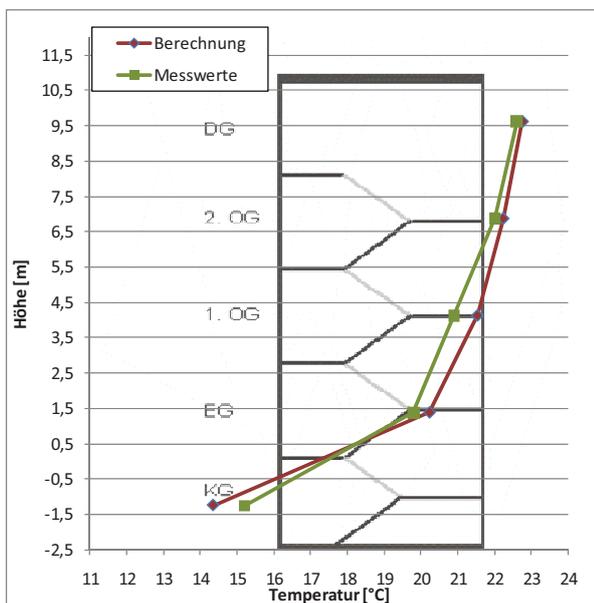
Das vereinfachte Modell für das Treppenhaus eines 4-stöckigen Gebäudes wurde zur Validierung mit Messdaten aus den Treppenhäusern der Gebäude Rotlintstraße 116-120 in Frankfurt verglichen. Es handelt sich dabei um Bestandsgebäude, die auf Passivhaus-Standard modernisiert wurden [IWU 2010]. Die Treppenhäuser besitzen eigene Lüftungsanlagen mit Wärmerückgewinnung.

Im Rahmen eines Messprogramms wurden u. a. die mittleren Temperaturen im Flur der Wohnungen kontinuierlich mit Datenloggern vom Typ Hobo U10 bzw. U12 gemessen. Für die Validierung wurde die Mitteltemperatur der jeweils angrenzenden Wohnungen über einen Zeitraum von 24 Stunden vor der Messung im Treppenhaus gebildet. Am 04.02.2010 wurde in allen drei Treppenhäusern mit einem kalibrierten Handmessgerät der Firma testo die Temperatur in den einzelnen Stockwerken im Treppenhaus sowie im Keller am Kellerabgang in ca. 1,40 m Höhe gemessen. Die Messdaten aus den Wohnungen (Abb. 5-20) wurden in das Treppenhausmodell als Randbedingen eingespeist und anschließend die berechneten Treppenhäusertemperaturen mit den Messdaten verglichen.

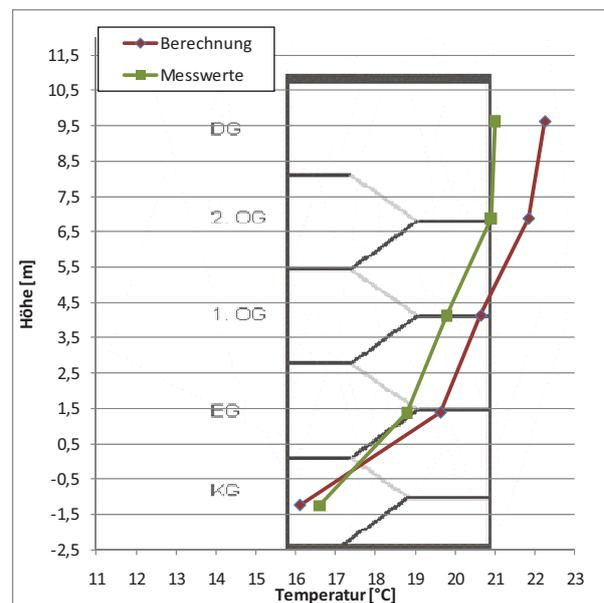
Abb. 5-17 bis Abb. 5-19 zeigen die Messdaten der Temperatur im Treppenhaus (grün) und die mit dem Treppenhausmodell berechneten Werte (rot). Es zeigt sich beim Haus 116 eine gute Übereinstimmung zwischen Berechnung und Messung, nur im 1. OG liegt die berechnete Temperatur 0,63 K über der gemessenen. Im Mittel über alle vier Stockwerke liegt die berechnete Temperatur 0,37 °C unter der gemessenen Temperatur, was deutlich unter der Messgenauigkeit der verwendeten Datenlogger ( $\pm 0,4$  °C) liegt.

Beim Treppenhaus im Gebäude 118 sind die Abweichungen in den oberen Stockwerken höher. Die berechnete Temperatur liegt im Mittel 1,13 °C über der gemessenen. Die Ursache für diese Abweichung ist nicht bekannt; ein möglicher Grund könnte z. B. ein höherer Volumenstrom der Treppenhauslüftung in diesem Gebäude sein. Im Juni 2010 wurden die Treppenhauslüftungsanlagen mit dem FlowFinder vermessen und es ergab sich für alle drei Gebäude eine ausbalancierte Lüftung von 20 bzw. 22 m<sup>3</sup>/h ( $\pm 1$  m<sup>3</sup>/h). Diese Volumenströme wurden im Treppenhausmodell berücksichtigt. Es ist aber nicht bekannt, ob der angesetzte Volumenstrom auch bei der Temperaturmessung vorlag. Wird die maximale Lüftungsstufe angesetzt (ca. 30 m<sup>3</sup>/h), so reduziert sich die Abweichung zwischen Messung und Berechnung auf 0,97 °C.

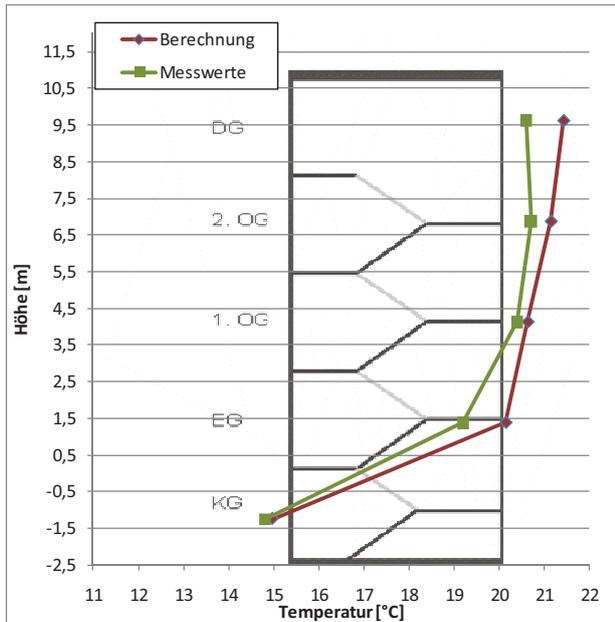
Beim Treppenhaus im Haus 120 liegt die mittlere Abweichung bei 0,61 °C. Im Dachgeschoss war zum Messzeitpunkt ein Treppenhausfenster gekippt. Dies führt dazu, dass verstärkt kalte Luft im Erdgeschoss einströmen kann und im Dachgeschoss wieder nach draußen (siehe Kapitel 5.3.3). Zusätzlich entsteht bei geschlossener Haustür ein Luftaustausch am gekippten Fenster. Diese Situation kann mit dem vereinfachten Treppenhausmodell nicht mehr korrekt abgebildet werden. Dennoch liegt die Abweichung zwischen Messung und Berechnung im vertretbaren Rahmen.



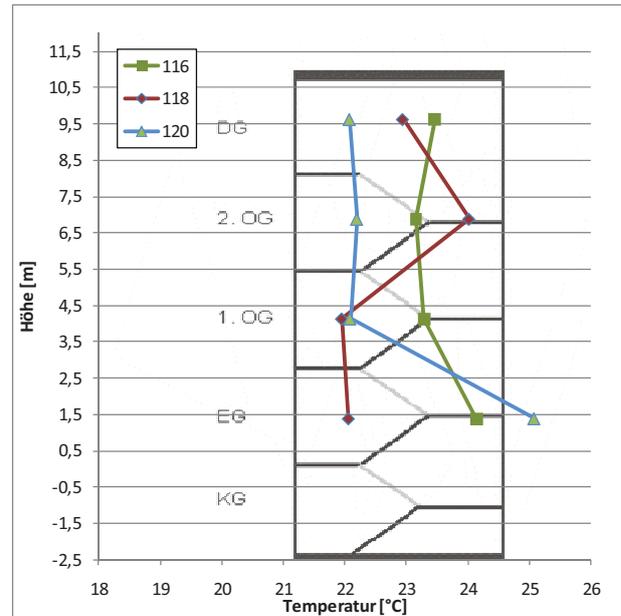
**Abb. 5-17: Vergleich von Messung und Berechnung am Gebäude Rotlintstraße 116**



**Abb. 5-18: Vergleich von Messung und Berechnung am Gebäude Rotlintstraße 118**



**Abb. 5-19: Vergleich von Messung und Berechnung am Gebäude Rotlintstraße 120**



**Abb. 5-20: Mittlere gemessene Wohnungstemperaturen in den drei Gebäuden**

Insgesamt zeigt der Vergleich von Messung und Berechnung unter Berücksichtigung der erzielbaren Messgenauigkeiten ausreichende Übereinstimmung von Treppenhausmodell und realer Situation vor Ort, um das vereinfachte Treppenhausmodell für weitere Untersuchungen einsetzen zu können.

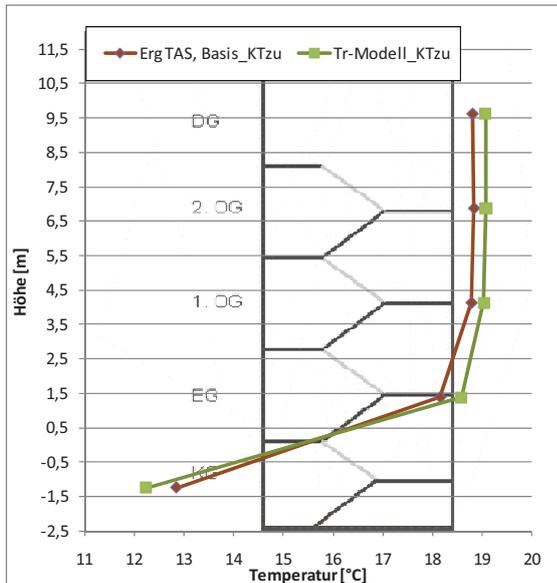
## 5.4.2 Vergleich des Treppenhausmodells mit den dynamischen Simulationen

Ergänzend zu dem Vergleich mit Messwerten aus einem realen Treppenhaus soll im Folgenden auch der Vergleich zu den Ergebnissen der dynamischen Gebäudesimulation mit dem Programm TAS gezogen werden. Dazu wurden das in TAS hinterlegte Außenklima, die Temperaturen der Wohnungen und die Verluste am nicht gedämmten Kellerabgang in das vereinfachte Treppenhausmodell eingegeben.

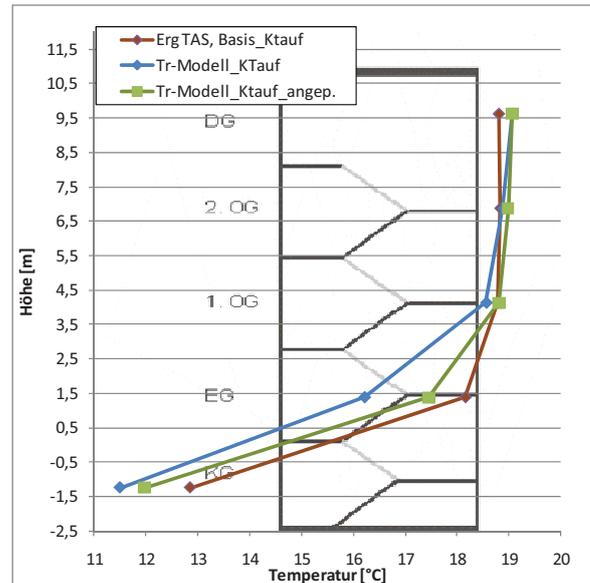
Abb. 5-21 zeigt den Vergleich für das Treppenhaus mit oben geschlossenem Kellerabgang. Die Temperaturen des Treppenhausmodells liegen im Mittel  $0,11\text{ °C}$  über denen der TAS-Simulationen. Im Erdgeschoss liegt die Temperatur im vereinfachten Modell  $0,43\text{ °C}$  über derjenigen des TAS-Modells, im Kellergeschoss  $0,62\text{ °C}$  darunter. Dennoch ist hier eine ausreichend gute Übereinstimmung festzustellen.

Beim offenen Kellerabgang ergäbe sich eine mittlere Abweichung zwischen TAS-Ergebnissen und Treppenhaus-Modell von  $0,64\text{ °C}$ . Allerdings liegt die Temperatur im Erdgeschoss ohne Anpassung  $1,94\text{ °C}$  unter derjenigen im TAS-Modell. Somit wird die Ankopplung der Erdgeschossstemperaturen an den Keller überschätzt. In Abb. 5-22 ist zusätzlich die Situation dargestellt, wenn an Stelle des konvektiven Transports in der Treppenhausöffnung von  $20\text{ W/K}$  eine stabile thermische Schichtung unterstellt wird (oben wärmer als unten). Diese würde dazu führen, dass keine Auftriebsströmungen entstehen ( $H_{\text{konv}}=0\text{ W/K}$ ). Wird der konvektive Luftaustausch auf Null gesetzt, so liegt die Abweichung zwischen vereinfachtem Modell und TAS-Simulation nur noch bei  $0,7\text{ °C}$  im Erdgeschoss und  $0,23\text{ °C}$  im Mittel für das gesamte

Treppenhaus. In den folgenden Berechnungen wird aus diesem Grund beim offenen Kellerabgang kein konvektiver Wärmeaustausch berücksichtigt.



**Abb. 5-21: Vergleich von Treppenhausmodell und TAS-Simulation für den oben geschlossenen Kellerabgang**



**Abb. 5-22: Vergleich von Treppenhausmodell und TAS-Simulation für den offenen Kellerabgang**

### 5.4.3 Varianten der Treppenhausausführung

In diesem Kapitel werden unterschiedliche Ausführungen des Gebäudes und des Treppenhauses mit dem vereinfachten Treppenhausmodell untersucht. Die Ergebnisse werden anschließend für die Bilanzierung mit dem PHPP verwendet. Die Kürzel haben die Systematik gemäß Tab. 5-5.

**Tab. 5-5: Abkürzungen der Varianten**

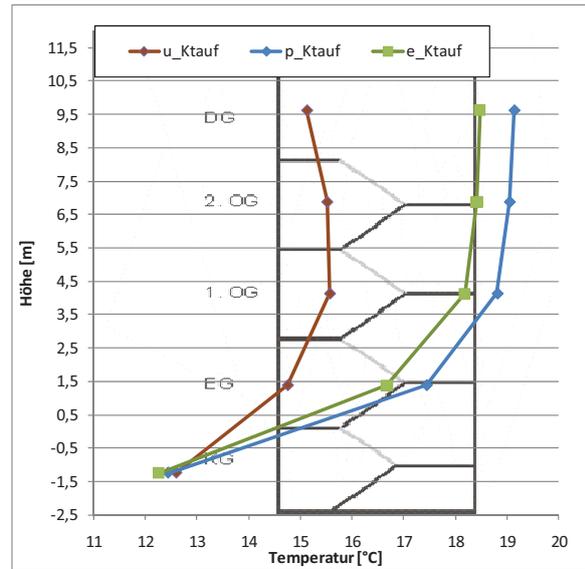
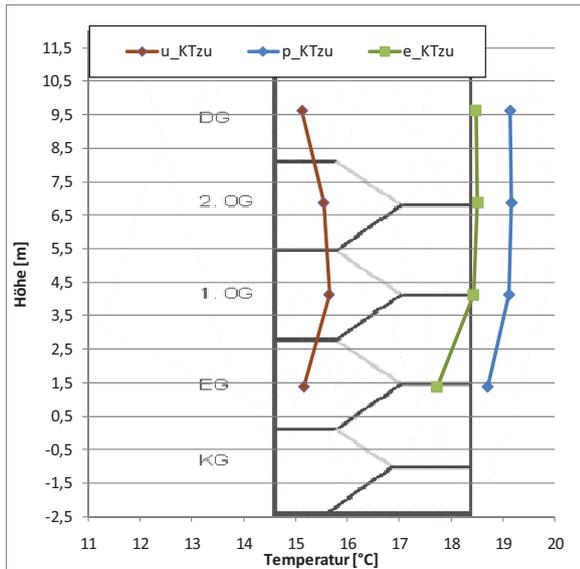
| Kürzel | Erläuterung         | Kürzel | Erläuterung            | Kürzel | Erläuterung                     |
|--------|---------------------|--------|------------------------|--------|---------------------------------|
| u_     | unsaniert           | KTzu   | Kellerabg. geschlossen | _n50:  | n <sub>50</sub> -Wert           |
| e_     | EnEV-Modernisierung | KTauf  | Kellerabg. offen       | _Abl:  | Abluftanlage:<br>Luftwechsel    |
| p_     | PH-Komponenten      |        |                        | _WRG:  | Lüftung mit WRG:<br>Luftwechsel |

#### Basisvarianten

Die Basisvarianten umfassen das Treppenhaus mit oben geschlossen sowie offenem Kellerabgang in den Ausführungen unsaniert, EnEV-Modernisierung und PH-Modernisierung. Es ergibt sich die bereits bekannte Temperaturverteilung im Treppenhaus. Der Mittelwert in Tab. 5-6 enthält für alle Varianten mit geschlossenem Kellerabgang nur die Obergeschosse ohne Keller, da nur das Treppenhaus bilanziert werden soll. Abb. 5-23 zeigt die Temperaturverteilung im Treppenhaus für die unterschiedlichen Varianten über die Geschosse grafisch.

**Tab. 5-6: Zonentemperaturen im Treppenhaus für die Basisvarianten**

|            | u KTzu | e KTzu | p KTzu | u Ktauf | e Ktauf | p Ktauf |
|------------|--------|--------|--------|---------|---------|---------|
| DG         | 15,13  | 18,47  | 19,13  | 15,13   | 18,47   | 19,13   |
| 2.OG       | 15,55  | 18,51  | 19,16  | 15,51   | 18,42   | 19,04   |
| 1.OG       | 15,65  | 18,43  | 19,11  | 15,57   | 18,18   | 18,81   |
| EG         | 15,16  | 17,73  | 18,70  | 14,75   | 16,68   | 17,44   |
| KG         | 12,85  | 13,00  | 13,15  | 12,60   | 12,27   | 12,44   |
| Mittelwert | 15,37  | 18,29  | 19,03  | 14,71   | 16,80   | 17,37   |


**Abb. 5-23: Temperatur im Treppenhaus für die Basisvarianten: links geschlossener Kellerabgang, rechts offener Kellerabgang**

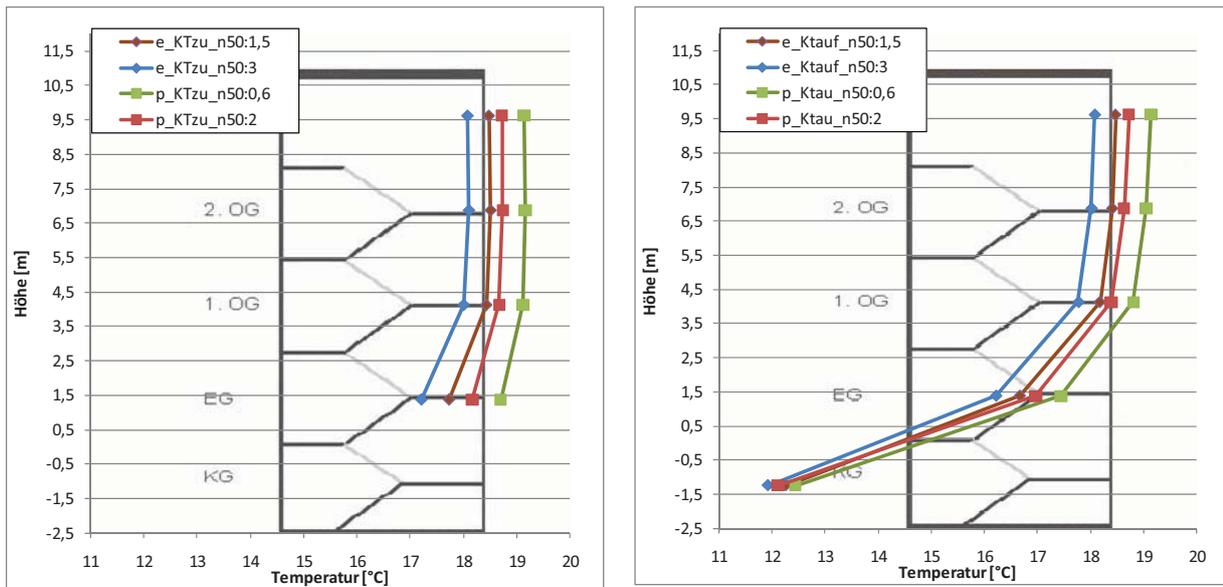
### Einfluss der Luftdichtigkeit der Gebäudehülle

Für die beiden gedämmten Varianten werden nun die Temperaturen im Treppenhaus für unterschiedliche Werte der Luftdichtigkeit des Treppenhauses ( $n_{50}$ -Wert) dargestellt (Tab. 5-7 Abb. 5-24).

**Tab. 5-7: Zonentemperaturen im Treppenhaus für unterschiedliche Undichtigkeiten des Treppenhauses**

|            | e_KTzu_n50:1,5 | e_KTzu_n50:3 | p_KTzu_n50:0,6 | p_KTzu_n50:2 | e_Ktauf_n50:1,5 | e_Ktauf_n50:3 | p_Ktauf_n50:0,6 | p_Ktauf_n50:2 |
|------------|----------------|--------------|----------------|--------------|-----------------|---------------|-----------------|---------------|
| DG         | 18,47          | 18,07        | 19,13          | 18,73        | 18,47           | 18,07         | 19,13           | 18,73         |
| 2.OG       | 18,51          | 18,10        | 19,16          | 18,74        | 18,42           | 18,01         | 19,04           | 18,63         |
| 1.OG       | 18,43          | 18,00        | 19,11          | 18,67        | 18,18           | 17,77         | 18,81           | 18,39         |
| EG         | 17,73          | 17,22        | 18,70          | 18,17        | 16,68           | 16,22         | 17,44           | 16,97         |
| KG         | 13,00          | 12,77        | 13,15          | 12,92        | 12,27           | 11,93         | 12,44           | 12,11         |
| Mittelwert | 18,29          | 17,85        | 19,03          | 18,58        | 16,80           | 16,40         | 17,37           | 16,97         |

Die Erhöhung des  $n_{50}$ -Wertes führt bei allen Varianten zu einer Reduktion der Mitteltemperatur von ca. 0,5 °C.



**Abb. 5-24: Temperatur im Treppenhaus für unterschiedliche Undichtigkeiten der Gebäudehülle: links geschlossener Kellerabgang, rechts offener Kellerabgang**

### Einfluss einer mechanischen Lüftung im Treppenhaus

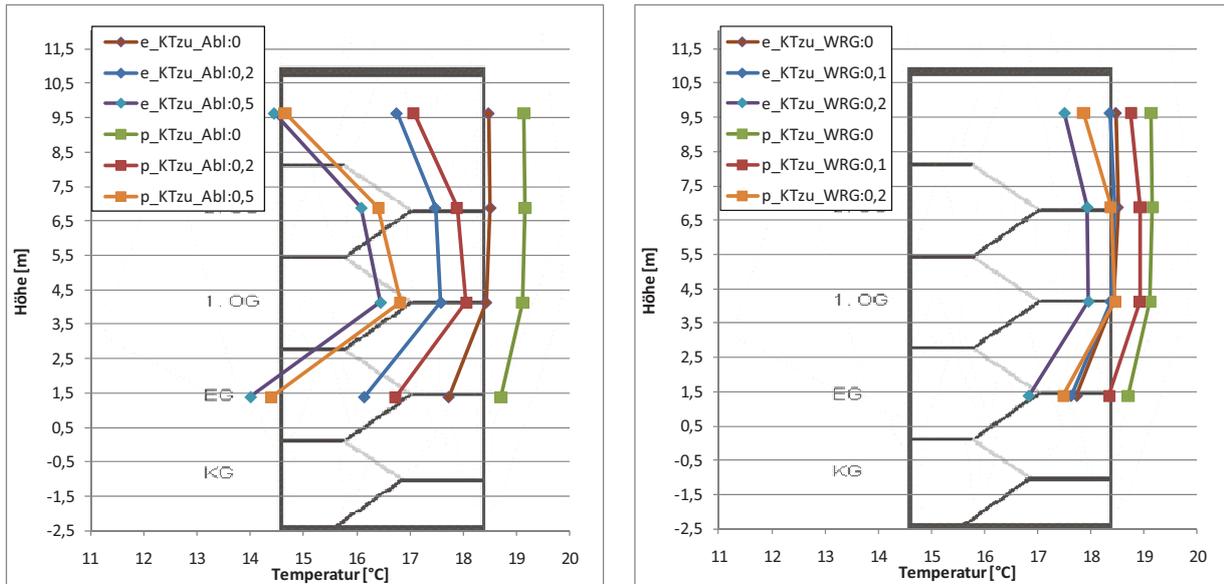
Für die beiden gedämmten Varianten wird nun der Einfluss einer mechanischen Lüftung im Treppenhaus untersucht. Beide gedämmten Varianten werden für den geschlossenen Kellerabgang und unterschiedliche Luftwechsel mit einer reinen Abluftanlage (Tab. 5-8) sowie Zu- und Abluft mit Wärmerückgewinnung (Rückwärmzahl 75 %) (Tab. 5-9) untersucht. Der  $n_{50}$ -Wert der PH-Variante liegt bei 0,6 h<sup>-1</sup>, derjenige der EnEV-Variante bei 1,5 h<sup>-1</sup>. Die Abluft wird bei allen Varianten im Dachgeschoss abgezogen, die Zuluft (mit/ohne Wärmerückgewinnung) strömt im Erdgeschoss nach. Die Ergebnisse sind in Abb. 5-25 grafisch dargestellt.

**Tab. 5-8: Zonentemperaturen im Treppenhaus für unterschiedliche Volumenströme einer Abluftanlage**

|            | e_KTzu_Abl:0 | e_KTzu_Abl:0,2 | e_KTzu_Abl:0,5 | p_KTzu_Abl:0 | p_KTzu_Abl:0,2 | p_KTzu_Abl:0,5 |
|------------|--------------|----------------|----------------|--------------|----------------|----------------|
| DG         | 18,47        | 16,75          | 14,44          | 19,13        | 17,07          | 14,65          |
| 2.OG       | 18,51        | 17,47          | 16,08          | 19,16        | 17,89          | 16,40          |
| 1.OG       | 18,43        | 17,58          | 16,44          | 19,11        | 18,05          | 16,82          |
| EG         | 17,73        | 16,15          | 14,00          | 18,70        | 16,73          | 14,40          |
| KG         | 13,00        | 13,00          | 13,00          | 13,15        | 13,15          | 13,15          |
| Mittelwert | 18,29        | 16,99          | 15,24          | 19,03        | 17,43          | 15,57          |

**Tab. 5-9: Zonentemperaturen im Treppenhaus für unterschiedliche Volumenströme einer Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung**

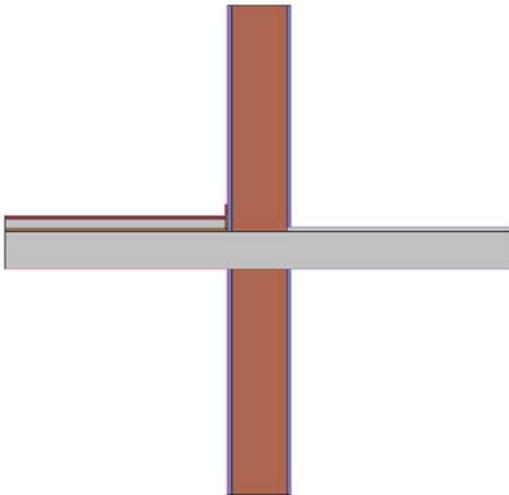
|            | e_KTzu_WRG:0 | e_KTzu_WRG:0,1 | e_KTzu_WRG:0,2 | p_KTzu_WRG:0 | p_KTzu_WRG:0,1 | p_KTzu_WRG:0,2 |
|------------|--------------|----------------|----------------|--------------|----------------|----------------|
| DG         | 18,47        | 18,36          | 17,51          | 19,13        | 18,76          | 17,86          |
| 2.OG       | 18,51        | 18,44          | 17,93          | 19,16        | 18,93          | 18,37          |
| 1.OG       | 18,43        | 18,37          | 17,95          | 19,11        | 18,92          | 18,46          |
| EG         | 17,73        | 17,63          | 16,84          | 18,70        | 18,34          | 17,48          |
| KG         | 13,00        | 13,00          | 13,00          | 13,15        | 13,15          | 13,15          |
| Mittelwert | 18,29        | 18,20          | 17,56          | 19,03        | 18,74          | 18,04          |



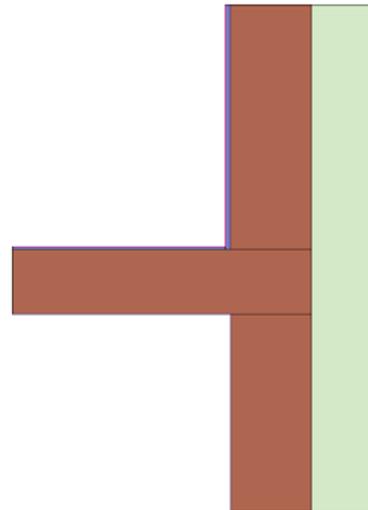
**Abb. 5-25: Temperatur im Treppenhaus für unterschiedliche Belüftungskonzepte: links Abluftanlage, rechts Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung**

## 5.5 Bilanzierung mit angepassten Treppenhaustemperaturen

Während in Kapitel 5.1 die Energiebilanz des Mustergebäudes in verschiedenen Varianten mit Standardrandbedingungen und unter Berücksichtigung der zusätzlichen Flächen und Wärmebrücken des Treppenhauses berechnet wurde, soll jetzt das Treppenhaus als unbeheizte Zone außerhalb der thermische Hülle, aber mit den in Kapitel 5.4 bestimmten mittleren Temperaturen bilanziert werden. In diesem Fall bildet die Treppenhauswand die thermische Hülle und es sind andere Wärmebrücken zu berücksichtigen. Diese sind die Einbindung der Treppe bzw. der Treppenpodeste in die Treppenhauswand sowie die Treppenhauswand in die Außenwand. Abb. 5-26 und Abb. 5-27 zeigen die beiden Details und die resultierenden  $\Psi$ -Werte. Beim rechten Detail werden aufgrund des Außenmaßbezugs alle Werte negativ, dennoch treten an dieser Stelle zusätzliche Wärmeverluste auf.



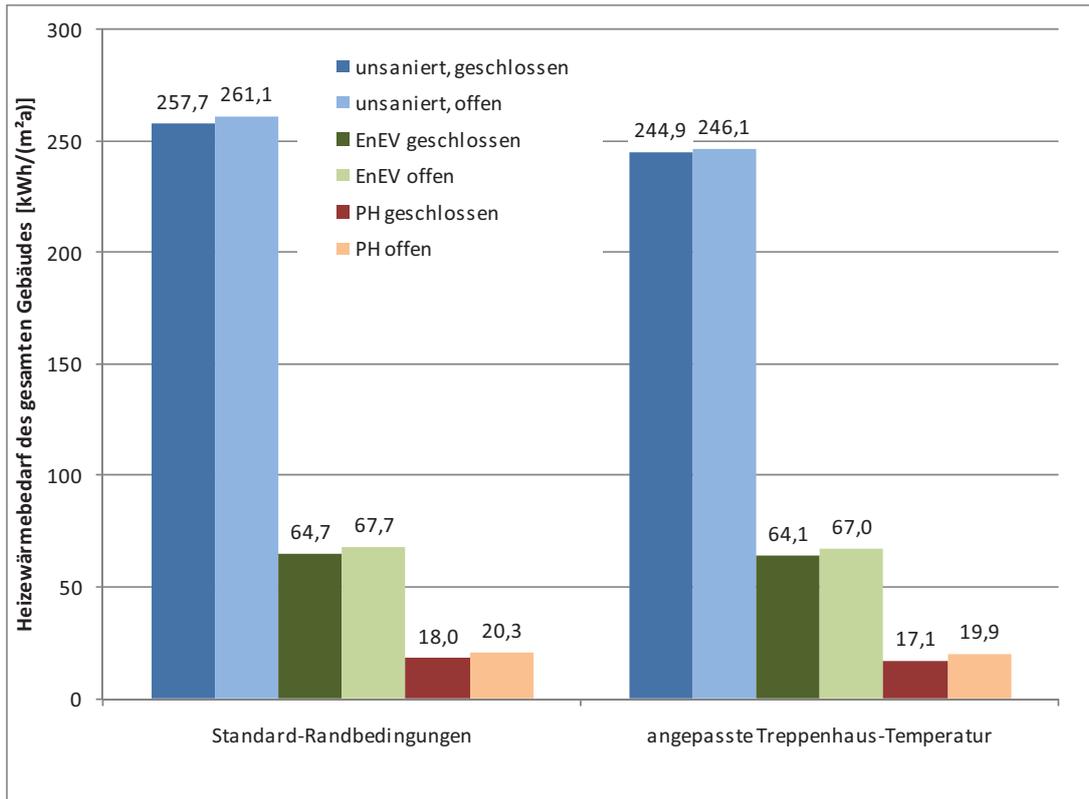
**Abb. 5-26: Vertikaler Schnitt der Einbindung der Treppe in die Treppenhausewand**  
 $\Psi$ -Wert: 0,136 W/(mK)  
 Gesamtlänge: 60,8 m



**Abb. 5-27: Horizontaler Schnitt durch die Einbindung der Treppenhausewand in die Außenwand**  
 $\Psi$ -Wert: -0,532 W/(mK) (unsaniert)  
 -0,294 W/(mK) (EnEV)  
 -0,376 W/(mK) (PH)  
 Gesamtlänge: 22,7 m

Der U-Wert der Treppenhausewände (Gesamtfläche: 93,8 m<sup>2</sup>) liegt beim Mustergebäude bei 1,42 W/(m<sup>2</sup>K), zusätzlich sind 20,6 m<sup>2</sup> Wohnungstüren mit einem U-Wert von ca. 1,56 W/(m<sup>2</sup>K) zu berücksichtigen.

Abb. 5-28 zeigt für die drei energetischen Standards unsaniertes Gebäude, Modernisierung mit EnEV-Anforderungen und Modernisierung mit Passivhaus-Komponenten den Heizwärmebedarf des Mustergebäudes für die Berechnung mit Standard-Randbedingungen (thermische Hülle verläuft um das Treppenhaus herum, Temperatur im Treppenhaus 20 °C) und bei Bilanzierung des Treppenhauses als unbeheizter Raum außerhalb der thermischen Hülle mit der in Kapitel 5.4.3 berechneten mittleren Treppenhautemperatur. Für das unsaniert Gebäude ergibt sich durch die angepassten Temperaturen ein um 12,8 kWh/(m<sup>2</sup>a) bzw. 5,2 % niedrigerer Heizwärmebedarf bei geschlossenem Kellerabgang. Beim offenen Kellerabgang reduziert sich der Heizwärmebedarf von 261 kWh/(m<sup>2</sup>a) auf 246 kWh/(m<sup>2</sup>a) entsprechend 6,1 %.



**Abb. 5-28: Vergleich des Heizwärmebedarfs von unterschiedlichen energetischen Standards bei Standard-Randbedingungen und mit angepasster Treppenhaus-Temperatur**

Die EnEV-Modernisierung erreicht beim geschlossenen Kellerabgang 64,7 kWh/(m<sup>2</sup>a) mit Standardrandbedingungen und 64,1 kWh/(m<sup>2</sup>a) bei angepassten Temperaturen (Differenz: 1,1 %). Ist der Kellerabgang offen ausgeführt, so fällt die Differenz vergleichbar aus (67,7 gegenüber 67,0 kWh/(m<sup>2</sup>a)). In diesem Fall gleichen sich reduzierte Temperaturen und vergrößerte Verlustflächen ungefähr aus.

Beim Gebäude mit Passivhaus-Komponenten reduziert sich der Heizwärmebedarf bei geschlossenem Kellerabgang von 18,0 kWh/(m<sup>2</sup>a) auf 17,1 kWh/(m<sup>2</sup>a) entsprechend 5,6%. Beim offenen Kellerabgang schrumpft die Differenz der beiden Betrachtungsweisen (Standard-Randbedingung bzw. Bilanzierung mit angepassten Temperaturen) und liegt nur bei 1,9% (20,3 kWh/(m<sup>2</sup>a) gegenüber 19,9 kWh/(m<sup>2</sup>a)).

Der Einfluss veränderter Randbedingungen im Treppenhaus auf den Heizwärmebedarf soll in den folgenden Auswertungen dargestellt werden.

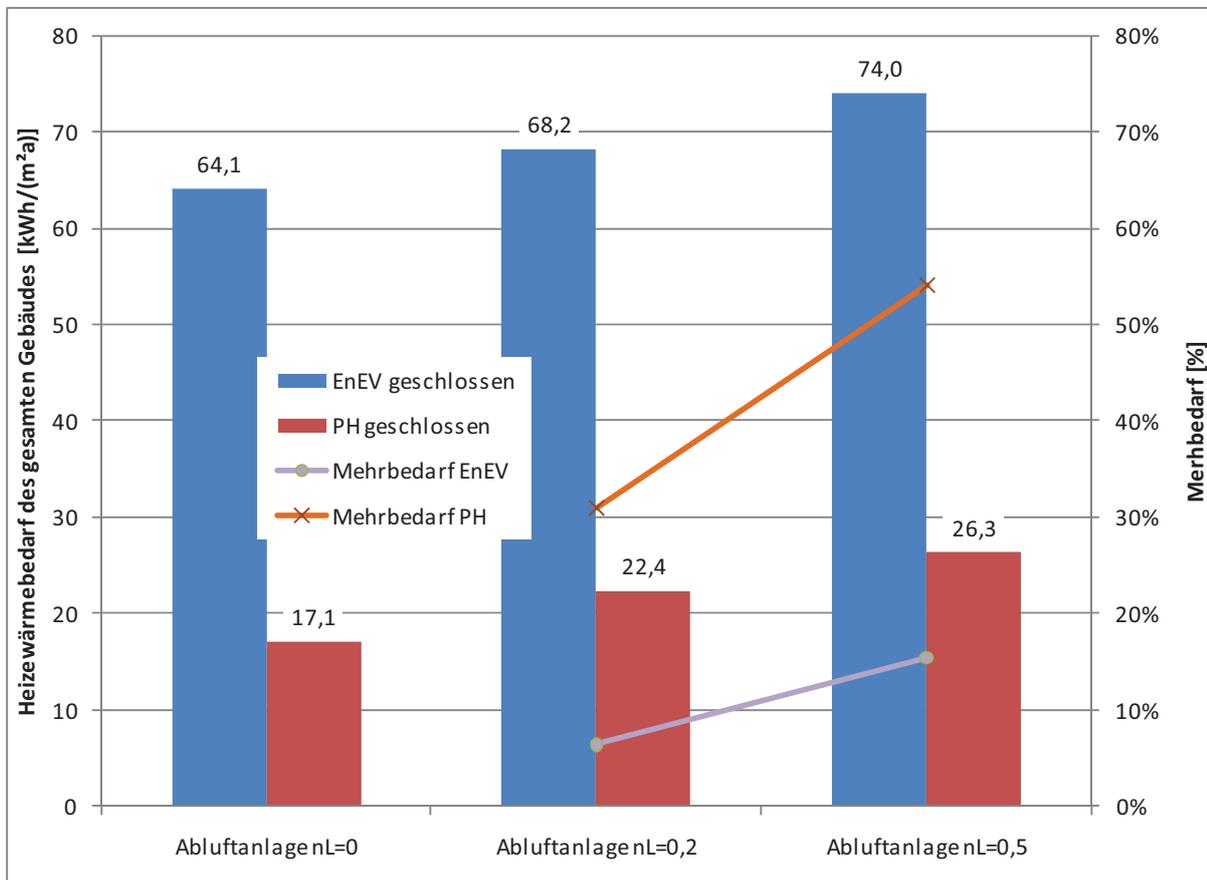
Wird unterstellt, dass das Treppenhaus einen schlechteren n<sub>50</sub>-Wert besitzt als das restliche Gebäude, so erhöht sich der Heizwärmebedarf bei der EnEV-Variante um 1 % bei einer Erhöhung des n<sub>50</sub>-Wertes von 1,5 h<sup>-1</sup> auf 3 h<sup>-1</sup>. Bei der PH-Variante ergibt sich eine Erhöhung des Heizwärmebedarf um 4 %, wenn der n<sub>50</sub>-Wert bei 2 h<sup>-1</sup> liegt (anstelle von n<sub>50</sub>=0,6 h<sup>-1</sup>).

In Abb. 5-29 ist der Einfluss einer Abluftanlage im Treppenhaus für die EnEV- und die PH-Variante dargestellt. Bei einem Gebäude mit EnEV-Modernisierung steigt der Heizwärmebedarf um 6 % mit der Abluftanlage, wenn der Anlagenluftwechsel bei 0,2 h<sup>-1</sup> liegt und um 15 % bei einem Anlagenluftwechsel von 0,5 h<sup>-1</sup>.

Bei der PH-Variante sind die Auswirkungen einer reinen Abluftanlage absolut betrachtet etwa gleich, prozentual aber deutlich bedeutender. Ein Anlagenluftwechsel 0,2 h<sup>-1</sup> führt zu einer

Erhöhung des Heizwärmebedarfs des gesamten Gebäudes um 31 %, bei einem Anlagenluftwechsel von 0,5 h<sup>-1</sup> sogar um 54 %.

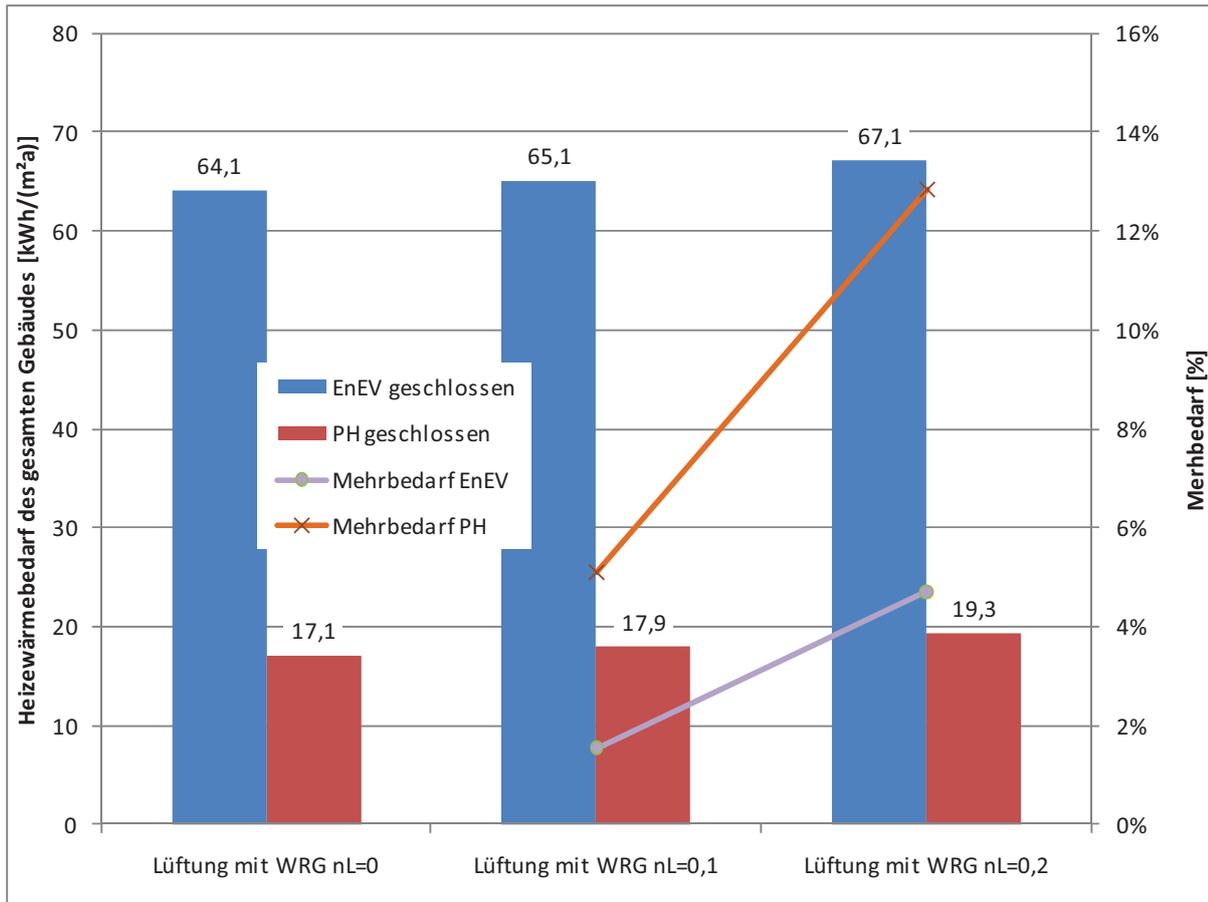
Dies zeigt, dass vor allem bei Gebäuden mit hohem energetischem Standard ein mechanische Abluftanlage keine geeignete Alternative darstellt, da der Heizwärmebedarf unverhältnismäßig stark erhöht wird.



**Abb. 5-29: Einfluss einer Abluftanlage im Treppenhaus auf den Heizwärmebedarf des gesamten Gebäudes für unterschiedliche Luftwechselraten**

Wird an Stelle der Abluftanlage eine Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung eingesetzt, steigt ebenfalls der Heizwärmebedarf gegenüber dem unbelüfteten Fall an, allerdings durch den Einfluss der Wärmerückgewinnung deutlich geringer (Abb. 5-30). Bei der EnEV-Variante steigt der Heizwärmebedarf bei einem Anlagenluftwechsel von 0,1 h<sup>-1</sup> um 1 kWh/(m²a) (entsprechend 2 %) und um 3 kWh/(m²a) (5 %) bei einem Anlagenluftwechsel von 0,2 h<sup>-1</sup>.

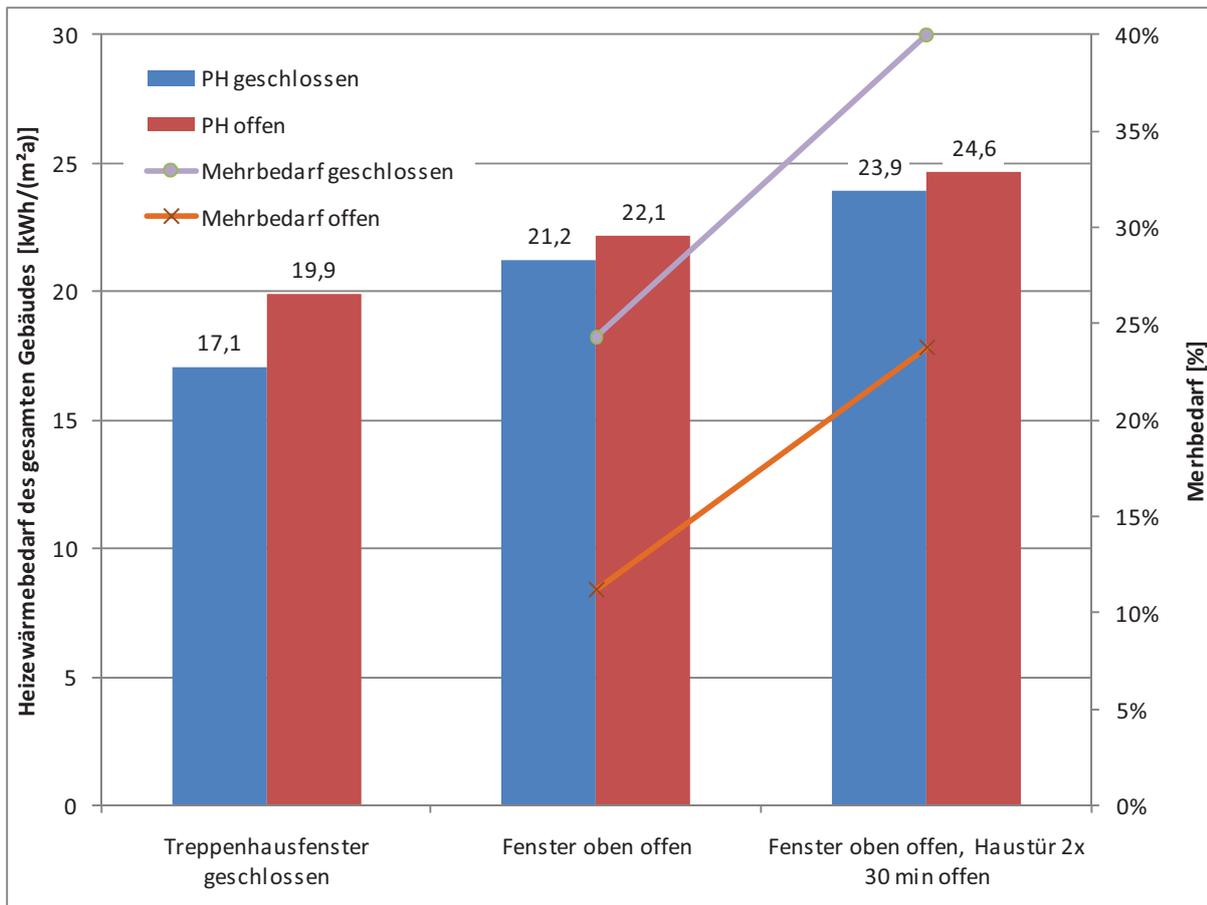
Bei der PH-Variante um 0,8 kWh/(m²a) bei einem Anlagenluftwechsel von 0,1 h<sup>-1</sup> (entspricht 5 %) und um 2,2 kWh/(m²a) (entsprechend 13 %) bei einem Anlagenluftwechsel von 0,2 h<sup>-1</sup>.



**Abb. 5-30: Einfluss einer Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung im Treppenhaus auf den Heizwärmebedarf des gesamten Gebäudes für unterschiedliche Luftwechselraten**

Besonders bei Passivhäusern erscheint dieser Anstieg des Heizwärmebedarfs sehr hoch. Wird im Treppenhaus keine Lüftungsanlage vorgesehen, aber das (obere) Treppenhausfenster während der gesamten Heizperiode gekippt (siehe Abb. 5-31), so erhöht sich der Heizwärmebedarf beim geschlossenen Kellerabgang um 4,1 kWh/(m²a) (24 %), beim offenen Kellerabgang um 2,2 kWh/(m²a) (11 %). Wird zusätzlich der realistische Fall unterstellt, dass zweimal am Tag die Haustür für 30 Minuten geöffnet wird, so steigt der Heizwärmebedarf sogar um 6,8 kWh/(m²a) (entsprechend 40 %) beim geschlossenen Kellerabgang und um 4,7 kWh/(m²a) (24 %) beim offenen Kellerabgang.

Das reale Fensterlüftungsverhalten wird sich zwischen dem geschlossenen und dem geöffneten Fenster einpendeln. Ab einem Anteil von 12,7 % Fensterlüftung liegt der Heizwärmebedarf ohne Lüftungsanlage bereits über demjenigen eines Treppenhauses mit Lüftungsanlage und Wärmerückgewinnung (bei einem Anlagenluftwechsel von 0,1 h<sup>-1</sup>).



**Abb. 5-31: Einfluss eines dauerhaft gekippten Fensters im DG des Treppenhauses bzw. in Kombination mit dem Öffnen der Haustür (2x täglich) für die Ausführung mit PH-Komponenten**

Die Ergebnisse zeigen, dass es bei Gebäuden mit sehr hohem energetischem Standard sinnvoll sein kann das Treppenhaus mechanisch mit Wärmerückgewinnung zu belüften, insbesondere dann, wenn kein angepasstes Lüftungsverhalten der Bewohner erwartet werden kann. Dabei muss jedoch der zusätzliche Hilfsstrombedarf für das Lüftungsgerät beachtet werden. Abb. 5-32 zeigt Elektroenergiebedarf für die Treppenhauslüftung für unterschiedliche Treppenhausvolumina und Anlagenluftwechsel. Für den hier vorgeschlagenen Luftwechsel von 0,1 h<sup>-1</sup> im Treppenhaus fallen bei ganzjährigem Betrieb der Anlage beim Mustergebäude 36 kWh für Hilfsstrom an. Wird dieser primärenergetisch pauschal mit dem 2,5-Fachen der Wärmeerzeugung bewertet, so müssen in der Bilanz der Lüftungsanlage zusätzlich 0,2 kWh/m<sup>2</sup>a berücksichtigt werden. Für das Gebäude mit Passivhaus-Komponenten bedeutet dies, dass ab einem Fensterlüftungsanteil von 16 % in der Heizperiode die mechanische Lüftung energetisch günstiger abschneidet. Wird die mechanische Lüftung nur in der (Kern-)Heizperiode von Anfang November bis Ende März betrieben, liegt die mechanische Lüftung ab 13,2 % Fensterlüftung günstiger.

Die maximale Heizwärmeeinsparung der mechanischen Lüftung gegenüber dem dauerhaft gekippten Treppenhausfenster mit den Öffnungsvorgängen der Haustür beträgt 2620 kWh/a für das gesamte Gebäude bzw. 5,7 kWh/(m<sup>2</sup>a), wobei der Hilfsstromeinsatz bereits berücksichtigt ist.

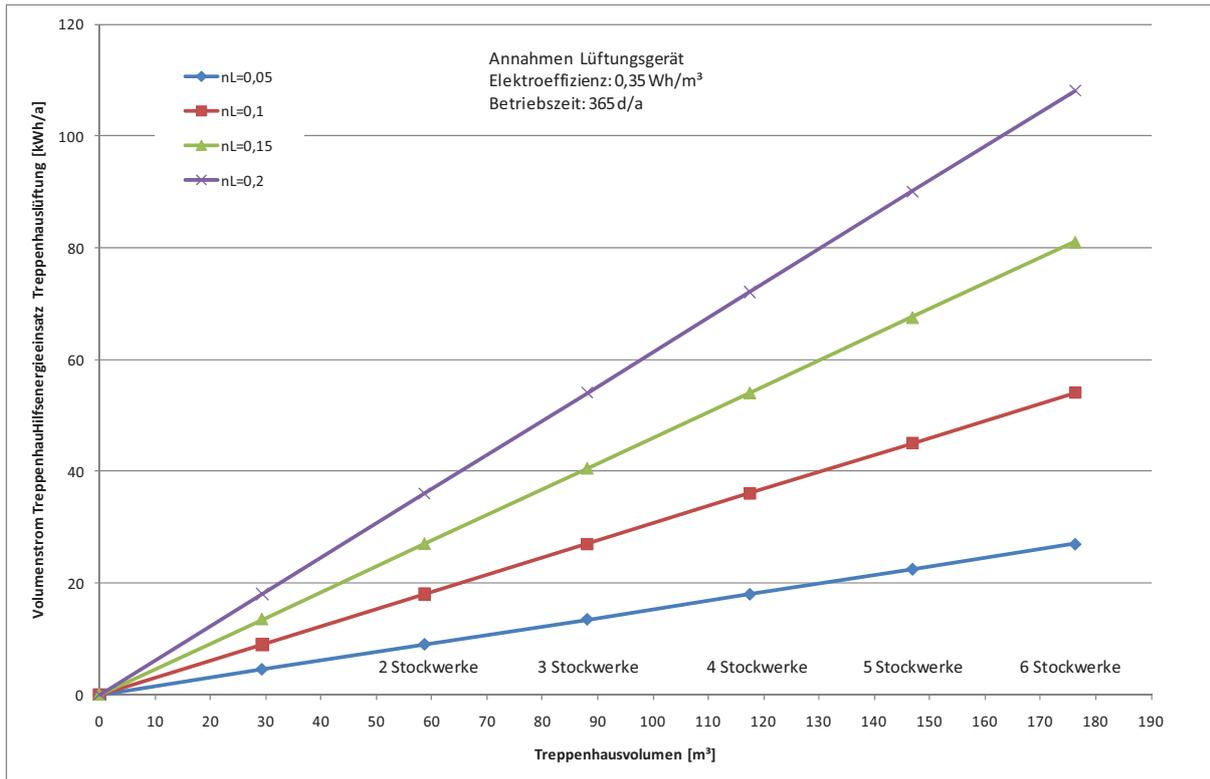


Abb. 5-32: Hilfsenergiebedarf für die Treppenhauslüftung bei ganzjährigem Betrieb der Anlage

## 6 Kosten

Wird ein Treppenhaus im Rahmen einer energetischen Modernisierung mit einem aktiven Lüftungssystem ausgestattet, so sind damit gegenüber der üblichen Fensterlüftung immer Mehrkosten verbunden. Diese Mehrkosten betreffen die Investitionskosten während der Modernisierung und die Betriebskosten, die kontinuierlich anfallen. Im Folgenden sollen einige wichtige Kostenfaktoren genannt werden. Da die realen Situationen im Altbau sehr unterschiedlich sind, kann die Aufstellung nicht abschließend sein.

### Investitionskosten

Die Höhe der Investitionskosten hängt vom gewählten Lüftungssystem ab:

Bei einer **Abluftanlage** sind dies eine oder zwei Kernbohrungen, das Abluftgerät, der Elektroanschluss und der Außenluftdurchlass. Zusätzlich fallen Kosten für das Beiputzen der Durchbrüche und Anschlüsse an. Gegebenenfalls kommen noch die Kosten eines Luftqualitätssensors und einer bedarfsabhängigen Regelung hinzu.

Wird das Treppenhaus mit einem **eigenen Lüftungsgerät mit Wärmerückgewinnung** ausgestattet, so sind die Kosten für die Durchbrüche, das Lüftungsgerät und dessen Montage, mindestens ein Lüftungskanal (innen/außen verlegt), Zu-/Abluftventile, Wanddurchführungen, Elektroanschluss und ggf. Regelung/Sensoren, zu berücksichtigen.

Bei einem Anschluss an ein **zentrales Lüftungsgerät** des Gebäudes fallen vor allem die Kosten der Rohrleitungen und deren Verlegung sowie die Zu-/Abluftventile an sowie Schalldämpfer. Im Allgemeinen ist diese Ausführung am kostengünstigsten, da ein zentrales Lüftungsgerät meist noch die geringen zusätzlich erforderlichen Luftmengen für das Treppenhaus liefern kann und nicht größer dimensioniert werden muss.

Wird das Treppenhaus zusammen **mit einer Wohnung belüftet**, so liegt der zusätzliche Investitions- und Arbeitsaufwand vor allem in der zusätzlichen Verlegung der Rohrleitungen, den Kernbohrungen, Schalldämpfern sowie deren Abdichtung.

**Tab. 6-1: Kostenaufstellung einer Treppenhauslüftung mit Wärmerückgewinnung [Baumgartner]**

| Komponente                  | Kosten (netto) |
|-----------------------------|----------------|
| Lüftungsgerät               | 750,00 €       |
| Lüftungskanal auf Außenwand | 1072,75 €      |
| Durchbrüche, Kernbohrungen  | 52,87 €        |
| Elektroanschluss (anteilig) | 125,00 €       |
| Montage                     | 216,20 €       |
| Summe                       | 2216,82 €      |

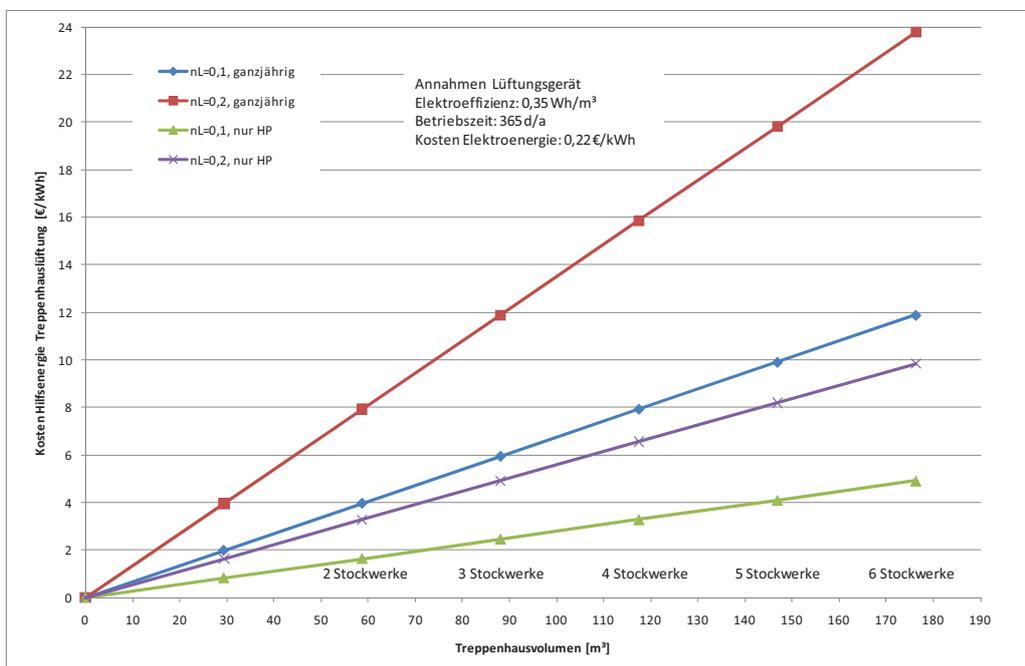
Als Beispiel für abgerechnete Kosten einer Treppenhauslüftung mit Wärmerückgewinnung sind in Tab. 6-1 die Kosten aus dem Projekt Frankfurt-Rotlintstraße aufgelistet [IWU 2011a]. Die Kosten wurden auf Basis von vier ausgeführten Anlagen ermittelt (netto, ohne Mehrwertsteuer).

Es zeigt sich, dass der Kunststoffkanal höhere Kosten verursachte als das Lüftungsgerät. In der Summe ergaben sich Kosten von 2216,82 €. Diese, im konkreten Einzelfall abgerechneten Kosten, können je nach örtlichen Verhältnissen bei einem anderen Gebäude anders ausfallen.

### Betriebskosten

Zusätzlich zu der Investition fallen für den Betrieb und die Wartung der Anlage weitere Kosten an. Hier sind vor allem der Betriebsstrom und die regelmäßigen Filterwechsel zu nennen.

Der Betriebsstromverbrauch hängt neben dem gewählten Volumenstrom von der Energieeffizienz des Gerätes und dessen Standby-Verbrauch ab. Weitere Einflussgrößen sind die Rohrleitungslänge und –verluste, die Anzahl der Einbauten und Bögen. Wird eine Elektroeffizienz von  $0,35 \text{ Wh/m}^3$  unterstellt, so ergeben sich für das Mustergebäude Stromkosten von 7,90 €/a bei ganzjährigem Betrieb und 3,30 €/a bei Betrieb in der Heizperiode.



**Abb. 6-1: Kosten für Hilfsenergie für die Treppenhauslüftung bei ganzjährigem Betrieb der Anlage bzw. nur in der Heizperiode**

Die Wartungskosten hängen von der Gerätegröße und den Kosten der eingesetzten Filter ab. Hier können sich Kostenvorteile ergeben, wenn die Filter von unterschiedlichen Lieferanten bezogen werden können.

## 7 Zusammenfassung, Empfehlungen und Ausblick

Die vorliegende Untersuchung befasst sich mit Treppenhäusern in Mehrfamiliengebäuden bei der Bestandsmodernisierung. Sie sollte eine Reihe von Fragen in Bezug auf die zu dämmenden Flächen bei der energetischen Modernisierung sowie auf den Umfang der Wärmebrücken am Kellerabgang, die Bilanzierung des Treppenhauses und mögliche Vereinfachungen klären. Ein weiterer Schwerpunkt bildet die Belüftung von Treppenhäusern mit einem Überblick über die Vorgänge beim Luftaustausch in Treppenhäusern, Überlegungen zu einer geeigneten mechanischen Belüftung und zum geeigneten Luftwechsel. Im letzten Block werden die energetischen Auswirkungen unterschiedlicher Belüftungskonzepte auf den Heizwärmebedarf des Gebäudes dargestellt.

Durch die Auswertungen von Plänen von Treppenhäusern unterschiedlicher Mehrfamilienhäuser aus verschiedenen Baualtersklassen wurde ein typisches Treppenhaus identifiziert, das besonders in den Beständen der 1950er und 1960er Jahre häufig vertreten ist. Aufbauend darauf wurde ein Mustergebäude mit diesem Treppenhaus definiert, mit dem die Berechnungen mit unterschiedlichen energetischen Standards (unsaniert, Modernisierung angelehnt an die Anforderungen der Energieeinsparverordnung, Modernisierung mit Passivhaus-Komponenten) durchgeführt wurden.

Die thermische Analyse des Treppenhauses ergab eine Reihe von Wärmebrücken, abhängig von der Ausführung des Kellerabgangs als offen (Kellertüren unten im Keller) oder geschlossen (Kellertür oben im Eingangsbereich). Für beide Varianten wurden die Verluste über die Wärmebrücken berechnet und daraus ein vereinfachter Ansatz für die Berücksichtigung bei der Bilanzierung entwickelt (siehe auch Empfehlungen).

In einem weiteren Abschnitt werden die Festlegungen der Energieeinsparverordnung und der zugehörigen Normen sowie des Passivhaus-Projektierungs-Pakets für die Betrachtung von Treppenhäusern untersucht. Abgeleitet aus einem Berechnungsansatz der DIN EN ISO 13789 und Untersuchungen weiterer Quellen wird ein vereinfachtes Treppenhausmodell entwickelt, das zur Geschossweisen Bestimmung der Treppenhaustemperaturen verwendet wurde. Das Treppenhausmodell wurde in einem weiteren Schritt mit Messdaten von drei konkreten Passivhaus-Treppenhäusern sowie mit dynamischen Simulationen verglichen.

Durch eine Reihe von Vor-Ort-Erhebungen wurde die Häufigkeit von geöffneten Treppenhausfenstern bei unterschiedlichen modernisierten und nicht modernisierten Mehrfamilienhäusern erhoben. Es zeigte sich eine Abhängigkeit der Fensteröffnung von der Außentemperatur, allerdings konnten einige Objekte identifiziert werden, in denen auch bei sehr niedrigen Außentemperaturen häufig gelüftet wurde, insbesondere war das oberste Treppenhausfenster am häufigsten offen. Daraus kann geschlossen werden, dass die Luftqualität dieser Treppenhäuser nicht den Wünschen der Bewohner entspricht oder vergessen wurde die Fenster zu schließen.

In Kapitel 4 wird ein kurzer Abriss des Stands der Forschung für den Luftaustausch in Treppenhäusern gegeben. Anschließend werden verschiedene Konzepte der Treppenhausbelüftung für Mehrfamilienhäuser diskutiert und die baulichen und energetischen Auswirkungen dargestellt. Eine Literaturrecherche konnte keine brauchbaren Anhaltswerte für den anzu-

setzenden Luftwechsel im Treppenhaus liefern. Aus diesem Grund wird ein Anlagenluftwechsel  $n_L$  von  $0,1 \text{ h}^{-1}$  vorgeschlagen. Weitere Aspekte sind Überlegungen zum Brandschutz und die Problematik der Ausbreitung von Radonbelastung in Kellern über das Treppenhaus.

Schließlich wurde das Mustergebäude mit unterschiedlichen Ausführungen des Kellerabgangs und für unterschiedliche Arten der Belüftung energetisch mit dem PHPP bilanziert. Es zeigt sich, dass beim unsanierten Gebäude der Heizwärmebedarf des Mustergebäudes bei einer Bilanzierung des Treppenhauses innerhalb der thermischen Hülle ca. 5 % über dem einer Bilanzierung mit einem Reduktionsfaktor aufgrund der sich einstellenden Treppenhaustemperaturen liegt – der Heizwärmebedarf wurde somit überschätzt. Bei einem Gebäude mit EnEV-Modernisierung oder PH-Komponenten liegen die Differenzen zwischen den beiden Bilanzierungsansätzen zwischen  $0,4$  und  $0,8 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ .

Die Untersuchung unterschiedlicher Belüftungsstrategien ergab, dass eine mechanische Abluftanlage den Heizwärmebedarf des Gebäudes deutlich steigert (bis zu 16 % bei Anlagenluftwechsel  $0,1 \text{ h}^{-1}$ , Referenz: unbelüftetes Treppenhaus). Eine mechanische Lüftung mit Wärmerückgewinnung führt nur zu einer moderaten Erhöhung des nominellen Heizwärmebedarfs von ca.  $1 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$  bei der EnEV-Variante und  $0,8 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$  bei der PH-Variante. Wird an Stelle der mechanischen Lüftung über die Fenster gelüftet, so kann der Mehrverbrauch deutlich höher liegen. Ein dauerhaft gekipptes Treppenhausfenster im Dachgeschoss führt bei der PH-Variante in Verbindung mit einer moderaten regelmäßigen Öffnung der Haustür zu einer Erhöhung der Wärmeverluste um  $6,8 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$  bzw. 40 %.

In realen Gebäuden wird die Fensterlüftung nur selten dauerhaft über den gesamten Winter betrieben. Ab einem Fensterlüftungsanteil von 16 % in der Heizperiode spart im Passivhaus die Treppenhausbelüftung mit Wärmerückgewinnung auch unter Berücksichtigung des erforderlichen Lüfterstroms Energie ein.

### Empfehlungen

Bei der Bilanzierung von Treppenhäusern mit vergleichbarer Konstruktion, wie das Mustergebäude dieser Untersuchung, kann für die Energieberatung vereinfachend an Stelle der detaillierten Berechnung der Flächen und Wärmebrücken am Kellerabgang mit einem äquivalenten U-Wert gerechnet werden. Dabei wird an Stelle der komplizierten Geometrie des Kellerabgangs vereinfachend die projizierte Bruttofläche des Treppenhauses (Innenmaße) mit einem äquivalenten U-Wert angesetzt, der die Verluste des Abgangs auf diese Treppenhausfläche umlegt. Für das Mustertreppenhaus lagen diese U-Werte bei den in Tab. 7-1 gezeigten Werte.

Für den offenen Kellerabgang ergeben sich spezifische Wärmeverluste von  $19,8 \text{ W/K}$  (EnEV) bzw.  $18,1 \text{ W/K}$  (PH-Komponenten). Für eine vereinfachte Bilanzierung kann für die Innenfläche des Treppenhauses mit einem äquivalenten U-Wert von  $1,41 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  (EnEV) und  $1,29 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  (PH-Komponenten) gerechnet werden, die alle Verluste über zusätzliche Fläche und Wärmebrücken beinhalten.

Für den oben geschlossenen Kellerabgang ergeben sich spezifische Wärmeverluste von  $10,2 \text{ W/K}$  (EnEV) bzw.  $8,6 \text{ W/K}$  (PH-Komponenten). Als äquivalenter U-Wert für die vereinfachte Berechnung ergeben sich  $0,78 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  (EnEV) bzw.  $0,66 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ . Der Unterschied zwischen EnEV-Variante und Variante mit PH-Komponenten fällt deswegen so gering aus, da bei der Festlegung der energetischen Maßnahmen am Kellerabgang die in der Praxis realisierbaren Dämmstoffdicken berücksichtigt wurden.

In Abb. 2-10 und Abb. 2-11 sind für andere Treppenhausabmessungen die Wärmeverluste dargestellt, so dass daraus auch für abweichende Treppenhausgeometrien äquivalente U-Werte bestimmt werden können.

**Tab. 7-1: Äquivalente U-Werte in  $[W/(m^2K)]$  zur Abbildung verschiedener Kellerabgänge bei unterschiedlichen energetischen Standards**

|                               | unsaniert | EnEV | PH   |
|-------------------------------|-----------|------|------|
| Kellerabgang oben geschlossen | 1,66      | 0,78 | 0,66 |
| Kellerabgang offen            | 3,23      | 1,41 | 1,29 |

Die Regelungen der Energieeinsparverordnung decken zum gegenwärtigen Zeitpunkt diese Vereinfachungen nur bedingt ab, so dass sie besonders für die Bilanzierung im Rahmen der Energieberatung eingesetzt werden können.

Die Untersuchungen haben gezeigt, dass unkontrollierte Fensterlüftung im Treppenhaus den Heizwärmebedarf des Gebäudes deutlich erhöhen kann. Ob sich eine mechanische Treppenhauslüftung mit Wärmerückgewinnung energetisch im Gebäude lohnt, hängt vom erwarteten Fensterlüftungsverhalten der Bewohner ab. Bei Passivhäusern oder Gebäuden mit sehr geringem Heizwärmebedarf sollte eine Treppenhauslüftung geprüft werden, wenn von einem nennenswerten Fensterlüftungsanteil ausgegangen werden kann. Ist kaum Fensterlüftung im Treppenhaus zu erwarten, führt die Lüftungsanlage zu einem Mehrverbrauch. Allerdings wird nur selten eine entsprechende Information vorliegen.

Nicht empfohlen werden kann eine reine Abluftanlage im Treppenhaus, da sie durch den konstanten Volumenstrom den Heizwärmebedarf auch gegenüber Fensterlüftung deutlich erhöht.

#### Ausblick

Aufgabe dieser Untersuchung war es u. a. Vereinfachungen für die Bilanzierungen von Treppenhäusern zu liefern und Vorschläge für die Belüftung von Treppenhäusern zu entwickeln. Sie kann das Thema der Lüftung von Treppenhäusern aber nicht umfassend abhandeln, sondern dient als erster Einstieg. Die Berechnungen basieren auf Mehrzonen-Modellen des Treppenhauses und Monats- und Jahresbilanzen des Mustergebäudes. Insbesondere die Kopplung von auftriebsinduzierten Strömungen im Treppenhaus und mechanischen Lüftungsanlagen kann hierbei nicht im Detail abgebildet werden. Hier sollte in weiteren Untersuchungen der Luftaustausch in Treppenhäusern mittels CFD-Simulationen genauer analysiert werden. Für die Eingabe der Randbedingungen sind detaillierte Daten zur Undichtigkeit von Treppenhäusern und Türen erforderlich, für die Validierung der entsprechenden Modelle werden zusätzliche, detaillierte Messdaten über die Strömungsverhältnisse in Treppenhäusern benötigt.

Mit den CFD-Simulationen könnte die Frage der Schadstoffausbreitung im Treppenhaus (aus dem Keller, aus den Wohnungen) detaillierter untersucht werden. Die bisher vorliegenden Arbeiten betrachteten entweder den Brandfall mit großen Temperaturunterschieden oder sie wurden für andere Klimazonen mit geringer Temperaturdifferenz zwischen innen und außen durchgeführt.

Auch die Größenordnung des sich einstellenden konvektiven Luftaustauschs in einem offenen Kellerabgang ist wenig bekannt. In dieser Arbeit konnte nur auf Messdaten zurück gegriffen werden, die aus einer Untersuchung mit mehreren Kellergeschossen zur Tiefgarage im unbeheizten Bereich stammt [PHI 2005]. Die dynamischen Simulationen mit dem Programm TAS deuten bei einem Treppenhaus mit einem offenen Kellerabgang um nur ein einzelnes Geschoss

auf eine stabile thermische Schichtung hin. Hier sind weitere Messungen erforderlich um zukünftig die Modelle verfeinern zu können.

Neben diesen überwiegend wissenschaftlichen Fragestellungen liegen bisher nur begrenzt Zusammenstellungen von Erfahrungen mit Lüftungsanlagen in Treppenhäusern vor. Hier sind vor allem die erforderlichen Luftwechsel für eine ausreichende Luftqualität, der Einfluss von Undichtigkeiten und Öffnungsvorgängen auf die Luftverteilung und somit die Lüftungseffektivität sowie die Störgrößen im Betrieb von Interesse. Eine Sammlung von Erfahrungen könnte dem Bauherrn und Anlagenplaner wertvolle Hinweise geben.

## Literatur

- [Bauformen 1931] „Moderne Bauformen“, Monatshefte für Architektur und Raumkunst, Jahrgang 1931
- [Baumgartner] Kostenauswertung des Ingenieurbüros Baumgartner für das Modernisierungsvorhaben Frankfurt-Rotlintstraße, Juli 2009
- [Beck 1992] Beck, Edgar: Über das Einfrieren von Plattenwärmetauschern, in HLH 7/1992, S. 370 .374, Springer-VDI-Verlag, Düsseldorf 1992
- [Blomqvist 2009] Blomqvist, C.: Distribution of ventilation air and heat by buoyancy forces inside buildings – An experimental study, Doctoral thesis, University of Gävle, Sweden, 2009
- [BfS 2010] Bundesamt für Strahlenschutz: Radonkarte Deutschlands, Quelle: Internet [http://www.bfs.de/de/ion/radon/radon\\_boden/radonkarte.html](http://www.bfs.de/de/ion/radon/radon_boden/radonkarte.html) vom 22.06.2011
- [BMBVS 2007] Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung: Bekanntmachung der Regeln zur Datenaufnahme und Datenverwendung im Wohngebäudebestand vom 26.Juli 2007, BMVBS, Berlin, 2007
- [BMBVS 2009] Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung: Bekanntmachung der Regeln zur Datenaufnahme und Datenverwendung im Wohngebäudebestand vom 30.Juli 2009, BMVBS, Berlin, 2009
- [Daiber] Daiber, Gero: Die Treppenkonstruktionen in Miethäusern von 1850 bis 1940, Werner-Verlag GmbH, Düsseldorf, 1986
- [dena 2009] Deutsche Energie-Agentur (dena): Leitfaden Energieausweis, Teil 1: Energiebedarfsausweis: Datenaufnahme Wohngebäude; 2. Auflage 2009, Deutsche Energie-Agentur, Berlin, 2009
- [DIN 1946-6] DIN 1946-6: 2009-05: Raumluftechnik – Teil 6: Lüftung von Wohngebäuden, Beuth Verlag, Berlin 2009
- [DIN 4108-2] DIN 4108-2: 2003-07: Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden Teil 2: Mindestanforderungen an den Wärmeschutz, Deutsches Institut für Normung, Beuth Verlag, Berlin 2003
- [DIN V 4108-6] DIN V 4108-6: 2003-06: Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden, Teil 6: Berechnung des Jahresheizwärme- und des Jahresheizenergiebedarfs, Beuth Verlag, Berlin 2003
- [DIN V 18599] DIN V 18599-2: Energetische Bewertung von Gebäuden - Berechnung des Nutz-, End- und Primärenergiebedarfs für Heizung, Kühlung, Lüftung, Trinkwarmwasser und Beleuchtung - Teil 2: Nutzenergiebedarf für Heizen und Kühlen von Gebäudezonen, Deutsches Institut für Normung, Beuth Verlag, Berlin 02/2007
- [DIN EN ISO 10211] DIN EN ISO 10211: Wärmebrücken im Hochbau – Wärmeströme und Oberflächentemperaturen – Detaillierte , Deutsches Institut für Normung, Beuth Verlag, Berlin 04/2008
- [DIN EN ISO 13370] DIN EN ISO 13370: Wärmetechnisches Verhalten von Gebäuden – Wärmeübertragung über das Erdreich – Berechnungsverfahren, Deutsches

- Institut für Normung, Beuth Verlag, Berlin 04/2007
- [DIN EN ISO 13789] DIN EN ISO 13789: Wärmetechnisches Verhalten von Gebäuden – Spezifischer Transmissions- und Lüftungswärmedurchgangskoeffizient, Deutsches Institut für Normung, Beuth Verlag, Berlin 04/2008
- [DIN EN ISO 13790] DIN EN ISO 13790:2008 : Wärmetechnischer Verhalten von Gebäuden - Spezifischer Transmissions- und Lüftungswärmedurchgangskoeffizient, Beuth Verlag, Berlin, 2008
- [EnEV 2009] Verordnung über energiesparenden Wärmeschutz und energiesparende Anlagentechnik bei Gebäuden (Energieeinsparverordnung – EnEV), Fassung vom 29.04.2009
- [Ergin-Ozkan et al. 1993] Ergin-Ozkan, S.; Mokhtarzadeh-Dehgan, M. R.; Reynolds, A. J.: The effect of different air inlet sizes on the air flow through a stairwell, in Indoor and build Environment, No. 2/1993, pp. 350-359, Sage Publications, 1993
- [faktor10] Pläne des Büros faktor10, in „Wissenschaftliche Begleitung der Sanierung Rotlintstraße 116-128 a. M. – Teilbericht Planungsphase und Null-Emissions-Konzept“; Institut Wohnen und Umwelt, Darmstadt, 2010
- [Füßler 2007] Füßler, W.: Der Sophienhof - Geschosswohnungsbau mit Passivhausstandard, in Arbeitskreis kostengünstige Passivhäuser: „Wärmebrücken und Tragwerksplanung“, S. 127 – 140, Protokollband Nr. 35, Passivhaus Institut, Darmstadt 2007
- [Hasper 2007] Hasper, W.: Treppenhäuser Aussteifung - Lastabtragung – thermische Grenze“, in Arbeitskreis kostengünstige Passivhäuser: „Wärmebrücken und Tragwerksplanung“, S. 51 – 69, Protokollband Nr. 35, Passivhaus Institut, Darmstadt 2007
- [HBO 1957] Hessische Bauordnung, Ausgabe vom 06. Juli 1957, Gültig ab 01.01.1958, 2. Auflage, Behörden- und Industrie-Verlag GmbH, Frankfurt am Main
- [HBO 2011] Hessische Bauordnung, Ausgabe vom 02. Dezember 2010, Gültig ab 01.01.2011, 2. Auflage, Hessisches Ministerium für Wirtschaft, Verkehr und Landesentwicklung, Wiesbaden
- [HEA] Hessische Energiespar-Aktion: Die Hessische Gebäudetypologie, Darmstadt, ohne Jahr
- [Heat] Blomberg, T., Claesson, J.: Wärmebrückenprogramme Heat2D (Version 5) sowie Heat3D (Version 4)
- [Heiselberg, Li] Heiselberg, P.; Li, Z.: Experimental study of buoyancy driven natural ventilation through horizontal openings, in Proceedings of ROOMVENT 2007, Helsinki, Finland, Vol 2 pp. 141-150
- [HMUELV 2011] Hessisches Ministerium für Umwelt, Energie, Landwirtschaft und Verbraucherschutz: Merkblatt zur Förderung der energetisch optimierten Modernisierung von kommunalen Wohngebäuden sowie von ausgewählten Nichtwohngebäuden (...) mit passivhaustauglichen Komponenten, Wiesbaden, Stand 02.05.2011
- [hhpberlin 2008] Foth, Steiner, Kaellander: Rauchfreihaltung innen liegender Sicherheitstreppe, in Deutsches Ingenieurblatt, 9/2008,

- [IBH 2010] Hauser, G.; Stiegel, H.; Schmidt, S.: Offene Treppenabgänge zum unbeheizten Keller, Abschlussbericht, Aktenzeichen Z6-10.07.03-07.15 des BBR, Kassel, 2010
- [IWU 2010] Großklos, M.; Koch, T.; Diefenbach, N.: Wissenschaftliche Begleitung der Sanierung Rotlintstraße 116-128 in Frankfurt a. M. – Teilbericht: Planungsphase und Null-Emissions-Konzept, Institut Wohnen und Umwelt, Darmstadt, 2010
- [IWU 2011] Großklos, M.; Ebel, W.; Knissel, J.: Einsatz des LuQaS-Triple-Sensors zur luftqualitätsgeführten Volumenstromregelung von mechanischen Lüftungsanlagen in Wohngebäuden, Institut Wohnen und Umwelt, Darmstadt, 2011
- [IWU 2011a] Großklos, M.: Wissenschaftliche Begleitung der Sanierung Rotlintstraße 116-128 in Frankfurt a. M. – Teilbericht: Dokumentation der Bauphase, Institut Wohnen und Umwelt, Darmstadt, 2011
- [IWU RGu] Interne Auswertung der Gebäude- und Wohnungsstichprobe 1993, Institut Wohnen und Umwelt, Darmstadt
- [Knissel 2002] Knissel, Jens: Energieeffiziente Gebäude mit reduzierten internen Wärmequellen und Wärmeschutz auf Passivhausniveau, Dissertation an der TU Berlin, Fakultät III – Prozesswissenschaften, Berlin, 2002
- [Meltem 2011] Telefonische Mitteilung von Herrn Lindner, Firma Meltem am 22.06.2011
- [Peppes et al. 2001] Peppes, A.A.; Santamouris, M.; Asimakopoulos, D. N.: Buoyancy-driven flow through a stairwell; in Building and Environment, Vol 36, pp. 136-80, Pergamon, 2001
- [Peppes et al. 2002] Peppes, A.A.; Santamouris, M.; Asimakopoulos, D. N.: Experimental and numerical study of buoyancy-driven stairwell flow in a three storey building; in Building and Environment, Vol 37, pp. 497-506, Pergamon, 2002
- [PHI 2005] Peper, S.; Schnieders, J.; Feist, W.: Mehrgeschoss-Passivhaus Hamburg Pinnasberg, Endbericht, Passivhaus-Institut Darmstadt, 2005
- [PHI 2009] Autorenkollektiv: Altbaumodernisierung mit Passivhaus-Komponenten; Veröffentlichung im Auftrag des Hessischen Ministeriums für Umwelt, Energie, Landwirtschaft und Verbraucherschutz; Passivhaus Institut, Darmstadt, 2009
- [PHPP2007] Passivhaus Projektierungs Paket 2007; Fachinformation PHI 2007/1, Passivhaus Institut, Darmstadt 2007
- [planungsgruppeDREI] Modernisierungsvorhaben „Am Forsthaus“ der Hofheimer Wohnungsbau, Planungsunterlagen der PlanungsgruppeDREI, Mühlital
- [Reynolds 1986] Reynolds, A.: The Scaling of Flows of Energy and Mass Through Stairwells, in Building and Environment, Vol 21, pp. 149-153, Pergamon, 1986
- [Reynolds et al. 1988] Reynolds, A.; Mokhtarzadeh-Dehghan, M. R.; Zohrabian, A. S.: The Modelling of Stairwell Flows, in Building and Environment, Vol 23, No 1, pp. 63-66, Pergamon, 1988
- [Riffat, Shao 1995] Riffat, S. B.; Shao, L.: Characteristics of buoyancy-driven interzonal airflow via horizontal openings, in Building Services Engineering Research and

- Technology, No 16, pp. 149-152, Sage Publications, 1995
- [Schild et al.] Schild, Kai; Willems, Wolfgang: Wärmeschutz, Vieweg+Teubner Verlag, Springer Fachmedien, Wiesbaden, 2011
- [Schnieders 2004] Schnieders, Jürgen: Berechnungsverfahren für die Wärmeverluste durch das Erdreich: Physikalische Prinzipien, Hintergründe der ISO 13370 und ihre Gültigkeit, in Wärmeverluste durch das Erdreich, Protokollband Nr. 27 des Arbeitskreises kostengünstige Passivhäuser, Passivhaus Institut, Darmstadt, 2004
- [Therm] University of California: Wärmebrückenprogramm Therm 5.2
- [Trogisch] Trogisch, Achim: Planungshilfen Lüftungstechnik, Verlag C. F. Müller, 3. Auflage, Heidelberg, 2009
- [TRY] Testreferenzjahre von Deutschland, Klimaregion 12, Deutscher Wetterdienst, Offenbach, 2004
- [Vera et al. 2007] Vera, S.; Rao, J; Fazio, P.: Moisture transport through a horizontal opening: Test setup and initial results, in ANNEX 41 MOIST-ENG, Working meeting, Okt. 2007, Porto
- [Wang 2007] Wang, Lianghzu: Coupling of multizone and CFD programs for building airflow and contaminant transport simulations, Dissertation an der Purdue University, West Lafayette, Indiana, USA, 2007

## **Anhänge**

**Anhang I:            Dokumentation des Treppenhausmodells**

**Anhang II:          Übersicht der Wärmebrücken am Kellerabgang**

## Anhang I - Dokumentation des Treppenhausmodells

Das Modell zur Berechnung der Temperaturen und Energieströme im Treppenhaus basiert im Wesentlichen auf den Berechnungsansätzen in DIN EN ISO 13789:2008 für unkonditionierte Räume [DIN EN ISO 13789]. Dies wurde dahingehend erweitert, dass das Treppenhaus in Zonen unterteilt wurde - je Stockwerk eine Zone. Außerdem wurde zusätzlich der Kellerabgang in das Modell als eigene Zone integriert, unabhängig davon, ob ein offener oder geschlossener Kellerabgang vorlag. Ergänzt wurde das Modell durch Ansätze zum Strahlungsaustausch im Treppenhaus sowie zum konvektiven Luftaustausch über offene Querschnitte. Bilanziert wird die gesamte Heizperiode.

### Temperatur im Treppenhaus für eine Zone

Die Temperatur  $T_u$  der einzelnen Treppenhaus-Zone wird berechnet zu

$$T_{u,i} = \frac{\Phi + T_{i,i} * H_{iu} + T_e * H_{ue} + T_{u,i+1} * H_{u,i+1} + T_{u,i-1} * H_{u,i-1}}{H_{iu} + H_{ue} + H_{u,i+1} + H_{u,i-1}} \quad (7)$$

mit

|             |   |
|-------------|---|
| $T_{u,i}$   | Temperatur der Zone i   |
| $T_{u,i+1}$ | Temperatur der darüber liegenden Zone i+1   |
| $T_{u,i-1}$ | Temperatur der darunter liegenden Zone i-1  |
| $T_i$       | Mitteltemperatur der angrenzenden Wohnungen   |
| $T_e$       | Außentemperatur   |
| $\Phi$      | ggf. zusätzlicher Wärmestrom in die Zone  |
| $H_{iu}$    | spez. Wärmeübertragungskoeffizient zwischen Treppenhaus und angrenzenden Wohnungen, berechnet aus $H_{T,iu}$ und $H_{V,iu}$ |
| $H_{ue}$    | spez. Wärmeübertragungskoeffizient zwischen Treppenhaus und der Außenluft, berechnet aus $H_{T,ue}$ und $H_{V,ue}$          |
| $H_{u,i+1}$ | spez. Wärmeübertragungskoeffizient zur darüber liegenden Zone, berechnet aus $H_{T,u,i+1}$ und $H_{V,u,i+1}$                |
| $H_{u,i-1}$ | spez. Wärmeübertragungskoeffizient zur darunter liegenden Zone, berechnet aus $H_{T,u,i-1}$ und $H_{V,u,i-1}$               |

Die spezifischen Transmissionswärmeverlustkoeffizienten  $H_{T,iu}$ ,  $H_{T,ue}$ ,  $H_{T,u,i+1}$  und  $H_{T,u,i-1}$  werden berechnet mit

$$H_T = \sum A * U + \sum l * \Psi + \sum \chi \quad (8)$$

Die Lüftungswärmeverlustkoeffizienten  $H_{V,iu}$  und  $H_{V,ue}$  werden mit

$$H_{Zone} = \rho * c_p * \dot{V}_{Zone} \quad (9)$$

berechnet.

Der Volumenstrom der Zone berechnet sich zu

$$\dot{V} = \dot{V}_f * (1 - \eta_V) + \dot{V}_x \quad (10)$$

mit

$$\begin{aligned} \dot{V}_f & \text{ Luftvolumenstrom durch maschinelle Lüftung} \\ \eta_v & \text{ Rückwärmezahl} \\ \dot{V}_x & \text{ zusätzlicher Volumenstrom durch Undichtigkeiten und Windeinfluss nach} \\ \dot{V}_x & = \frac{V * n_{50} * e}{1 + \frac{f}{e} * \left[ \frac{\dot{V}_1 - \dot{V}_2}{V * n_{50}} \right]^2} \end{aligned} \quad (11)$$

Dabei sind

- V Volumen durch maschinelle Lüftung (wird auf 1 gesetzt, wenn keine maschinelle Lüftung vorhanden ist)
- $n_{50}$  Luftwechselrate bei 50 Pa Druckdifferenz
- $\dot{V}_1$  zusätzlicher Zuluftvolumenstrom
- $\dot{V}_2$  zusätzlicher Abluftvolumenstrom
- e, f Abschirmungskoeffizienten nach DIN EN ISO 13789:2008 Tabelle C.4

Zur Berücksichtigung des Strahlungsaustauschs zwischen zwei Zonen wurde die Fläche des Treppenpodests und der Treppenläufe als Austauschfläche heran gezogen. Der spezifische Strahlungswärmeverlust  $H_{rad}$  wurde bestimmt mit

$$H_{rad} = 4 * 5,67 * 10^{-8} * \left( \frac{T_u + T_{u+1}}{2} \right)^3 * A \quad (12)$$

mit

- $T_u, T_{u+1}$  Temperatur der Zone bzw. der Nachbarzone
- A Fläche für den Strahlungsaustausch.

Der konvektive Austausch zwischen zwei Zonen wurde auf Basis von Messungen in dem Passivhaus Pinnasberg berücksichtigt [PHI 2005]. Der Luftaustausch  $H_{kon}$  wurde mit der empirischen Formel bestimmt zu

$$H_{kon} = \rho * c_p * 20 \quad (13)$$

Wie in Kapitel 5.4.2 beschrieben, wurde nach einem Vergleich mit den Berechnungen des Programms TAS der konvektive Luftaustausch in einem offenen Kellerabgang auf Null gesetzt.

Als eine Zone im Treppenhaus wird jeweils ein Stockwerk betrachtet. Zur Berücksichtigung der zusätzlichen Verlustfläche im Bereich des Eingangspodests bzw. am Kellerabgang, werden diese Flächen in eine äquivalenten Wärmebrückenzuschlag umgerechnet und zu den Wärmebrücken zwischen Erdgeschoss und Keller aufgeschlagen.

### Wärmegewinne

Bei der Energiebilanz des Treppenhauses werden die Wärmegewinne durch nordorientierte Treppenhausfenster berücksichtigt, bei der Bestimmung der mittleren Treppenhaustemperatur werden keine Wärmegewinne angesetzt.

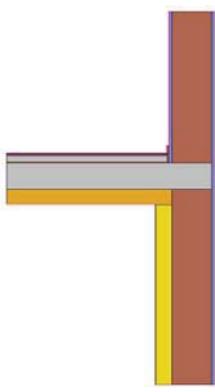
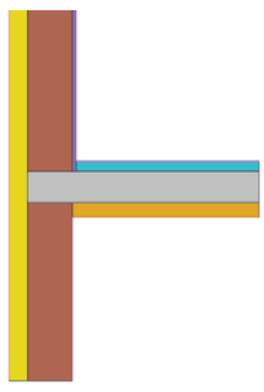
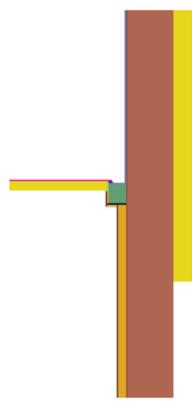
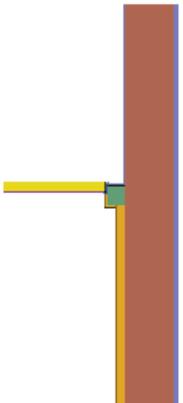
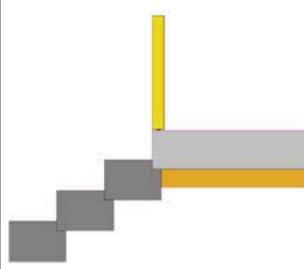
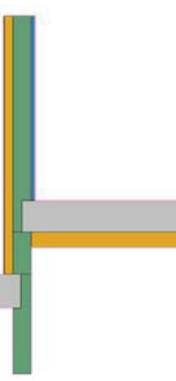
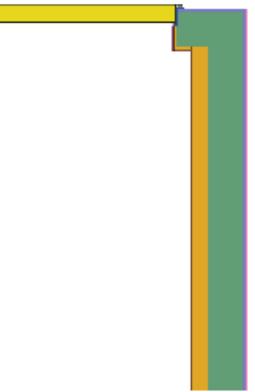
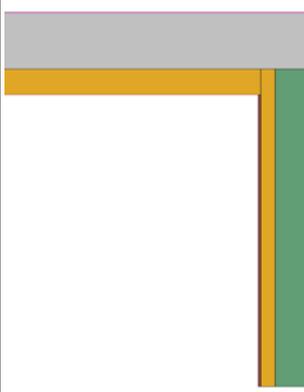
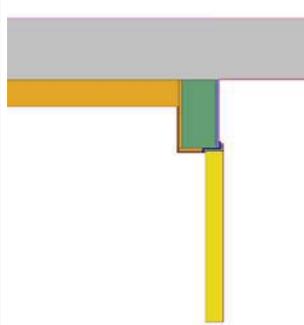
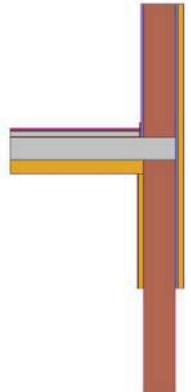
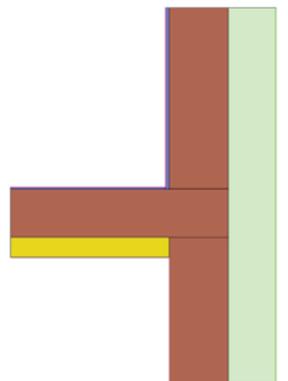
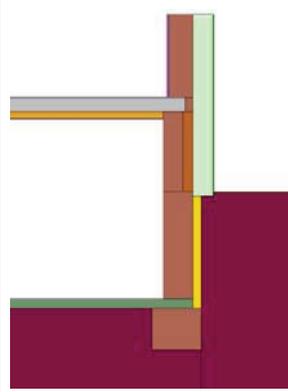
## Anhang II - Übersicht der Wärmebrücken am Kellerabgang

In den folgenden beiden Tabellen sind die betrachteten Wärmebrücken beim offenen und oben geschlossenen Kellerabgang schematisch für die Modernisierung mit Passivhaus-Komponenten dargestellt. Die Nummern entsprechen denjenigen in Tab. 2-5 bzw. Tab. 2-8. Die Details sind teilweise für die Darstellung in der Tabelle gedreht.

**Tab. A-1 Offener Kellerabgang**

|    |    |    |
|----|----|----|
| 1  | 2  | 3  |
|    |    |    |
| 4  | 5  | 9  |
|    |    |    |
| 10 | 11 | 12 |
|    |    |    |

Tab. A-2 Oben geschlossener Kellerabgang

|   |   |  |
|---|---|--|
| <p>1</p>     | <p>2</p>     | <p>3</p>     |
| <p>4</p>    | <p>5</p>    | <p>6</p>    |
| <p>7</p>   | <p>8</p>   | <p>9</p>   |
| <p>10</p>  | <p>11</p>  | <p>12</p>  |