

# Endbericht

## Nachhaltigkeit massiv

### AP12

**Auswirkung verschiedener Baustoffe auf das Sommerverhalten  
von Gebäuden und den Energieverbrauch**



**Impressum** AutorInnen: Ao.Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Thomas Bednar/TU Wien, Bmst. Dipl.-Ing. Helmut Schöberl/Schöberl & Pöll GmbH, Dipl.-Ing. Radoslav Hanic/Schöberl & Pöll GmbH, Univ.Ass. Dipl.-Ing. Christoph Harreither/TU Wien  
Für den Inhalt verantwortlich: Ao.Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Thomas Bednar/TU Wien, Bmst. Dipl.-Ing. Helmut Schöberl/Schöberl & Pöll GmbH  
TU Wien, Adolf-Blamauergasse 1-3, 1030 Wien, Tel +43.1.58801-20602, [www.bph.tuwien.ac.at](http://www.bph.tuwien.ac.at)  
Schöberl & Pöll GmbH, Ybbsstraße 6/30, 1020 Wien, Tel: +43 1 7264566, [www.schoeberlpoell.at](http://www.schoeberlpoell.at)

# Nachhaltigkeit massiv

## AP12

**Auswirkung verschiedener Baustoffe auf das Sommerverhalten von Gebäuden und den Energieverbrauch**

### **Auftraggeber:**

Dieses Projekt wird aus Mitteln des Klima- und Energiefonds gefördert und im Rahmen des Programms „ENERGIE DER ZUKUNFT“ durchgeführt. Zusätzlich wird das Projekt aus Mitteln des Fachverbands der Stein- und keramischen Industrie der Wirtschaftskammer Österreich unterstützt.

### **AutorInnen:**

Bednar, Thomas (TU Wien, Forschungsbereich für Bauphysik und Schallschutz)  
Schöberl, Helmut (Schöberl & Pöll GmbH)  
Hanic, Radoslav (Schöberl & Pöll GmbH)  
Harreither, Christoph (TU Wien, Forschungsbereich für Bauphysik und Schallschutz)

Wien, September 2009



# Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	6
2	Zusammenfassung der Projektergebnisse.....	8
3	Inhaltliche Darstellung .....	10
3.1	Auswahl der Referenzobjekte .....	10
3.1.1	Passivhaus Mühlweg.....	10
3.1.2	Passivhaus Wienerberg City Gebös .....	12
3.1.3	Passivhaus Kammelmweg .....	13
3.1.4	Passivhaus Utendorfasse.....	14
3.2	Raumklimatische Messungen .....	15
3.3	Validierung virtueller Gebäudemodelle .....	21
3.4	Vergleich unterschiedlicher Berechnungsweisen .....	28
3.5	Vorschlag zur Überarbeitung der ÖNORM B 8110-3 .....	30
3.5.1	Einleitung.....	30
3.5.2	Modellbildung .....	31
3.5.3	Umsetzung in Excel-Tool .....	41
3.5.4	Sommerliche Raumtemperaturen bei verschiedenen Bauweisen .....	43
4	Ausblick und Empfehlungen .....	54
	Literatur.....	54

# 1 Einleitung

Die Szenarien für den Klimawandel zeigen für Österreich eine hohe Wahrscheinlichkeit, dass die sommerlichen Außenlufttemperaturen in Österreich ansteigen werden.

Das Sommerverhalten von Wohnbauten ist aufgrund der steigenden Umsatzzahlen für Kleinklimageräte bereits jetzt ein intensiv diskutiertes Thema. Der verbreitete Einsatz von Kühlgeräten wäre ein wesentlicher Faktor für den zukünftigen Stromverbrauch im Sommer der auch die Versorgungssicherheit beeinträchtigen kann. In Gebäuden mit nicht ausreichendem Schutz gegen sommerliche Überwärmung ist das Risiko sehr hoch, dass aufgrund hoher Raumtemperaturen unkomfortable Raumtemperaturen entstehen. Aus diesen Überlegungen heraus, ist es wichtig das Sommerverhalten von Gebäuden und die Beeinflussbarkeit durch NutzerInnen zu verstehen.

Im Zuge der Planung von Neubauten und Sanierungen wird derzeit mit Hilfe der ÖNORM B 8110-3 Ausgabe 1999 12 01 nachgewiesen, dass eine sommerliche Überwärmung vermieden ist. Die Norm enthält dabei ein vereinfachtes Verfahren in dem Lüftungswärmeverluste, innere und solare Gewinne und die Speicherfähigkeit des Gebäudes abgebildet werden. Die Formulierungen in der Norm sind sehr mehrdeutig und die enthaltenen Annahmen werden in der Praxis öfters missverstanden. Im Rahmen der europäischen Normierung wird eine Simulation des Raumverhaltens unter sich wiederholenden Außenklimazuständen (periodische Randbedingungen) als Verfahren zum Nachweis sommerlicher Raumtemperaturen definiert. Eine Überarbeitung der ÖNORM B 8110-3 ist daher dringend notwendig. Ziel des Arbeitspaketes 12 war es, durch Messung in bewohnten Objekten das Nutzverhalten und den damit verbundenen Einfluss auf die sommerlichen Raumtemperaturen zu erheben.

Um das Verhalten von NutzerInnen studieren zu können wurden im Rahmen des Projektes am Beispiel mehrerer Wiener mehrgeschossiger Passivhäuser gezeigt, dass die Optimierung von Gebäuden in Richtung geringem Heizwärmebedarf und geringer Heizlast (Passivhäuser) bei optimaler Planung auch ein sehr gutes sommerliches Verhalten aufweisen können. Insbesondere wird der Einfluss der eingesetzten Baustoffe auf das sommerliche Temperaturverhalten dargestellt und zukünftige Entwicklungsrichtungen aufgezeigt.

Die untersuchten Gebäude wurden mehrere Monate messtechnisch begleitet und deren Raumverhalten aufgezeichnet. Dadurch konnte das Lüftungsverhalten der BewohnerInnen erfasst werden. Eine abschließende Befragung gab Aufschluss über die Motivation Fenster zu kippen, zu öffnen oder sie geschlossen zu halten.

Neben der Messung in bewohnten Wohnungen wurden in Wohnungen in einem Neubau, die vom Bauträger für Versuche zur Verfügung gestellt wurden, Messungen zur Validierung von Mehrzonenberechnungen durchgeführt. In diesen Wohnungen wurde der Wärmeeintrag zur Abbildung von Personen und Geräten elektrisch durchgeführt. Die Ergebnisse der Messungen bildeten die Grundlage für die Validierung der erstellten Gebäudemodelle anhand welcher die Einflüsse der Baustoffwahl, des Lüftungsverhaltens und der inneren Lasten untersucht wurden.

Auf Basis der validierten Mehrzonenberechnung konnte gezeigt werden, wie die Mehrzonenberechnung mit realem Außenklima mit einer Einzonenberechnung mit periodischen Randbedingungen bzw. dem vereinfachten Verfahren korreliert.

Den Abschluss des Berichtes bildet die Dokumentation der Inhalte eines normierbaren Berechnungsalgorithmus und in eine beispielhafte Umsetzung in einem Tabellenkalkulationsprogramm. Damit sind Grundlagen zur Weiterentwicklung der ÖNORM B 8110-3 geschaffen, in der die tatsächlichen Möglichkeiten zu Lüftung, zur Absenkung der inneren und solaren Lasten und eine detaillierte Berücksichtigung der Eigenschaften der eingesetzten Baustoffe und Konstruktionen berücksichtigt werden können.

## 2 Zusammenfassung der Projektergebnisse

### 2.1 Ergebnisse zur Abbildung des NutzerInnenverhaltens

Für das sommerliche Verhalten von Wohngebäuden ohne aktive Kühlung (keine Raumklimageräte, keine Kühlung über Grundwasser, Erdreich etc.) sind das Außenklima, die thermischen Eigenschaften der Außenbauteile (Oberflächenfarbe, Bauteilaufbauten, Gesamtenergiedurchlassgrad der Verglasungen, Wirkung von Sonnenschutzsystemen, etc.), die Nutzung von nächtlichen Lüftungsmöglichkeiten und der Sonnenschutzeinrichtung, die Freisetzung von Wärme durch Geräte, Beleuchtung und Personen und die Speicherwirksamkeit der Einrichtungsgegenstände und der Baukonstruktionen von zentraler Bedeutung.

Aufgrund der Messungen in den benutzten Wohngebäuden können folgende Ergebnisse abgeleitet werden:

Lüftungsmöglichkeiten über Fenster oder Fenstertüren werden von BewohnerInnen aus verschiedenen Gründen nicht vollständig genutzt:

- 1) Erst ab relativ hohen Innentemperaturen wird in der Nacht erhöht gelüftet.
- 2) Informationen über ein „optimales“ Lüften in Passivhäusern im Winter (Lüften grundsätzlich mittels Lüftungsanlage, bei intensiven Gerüchen Stoßlüften mittels Fenster.) führen bei einigen BenutzerInnen zu fehlerhaftem Verhalten im Sommer aufgrund der Annahme, dass man in Passivhäusern im Sommer auch nicht nachts lüften muss.
- 3) In Schlafräumen mit Kleinkindern werden Fenster maximal gekippt (Absturzgefahr)
- 4) Aufgrund des Umgebungslärms werden in Schlafräumen Fenster eher geschlossen gehalten bzw. maximal gekippt.
- 5) Bei Verwendung von Insektenschutzgitter, ist den BewohnerInnen die reduzierende Wirkung auf den sich ausbildenden Luftwechsel nicht bewusst.
- 6) In Wohnungen mit Haustieren werden Fenster ebenso unter Umständen nur gekippt, damit die Haustiere nachts nicht die Wohnung nicht verlassen.
- 7) In Wohnungen im Erdgeschoss bzw. anderen von außen leicht zugänglichen Bereichen werden aus Sicherheitsgründen Fenster maximal gekippt.
- 8) Das Innentüren nachts offen sein müssen, damit die Lüftung über Räume mit offenen Fenstern eine Wirkung für die gesamte Wohnung bekommt, ist ebenso nicht im Bewusstsein mancher BewohnerInnen bzw. wird aus anderen nutzungsbedingten Gründen nicht gemacht.

Daraus ergeben sich zwei wesentliche Schlussfolgerungen:

Einfache, nachvollziehbare und verfügbare Information für das konkrete Gebäude über die Bedeutung der Nachtlüftung im Sommer für BewohnerInnen. Dabei sollten die Themen Sicherheit und Umgebungslärm abgebildet werden.

Bei der Berechnung der sommerlichen Raumtemperaturen, muss der Umgebungslärmpegel die zulässige Wahl der Fensterstellung von Schlafräumen beeinflussen und der Bauherr



muss zusammen mit den PlanerInnen über die zulässige nächtliche Fensterstellung bestimmen, um Sicherheitsüberlegungen abzubilden.

## 2.2 Validierung der thermischen Gebäudesimulation

Anhand der Messungen in leer stehenden Wohnungen, in denen die Wärmeabgabe von Personen und Geräten elektrisch (und damit kontrolliert) simuliert werden konnte, konnte gezeigt werden, dass eine sehr gute Übereinstimmung zwischen den gemessenen Raumtemperaturen und den berechneten gefunden werden kann. Aufgrund der Luftdichtheit der verwendeten Wohnung, war der unkontrollierte Beitrag von Luftströmungen extrem minimiert. Durch offene Innentüren gab es in der Simulation als auch in der Messung einen temperaturinduzierten Wärmetransport durch Strömung zwischen den einzelnen Räumen. Durch Variation der Lüftungsanlage (mit oder ohne Wärmetauscher) und Variation der Stellung der Fenstertüren wurden über den Messzeitraum von 3 Monaten verschiedenen Bedingungen nachgestellt.

## 2.3 Vergleich Ganzjahressimulation und periodischer Außenklimazustand

Anhand des Vergleichs zwischen Ganzjahressimulationen und der Simulation des thermischen Verhaltens für einen periodischen Außenklimazustand konnte gezeigt werden, dass es bei den üblichen Bauweisen bis zum Passivhaus eine Korrelation zwischen dem Maximum im periodischen Zustand und in der Ganzjahressimulation gibt, wenn der Tagesmittelwert und die Tagesschwankung der Außenlufttemperatur im periodischen Zustand für den Standort realistisch sind. Abweichungen ergeben sich für kurzfristige Hitzeperioden. Diese können naturgemäß mit der Berechnung des periodischen Zustandes nicht abgebildet werden.

## 2.4 Integration in ein Gebäudebewertungssystem

Für die Zertifizierung der Nachhaltigkeit von Gebäuden im Bereich des thermischen Verhaltens im Sommer, stellt der dargestellte Berechnungsalgorithmus eine sehr gute Möglichkeit dar, sowohl Mindestanforderungen als auch erhöhte Sicherheiten gegen eine sommerliche Überwärmung abzubilden und in die Beurteilung aufzunehmen. Von der Verwendung eines vereinfachten Verfahrens wird abgeraten. Insbesondere wäre zu überlegen sowohl die Ergebnisse für den durchschnittlichen Sommer als auch für Hitzeperioden für eine Bewertung zu übernehmen.

## 2.5 Ergebnisse für die Bauwirtschaft

Durch die Abbildung aller relevanten Vorgänge, kann das sommerliche Gebäudeverhalten mit der neu erscheinenden ÖNORM B 8110-3 (Erscheint voraussichtlich Anfang 2010) ziemlich treffsicher abgebildet werden.

## 3 Inhaltliche Darstellung

### 3.1 Auswahl der Referenzobjekte

Im Zuge dieses Arbeitspaketes wurden 4 vergleichbare Wohnungen für hygrothermische Messungen ausgewählt. Die Wohnungen sind nach 3 unterschiedlichen Bauweisen gebaut: Stahlbetonbau, Ziegelbau und Holzbau. Die Auswahl beschränkte sich auf Wohnungen mit MieterInnen, welche im Sommer die kontrollierte Wohnraumlüftung betreiben. Alle ausgewählten Wohnungen befinden sich in Wien:

- Passivhaus Mühlweg (Holzbau), 1210 Wien
- Passivhaus Wienerberg City Gebös (Ziegelbau), 1100 Wien
- Passivhaus Kammelmweg (Mischbau - Stahlbeton & Holz), 1210 Wien
- Passivhaus Utendorfgasse (Stahlbetonbau), 1140 Wien

Im weiteren folgt die Beschreibung der gemessenen Wohnanlagen mit Positionen der Sensoren.

#### 3.1.1 Passivhaus Mühlweg

Es handelt sich um mehrgeschossigen Wohnbau in Holz- bzw. Holzmischbauweise. Die vorgefertigten Außenwände aus Massivholzplatten sind mit einem Vollwärmeschutz mit Dickputz aus Holzfasern versehen. In der Wohnhausanlage befindet sich eine zentrale Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung. Die Wohnungen werden über Heizkörper (Radiatoren), die im Raum aufgestellt sind, geheizt. Fundament und Keller sind aus Stahlbeton. Das Haus ist um einen betonierten Stiegenhauskern gruppiert, allen Wohnungen sind Loggien oder Terrassen aus Holz vorgelagert.

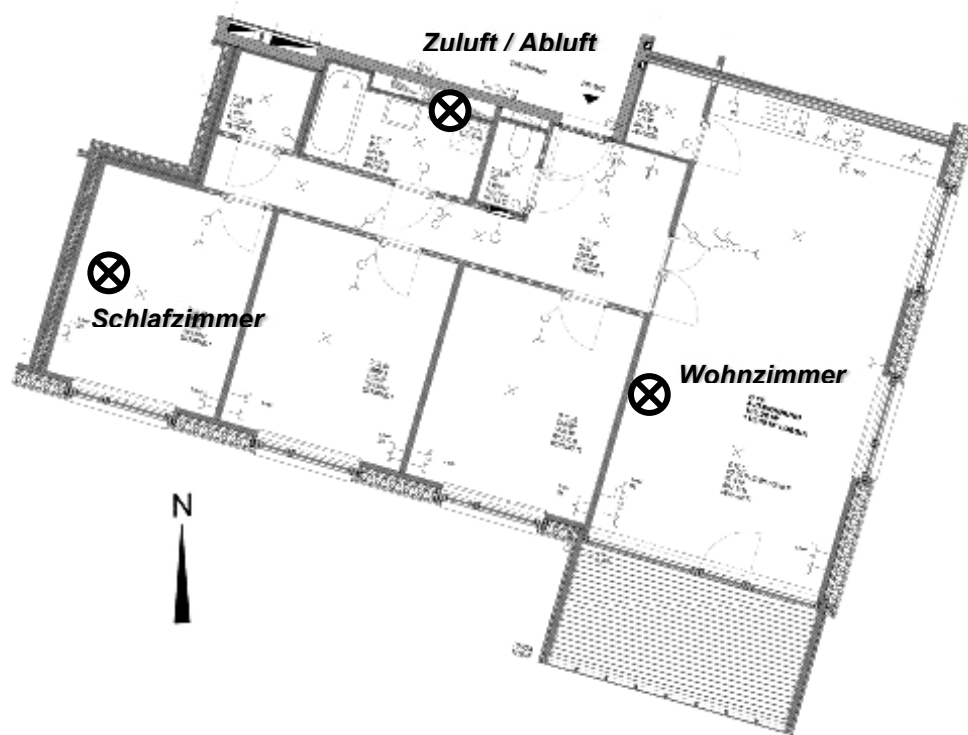


Abbildung 1: Planskizze der gemessenen Wohnung im Passivhaus Mühlweg mit Angabe der Positionen der Sensoren (Kreise mit Kreuz).



Abbildung 2: Positionen der Sensoren in der untersuchten Wohnung im Passivhaus Mühlweg. Links oben: Zuluft. Rechts oben: Wohnzimmer. Unten: Schlafzimmer.

### 3.1.2 Passivhaus Wienerberg City Gebös

Die Konstruktion des Passivhauses Wienerberg City Gebös ist ein Stahlbetonskelett mit Ziegelausfachung und Wärmedämmung. Die zwei oberen Geschosse werden in reiner Ziegelbauweise mit Wärmedämmung errichtet. Die nichttragenden Zwischenwände werden als Ziegelwände hergestellt.

Die Sockelzone, wie auch die stirnseitigen über alle Geschosse durchlaufenden Fassaden sind mit Sichtziegelelementen verblendet, die längsseitigen Fassadenflächen der Hauptgeschosse werden in geputzter Ausführung ausgeführt, der gewellte, vorspringende Fassadenteil aus Trapezblech hergestellt. Die beiden aufgesetzten Dachgeschosse erhalten eine hinterlüftete Fassade. Das gesamte Gebäude ist mit einer dezentralen kontrollierten Wohnraumlüftung ausgestattet. Die Außenluft wird über unterirdisch verlaufende Luftkollektorrohre geführt und vorgewärmt.

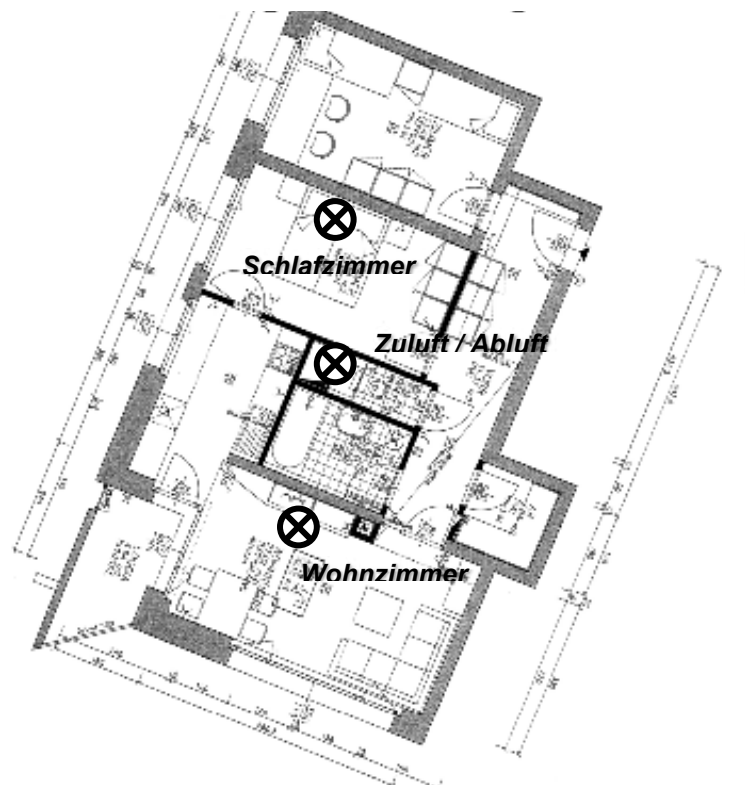


Abbildung 3: Planskizze der gemessenen Wohnung im Passivhaus Gebös mit Angabe der Positionen der Sensoren (Kreise mit Kreuz).

### 3.1.3 Passivhaus Kammelpweg

Bei diesem Gebäude handelt es sich um einen mehrgeschossigen Passivhaus-Wohnbau nach Holz-Beton-Mischbauweise erbaut. Die Außenwände sind aus einer Holzkonstruktion mit Wärmedämmung, die restlichen Bauteile (vor allem die tragenden Teile) sind aus Stahlbeton. Die Innenwände sind teils massive Stahlbetonwände und teils leichte Gipskartonwände. Das Gebäude hat im Inneren ein Atrium (kalt), welches sich über alle Geschosse ausstreckt. Die Wohnungen werden über kontrollierte dezentrale Wohnraumlüftungsgeräte mit Wärmerückgewinnung mit frischer Luft versorgt. Die Frischluft wird zentral über das Dach angesaugt. Die Frischluft wird durch einen Erdwärmetauscher (Absorber in Garagendecke) vorgewärmt. Die Nachheizung der Luft erfolgt mit kleinen Heizkörpern, die sich in den Wohnungen unter den Luftauslässen befinden. Die Versorgung des Gebäudes mit Wärme erfolgt mittels Fernwärme.



Abbildung 4: Positionen der Sensoren in der untersuchten Wohnung im Passivhaus Kammelpweg. Links: Schlafzimmer. Rechts: Wohnzimmer.

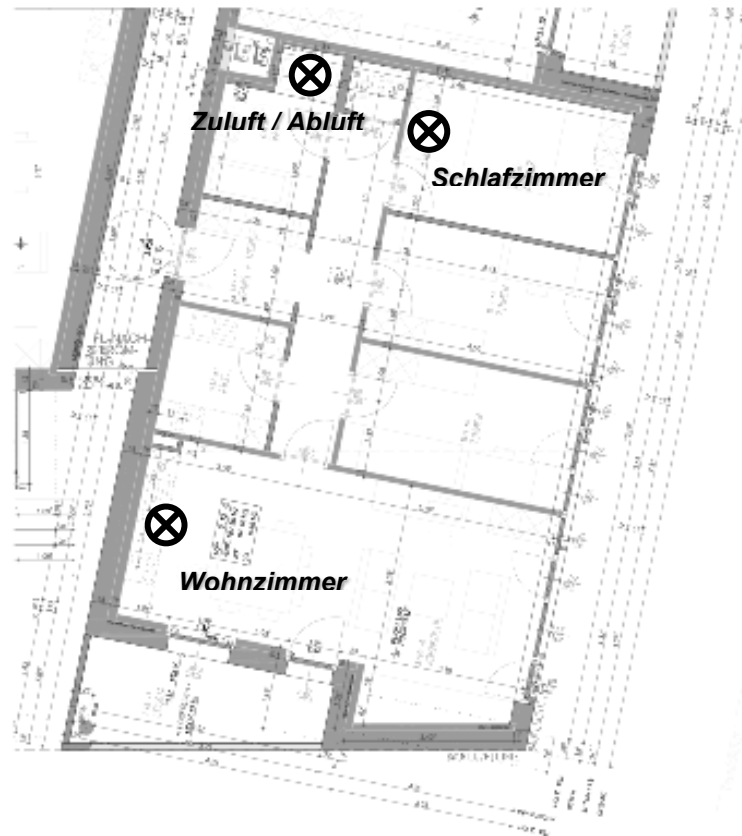


Abbildung 5: Planskizze der gemessenen Wohnung im Passivhaus Kammelweg mit Angabe der Positionen der Sensoren (Kreise mit Kreuz). Norden ist oben auf dem Bild.

### 3.1.4 Passivhaus Utendorfgasse

Die Außenwand des Gebäudes besteht aus Stahlbeton mit Vollwärmeschutzfassade. Tragende Keller- und Garagenwände sind aus Stahlbeton, ebenso die Decke der Tiefgarage, die im Bereich der Häuser gedämmt sind. Die Trennwände zwischen den Wohnungen bzw. zum Stiegenhaus bestehen aus Stahlbeton mit gedämmter Gipskartonvorsatzschale. Innerhalb der Wohnungen bestehen die Zwischenwände aus Gipskartonständerwänden mit entsprechender Mineralwolleinlage. Die Geschossdecken bestehen ebenso aus Stahlbeton. Das Dach ist aus Stahlbeton mit Wärmedämmung und einer Blecheindeckung hergestellt.

Die Lüftungsanlage ist semi-zentral. Zentral (auf dem Dach platziert) sind die Außenluftfilterung, Wärmetauscher, Stützventilatoren, Frostschutzsicherung. Dezentral (in den Wohnungen) sind die Volumenstromregelung, Nachheizregister und Weitwurfdüsen. Die Wohnungen werden luftgeheizt.



Abbildung 6: Planskizze der gemessenen Wohnung im Passivhaus Utendorfgasse mit Angabe der Positionen der Sensoren (Kreise mit Kreuz = Temperatur und Luftfeuchtigkeit, Acht-Stern = Fensteröffnung). Norden ist oben auf dem Bild.

### 3.2 Raumklimatische Messungen

Bei den durchgeführten raumklimatischen Messungen wurde das tatsächliche Raumklima unter realer Nutzung und ohne Fensterlüftung erfasst. Bei den Messungen wurden die operativen Raumtemperaturen, die Raumluftfeuchtigkeit und die Fensterstellung erfasst. Um den Einfluss der kontrollierten Wohnraumlüftungen zu erfassen wurden die Luftzustände (d.h. Temperatur und Luftfeuchtigkeit) in der Zuluft gemessen. Damit die Messwerte nicht durch ein mögliches geändertes Verhalten der NutzerInnen nach dem Einbau der Messsensoren verfälscht werden, wurden die Sensoren mehrere Monate vor den relevanten Sommermessungen eingebaut. So konnten sich die NutzerInnen an die Präsenz der Sensoren gewöhnen und zum gewohnten NutzerInnenverhalten zurückkehren.

Für die Messungen wurden folgende Sensoren verwendet:

- RTR-53 (T&D Corporation, Japan) - Temperatur und Luftfeuchtigkeit
- RVR-52 (T&D Corporation, Japan) - Spannung

- „Reed“-Kontaktfühler (Fenster - offen/geschlossen)



Abbildung 7: Für die Messungen verwendeter Temperatur- und Luftfeuchtigkeitssensor als auch Datenlogger RTR-53 (T&D Corporation, Japan).

Raumtemperaturen in °C

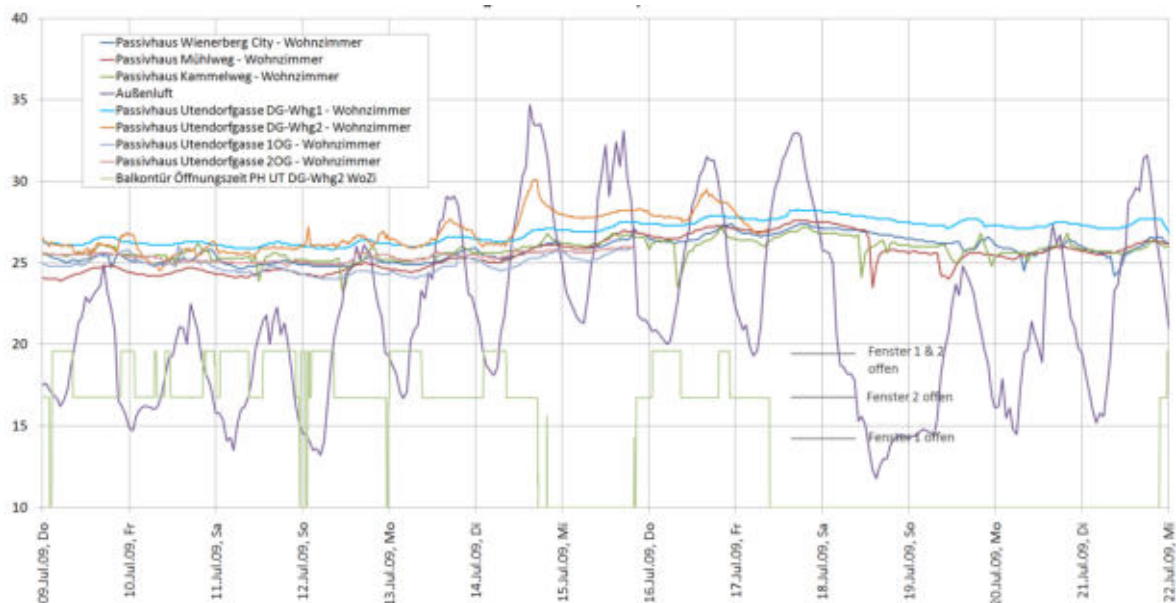


Abbildung 8: Vergleich der Raumtemperaturen der Wohnzimmer ausgewählter Wohnungen mehrerer Passivhaus-Wohnanlagen (Passivhaus Wienerberg City – Gebös, Passivhaus Kammelweg, Passivhaus Mühlweg, Passivhaus Utendorfasse), erbaut nach unterschiedlichen Bauweisen (Ziegelbau, Stahlbetonbau mit Holzaußenwänden, Holzbau und Stahlbetonbau).



## Raumtemperaturen in °C

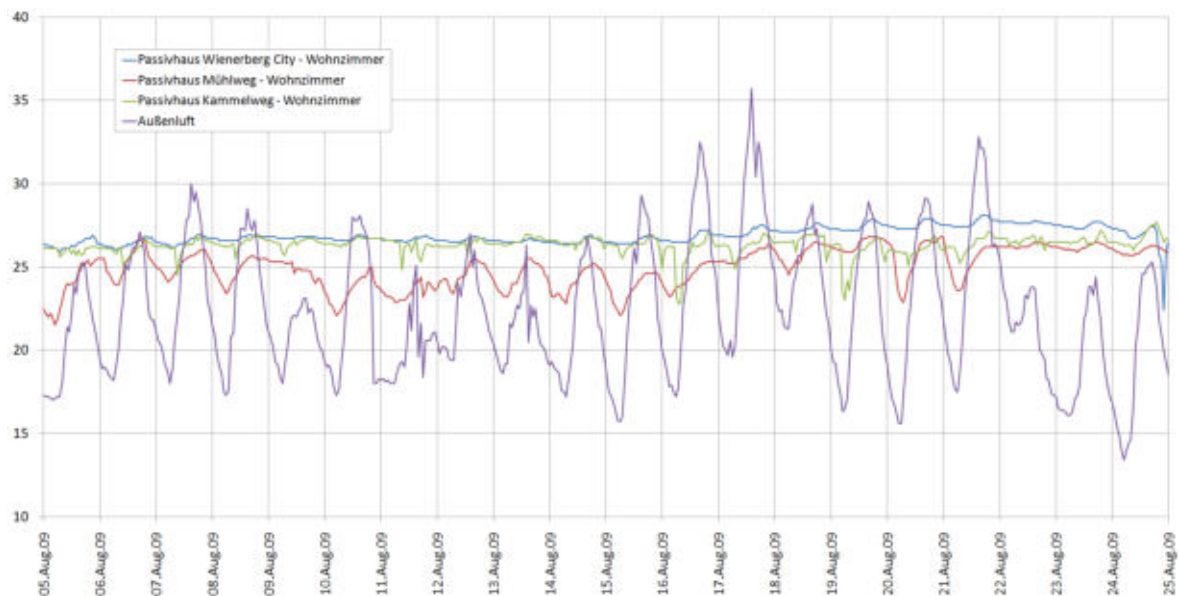


Abbildung 9: Vergleich der Raumtemperaturen der Wohnzimmer ausgewählter Wohnungen mehrerer Passivhaus-Wohnanlagen (Passivhaus Wienerberg City – Gebös, Passivhaus Kammelweg, Passivhaus Mühlweg), erbaut nach unterschiedlichen Bauweisen (Ziegelbau, Stahlbetonbau mit Holzaußenwänden, Holzbau).

Die Lüftungsanlage in der Wohnung im Passivhaus Wienerberg City war den ganzen Sommer ausgeschaltet (wegen hohem Anlagenpegel, wenn in Betrieb), trotzdem wurde frische Luft von den Stützventilatoren in die Wohnung eingeblasen. Im Zeitraum vom 9. August bis 25. August sind die BewohnerInnen der Wohnung im Passivhaus Wienerberg City – Gebös abwesend (in Urlaub) gewesen. Das ist am immer größer werdenden Raumtemperaturanstieg beim Erwärmen der Außenluft ab dem 15. August ersichtlich. Auch ersichtlich ist, dass die BewohnerInnen bei Rückkehr nach Hause (25. August) die Fenster in der Wohnung geöffnet haben, um die Raumtemperatur abzusenken. Während desurlaubes sind im Schlafzimmer derselben Wohnung die innenliegenden (nahe der Glasscheibe angeordneten) Rollos heruntergezogen gewesen. Das wirkte sich in einem viel kleineren Temperaturanstieg in den Schlafzimmern aus.

Anhand der Raumtemperaturen in den Wohnzimmern der untersuchten Wohnungen ist ersichtlich, dass die zwei Massivbau-Wohnanlagen (Kammelweg und Wienerberg City) ähnliche Raumtemperaturen haben. Wobei in der untersuchten Wohnung am Kammelweg viel mehr gelüftet wurde, was man an den plötzlichen Raumtemperaturabsenkungen sieht und auch am konstanterem Temperaturverlauf in der Hitzeperiode (14. - 18. August). An den täglichen Temperaturschwankungen im Wohnzimmer im Passivhaus Mühlweg (Leichtbau) sieht man, dass die BewohnerInnen täglich die Fenster geöffnet hatten und optimal die Nachtkühlung durch Fensterlüftung praktiziert haben.

Raumtemperaturen in °C

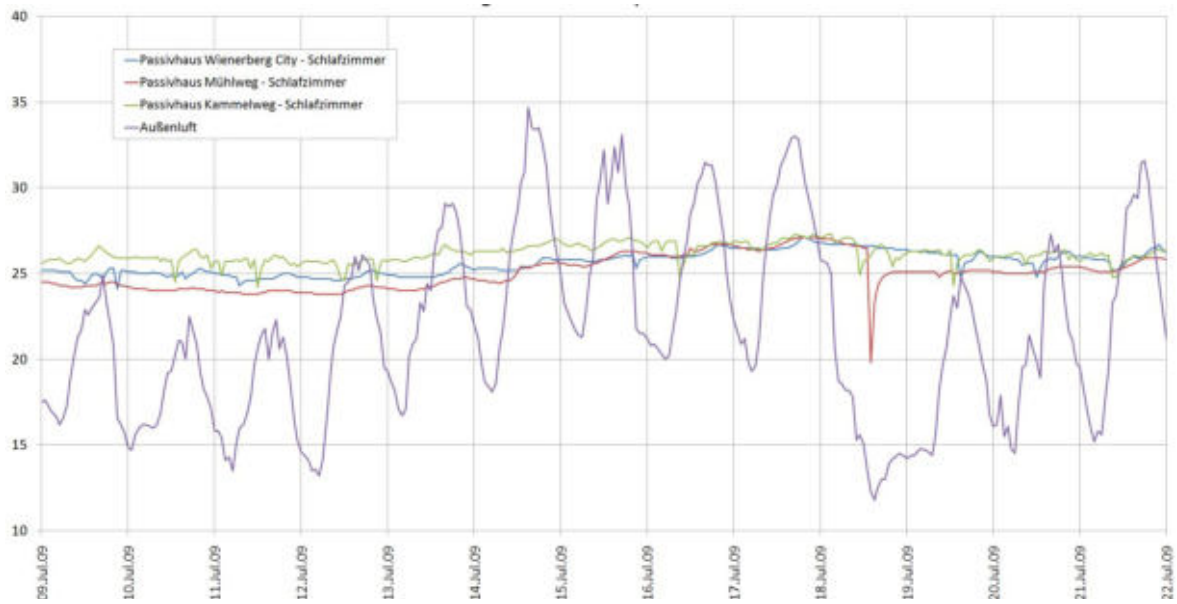


Abbildung 10: Vergleich der Raumtemperaturen der Schlafzimmer ausgewählter Wohnungen aus 3 Wiener mehrgeschossigen Passivhaus-Wohnanlagen (Passivhaus Wienerberg City – Gebös, Passivhaus Kammelweg, Passivhaus Mühlweg), erbaut nach unterschiedlichen Bauweisen (Ziegelbau, Stahlbetonbau, Holzbau).

Raumtemperaturen in °C

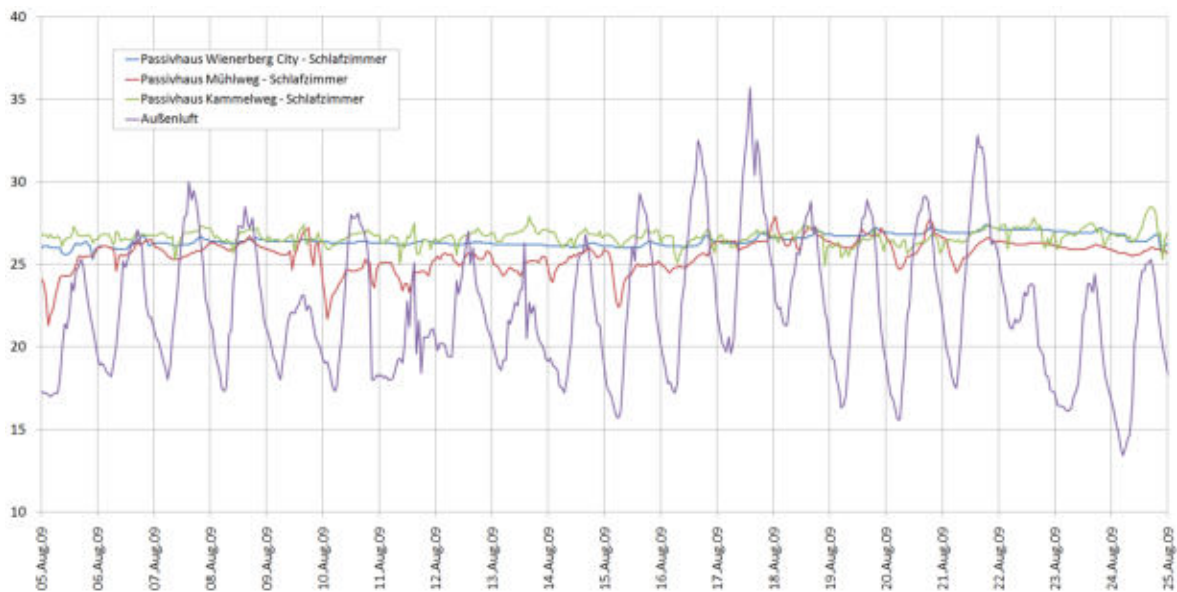


Abbildung 11: Vergleich der Raumtemperaturen der Schlafzimmer ausgewählter Wohnungen aus 3 Wiener mehrgeschossigen Passivhaus-Wohnanlagen (Passivhaus Wienerberg City – Gebös, Passivhaus Kammelweg, Passivhaus Mühlweg), erbaut nach unterschiedlichen Bauweisen (Ziegelbau, Stahlbetonbau, Holzbau).

An dem annähernd konstanten Temperaturniveau in den Schlafzimmern ist zu erkennen, dass untertags die Räume relativ gut verschattet sind, und dass nachts mit Fensterlüftung die Temperatur absenkt werden kann.

Die Wohnung in Passivhaus Wienerberg City hatte nachts fast immer die Fenster im Schlafzimmer geschlossen. Es wurde lediglich im Wohnzimmer ein Fenster zur Loggia hin geöffnet, welches mit einem Insektenschutzgitter versehen war. Der Grund für die geschlossenen Fenster in den Schlafzimmern ist, laut Auskunft des Mieters, der störende Außenlärmpegel. Aus dem geringen Einfluss des geöffneten Fensters auf die nächtliche Absenkung der Raumtemperaturen kann hergeleitet werden, dass der Luftaustausch dadurch deutlich reduziert wurde.

Relative Luftfeuchtigkeit in %

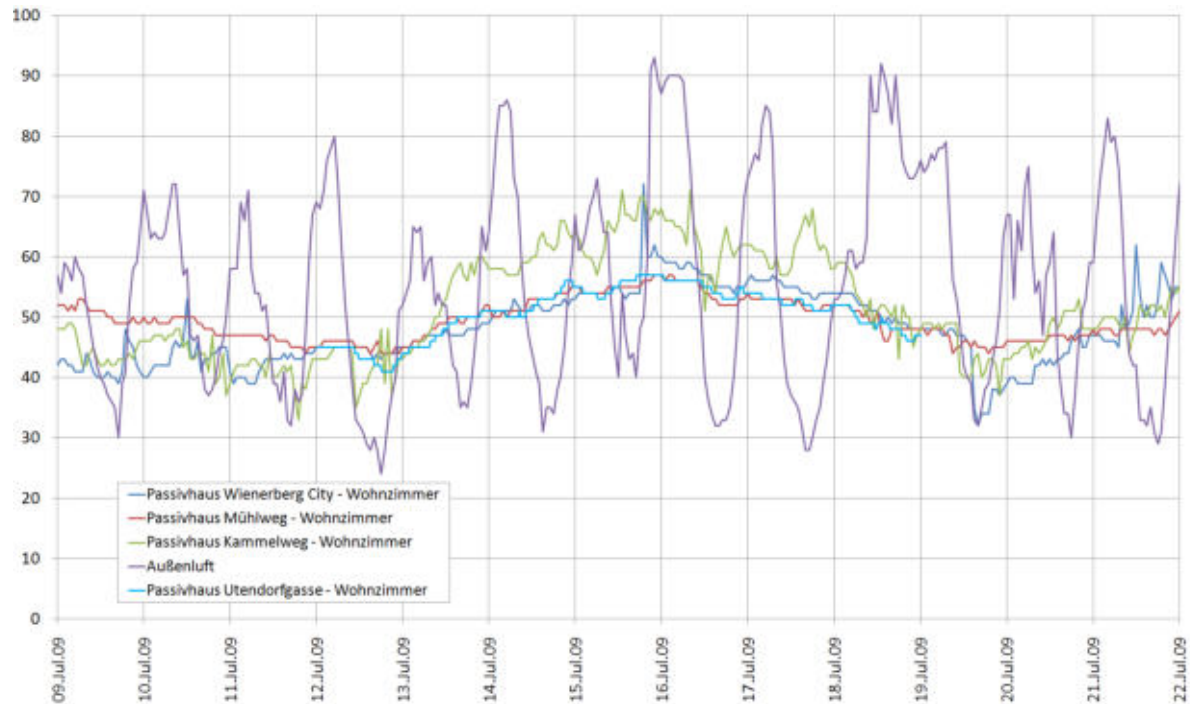


Abbildung 12: Vergleich der relativen Luftfeuchtigkeit in den Wohnzimmern ausgewählter Wohnungen aus 3 Wiener mehrgeschossigen Passivhaus-Wohnanlagen (Passivhaus Wienerberg City – Gebös, Passivhaus Kammelweg, Passivhaus Mühlweg), erbaut nach unterschiedlichen Bauweisen (Ziegelbau, Stahlbetonbau, Holzbau). Meßjahr 2009.

### Relative Luftfeuchtigkeit in %

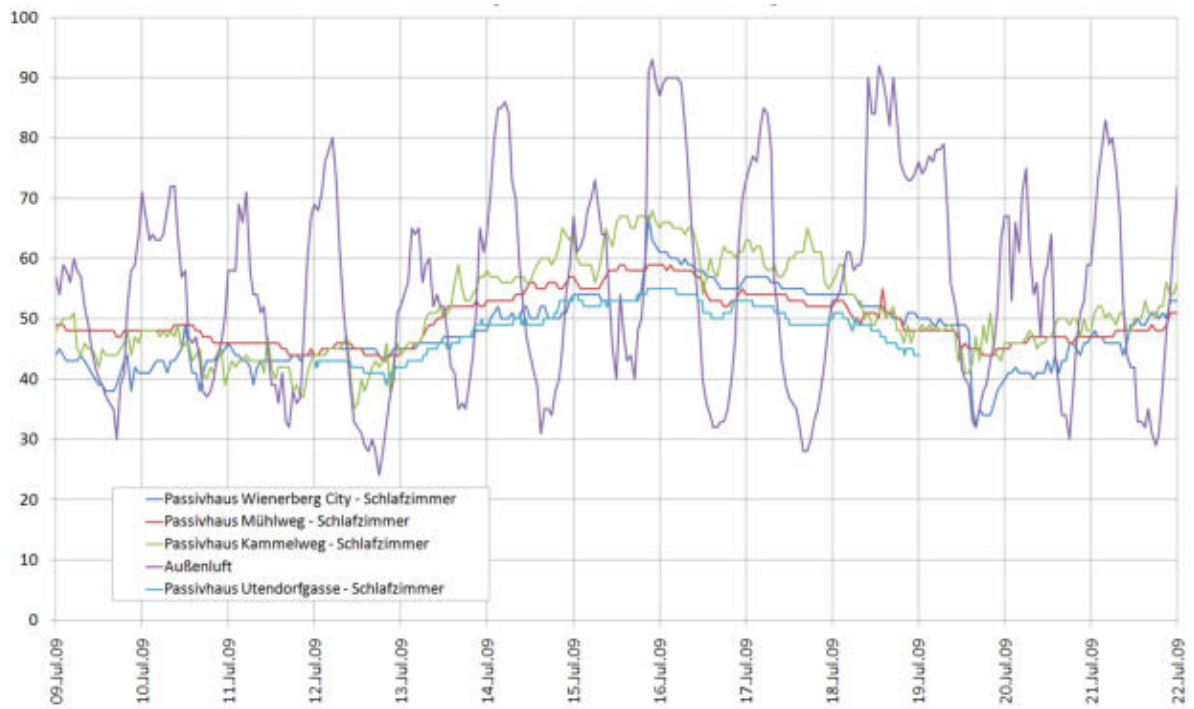


Abbildung 13: Vergleich der relativen Luftfeuchtigkeit in den Schlafzimmern ausgewählter Wohnungen aus 3 Wiener mehrgeschossigen Passivhaus-Wohnanlagen (Passivhaus Wienerberg City – Geböcs, Passivhaus Kammelweg, Passivhaus Mühlweg), erbaut nach unterschiedlichen Bauweisen (Ziegelbau, Stahlbetonbau, Holzbau). Meßjahr 2009.

### Raumtemperatur in °C

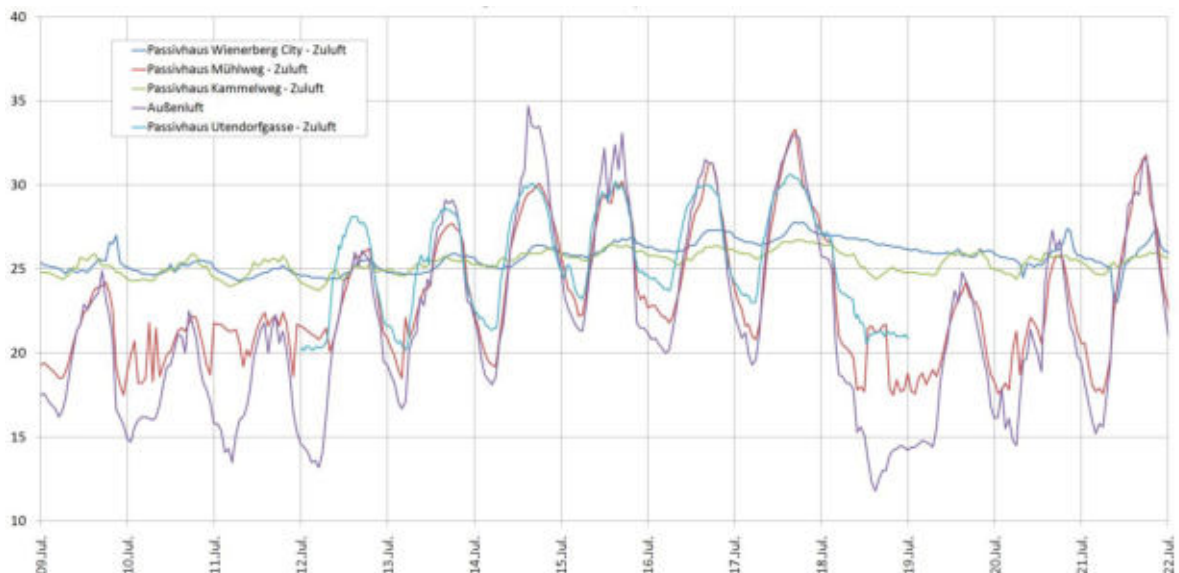


Abbildung 14: Vergleich der Zulufttemperatur der untersuchten Wohnungen ausgewählter Wohnungen aus 3 Wiener mehrgeschossigen Passivhaus-Wohnanlagen (Passivhaus Wienerberg City – Geböcs, Passivhaus Kammelweg, Passivhaus Mühlweg), erbaut nach unterschiedlichen Bauweisen (Ziegelbau, Stahlbetonbau, Holzbau). Meßjahr 2009.

Bei den Wohnungen in den Passivhäusern Utendorfsgasse und Mühlweg wurde der Wärmetauscher nicht mit einem Sommerbypass betrieben. Auf dem oberen Bild ist in der Nacht vom 18. auf 19. Juli zu sehen, dass die Zuluft (Mühlweg) nicht abgekühlt wird, sondern sogar erwärmt wird, was auf die Wirkung des Wärmetauschers deutet.

Raumtemperatur in °C

Fensterstellung

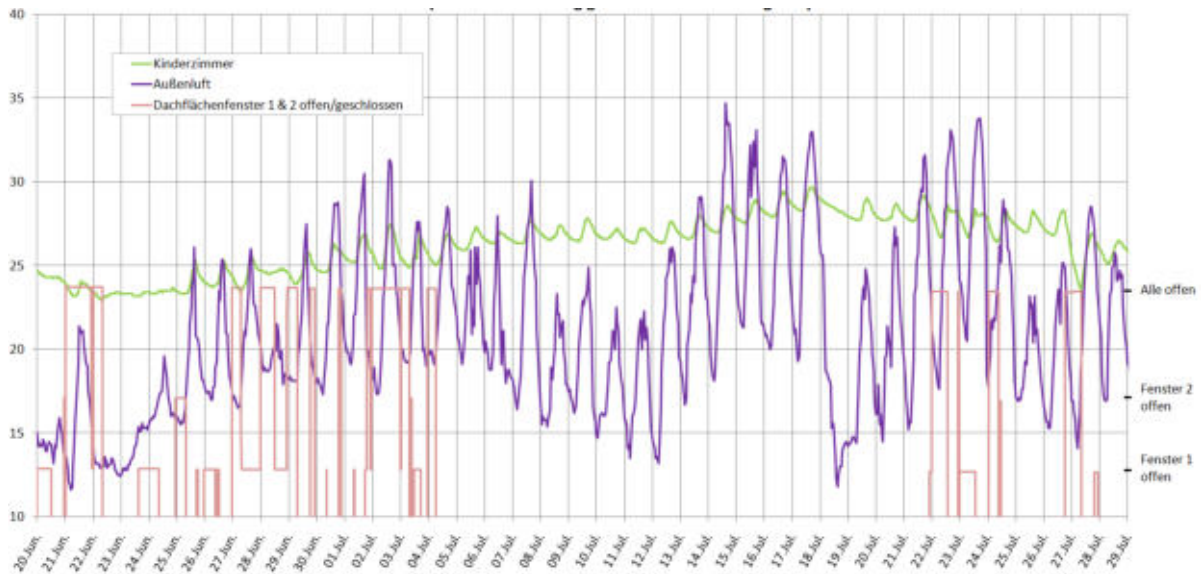


Abbildung 15: Vergleich der Raumtemperaturen im Vergleich zu den Öffnungszeitpunkten eines Kinderzimmers (Südorientiert) in einer Wohnung im Passivhaus Utendorfsgasse (Stahlbetonbau). Meßjahr 2009.

Die BewohnerInnen in der untersuchten Wohnung im Passivhaus Utendorfsgasse sind vom 5. Juli bis zum 22. Juli in Urlaub gewesen. Deshalb sind keine Fensteröffnungsvorgänge im zugehörigen Zeitabschnitt in der oberen Abbildung ersichtlich. Die Wohnung befindet sich im Dachgeschoß und das Schlafzimmer sowie auch das Kinderzimmer verfügen nur über Dachflächenfenster. In der Abwesenheit der BewohnerInnen ist ein eindeutiger Anstieg der Raumtemperatur im Kinderzimmer zu sehen. Nach der Rückkehr vom Urlaub konnte man die Raumtemperatur durch Fensterlüftung absenken. Die kleineren Amplituden, im Vergleich zu den oberen Abbildungen, der Temperaturabsenkung und die allgemein etwas höhere Raumtemperatur deuten darauf hin, dass die Fensterlüftung über Dachflächenfenster nicht die gleichen hohen Luftwechselzahlen erbringt.

### 3.3 Validierung virtueller Gebäudemodelle

Zur Entwicklung eines ausreichend genauen aber vereinfachten Verfahrens für die sommerliche Überwärmung von Räumen wurde als Vergleich das an der TU Wien in den letzten Jahren entwickelte Simulationsmodell buildopt\_VIE verwendet. Dieses Simulationsprogramm wurde bei der Planung der Passivhauswohnanlagen Utendorfsgasse [1] und Dreherstraße in Wien verwendet und im Rahmen des IEA Annex 41 "Whole building heat air and moisture response" [2] hinsichtlich der Fähigkeit Raumlufftfeuchten vorherzusagen im Detail validiert. Die Submodelle zur Strahlung, dem thermischen Bauteilverhalten und der Lüftung über Öffnungen wurden anhand der durchgeführten Messungen im Passivhaus Kammelweg validiert. Es wurde eine westorientierte 3-Zimmer-

Wohnung mit einem zugehörigen Garagenanteil modelliert. Die Lüftungsanlage wurde somit an den Absorber in der Garagendecke angekoppelt.

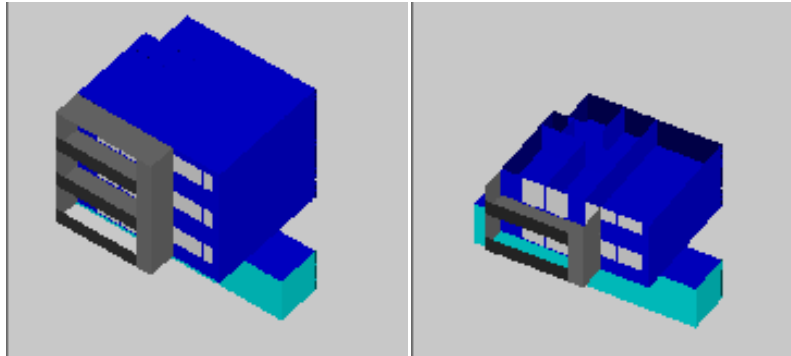


Abbildung 16: Das verwendete Modell einer 3-Zimmer Wohnung mit zugehörigem Garagenanteil (zur Kopplung der Lüftungsanlage an Absorber in Garagendecke) zur Validierung des sommerlichen Raumverhaltens.

Bei den Messungen als auch bei den Simulationen zur Validierung wurden verschiedene Parameter variiert:

- Wärmetauscher der Lüftungsanlage: mit/ohne
- Innentüren: offen/geschlossen
- Fenster: offen/geschlossen/gekippt
- Sonnenschutz: variiert
- Innere Lasten: variiert
- Unterschiedliche Lüftungsszenarien wurden durchgespielt

Auf dem folgenden Bild sieht man den Grundriss der zur Validierung gemessenen Wohnungen (sind zwei gleich Wohnungen Top A und Top B auf unterschiedlichen Geschossen):

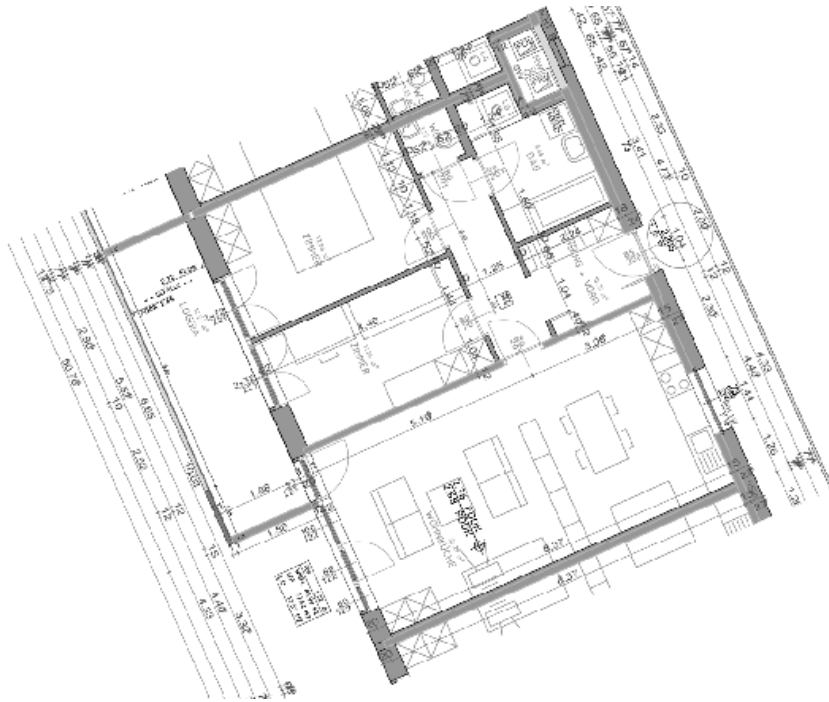


Abbildung 17: Planskizze der gemessenen Wohnungen für die Validierung im Passivhaus Kammelweg. Norden ist oben auf dem Bild.

Die Messungen wurden in zwei Wohnungen vom Passivhaus Kammelweg durchgeführt. In den nachfolgenden Abbildungen ist der Vergleich zwischen den Messungen und der Simulation im Top A zu sehen.

Vergleich der simulierten und gemessenen Raumtemperatur in °C zusammen mit der Außentemperatur

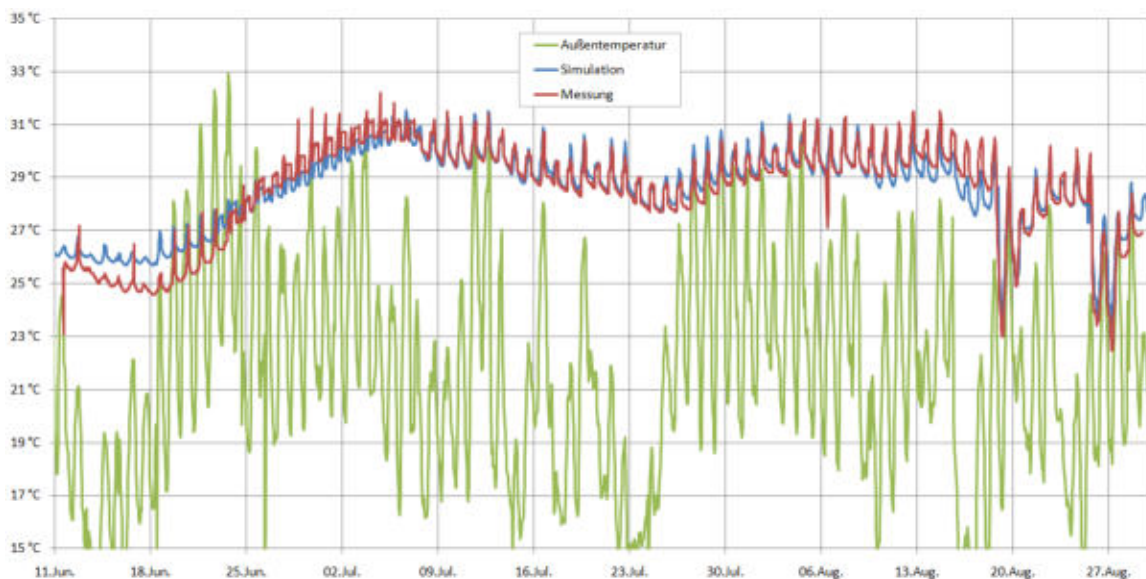


Abbildung 18: Vergleich der Simulation am erstellten 1-Zonen-Modell und der Messung der Raumtemperaturen in der Wohnküche einer 3-Zimmer-Wohnung (Top A) im Passivhaus Kammelweg.

In der oberen Abbildung sieht man eine sehr gute Übereinstimmung zwischen dem Modell (der Simulation) und den Messungen in den Wohnung im Passivhaus Kammelmweg. Das Modell bildet die Tageschwankungen der Raumtemperaturen und nach der Einschwingphase (11. Juni bis 9. Juli) auch das generelle Langzeitverhalten des Raumes sehr gut ab.

Vergleich der simulierten und gemessenen Raumtemperatur in °C zusammen mit der Außentemperatur

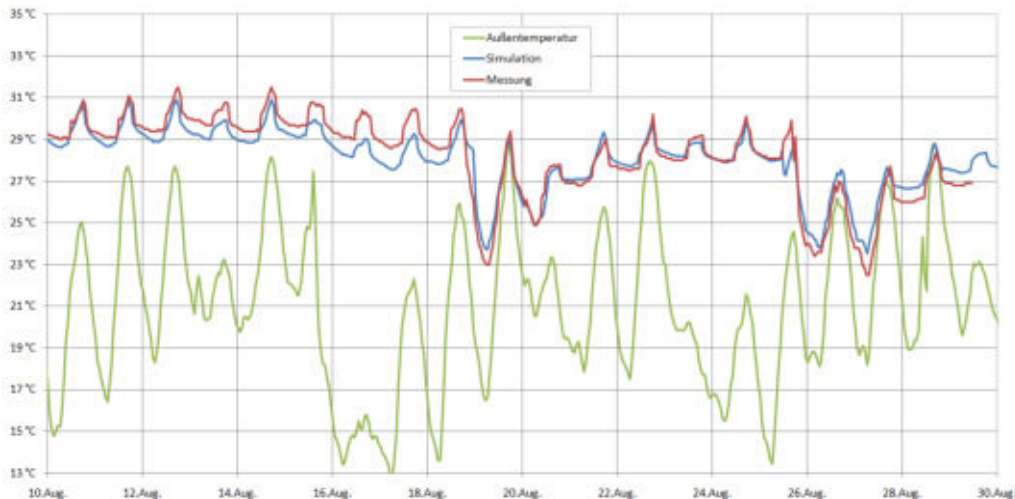


Abbildung 19: Vergleich der Simulation am erstellten 1-Zonen-Modell und der Messung der Raumtemperaturen in der Wohnküche einer 3-Zimmer-Wohnung (Top A) im Passivhaus Kammelmweg. Ausgewählter Zeitabschnitt aus der vorigen Abbildung, wo die Simulation der Fensteröffnung deutlicher zu sehen ist.

In der oberen Abbildung sieht man einen eingezoomten Bereich der vorigen Abbildung, wo man deutlicher die sehr gute Übereinstimmung zwischen der Simulation und den Messungen bei Fensteröffnung (19., 27. und 28. August).

Vergleich der simulierten und gemessenen Raumtemperatur in °C zusammen mit der Außentemperatur

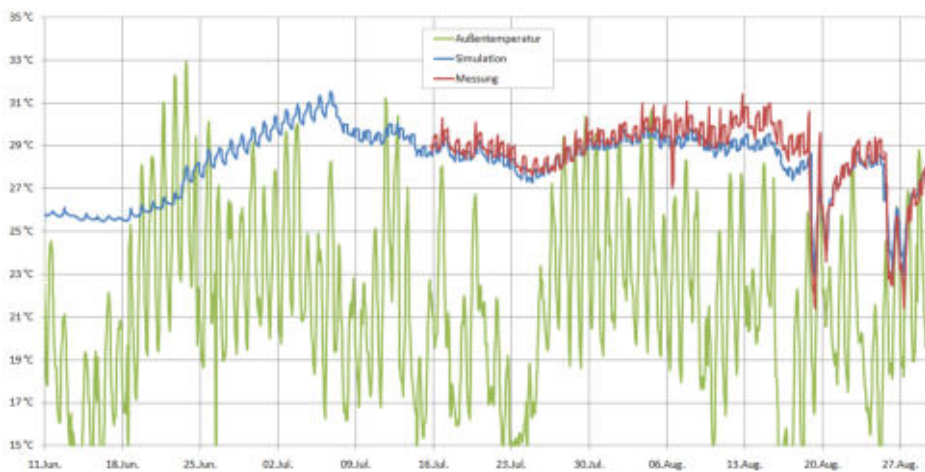


Abbildung 20: Vergleich der Simulation am erstellten 1-Zonen-Modell und der Messung der Raumtemperaturen im Südzimmer einer 3-Zimmer-Wohnung (Top A) im Passivhaus Kammelmweg.



Vergleich der simulierten und gemessenen Raumtemperatur in °C zusammen mit der Außentemperatur

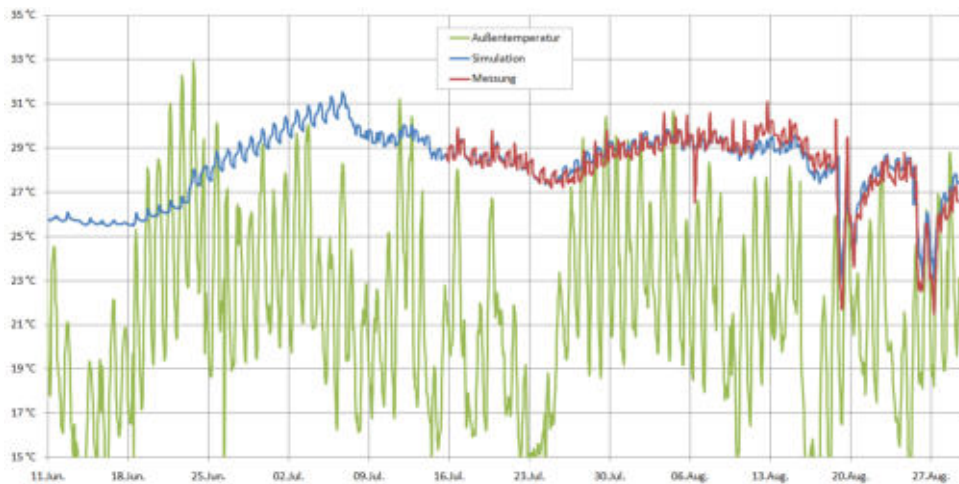


Abbildung 21: Vergleich der Simulation am erstellten 1-Zonen-Modell und der Messung der Raumtemperaturen im Nordzimmer einer 3-Zimmer-Wohnung (Top A) im Passivhaus Kammelweg.

Vergleich der simulierten und gemessenen Raumtemperatur in °C zusammen mit der Außentemperatur

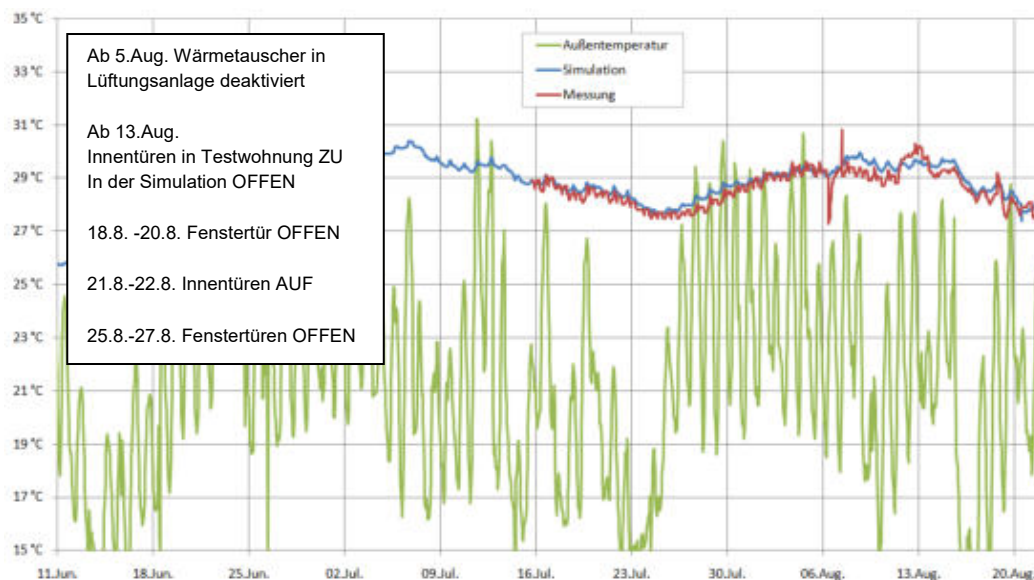


Abbildung 22: Vergleich der Simulation am erstellten 1-Zonen-Modell und der Messung der Raumtemperaturen im Badezimmer einer 3-Zimmer-Wohnung (Top A) im Passivhaus Kammelweg. Die Abweichungen ab 13. August sind darauf zurückzuführen, dass in der Simulation die Innentüren OFFEN und in der Realität ZU waren.

Das Auseinanderkommen der Ergebnisse der Simulation und der Messung auf dem oberen Bild im Badezimmer (ab 20. August) kommt davon, dass in der Simulation alle Innentüren offen sind, obwohl in der Realität mit dem Öffnen der Fenstertüren in den Räumen die Innentüren geschlossen wurden. Gut sichtbar wird dadurch die Kopplung der Räume untereinander, wenn Innentüren offen sind.

In den nachfolgenden Abbildungen ist der Vergleich zwischen den Messungen und der Simulation im Top B zu sehen. Man sieht auch bei dieser Wohnung, dass das Modell sehr gut mit den Messungen übereinstimmt.

Vergleich der simulierten und gemessenen Raumtemperatur in °C zusammen mit der Außentemperatur

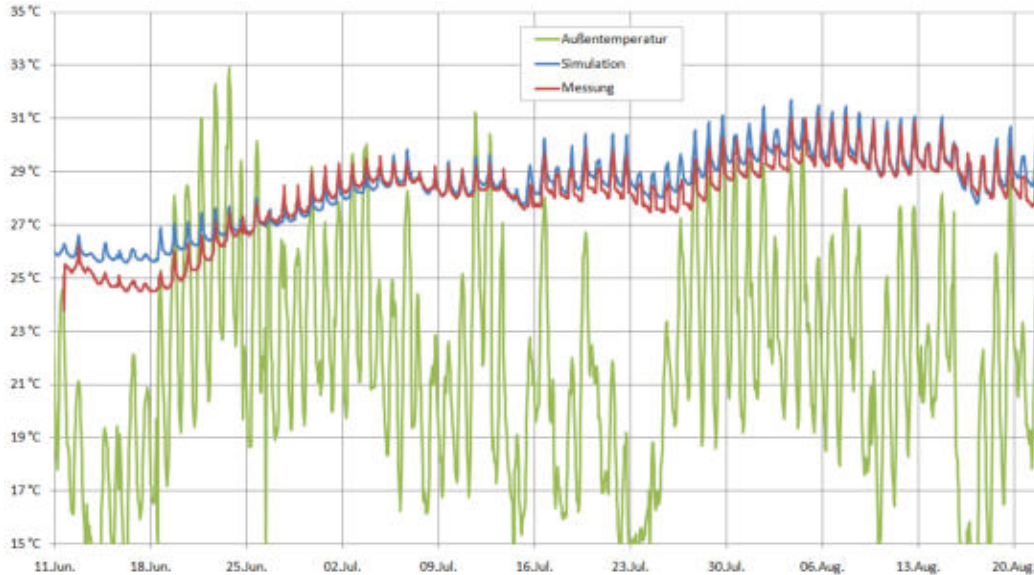


Abbildung 23: Vergleich der Simulation am erstellten 1-Zonen-Modell und der Messung der Raumtemperaturen in der Wohnküche einer 3-Zimmer-Wohnung (Top B) im Passivhaus Kammelweg.

Vergleich der simulierten und gemessenen Raumtemperatur in °C zusammen mit der Außentemperatur

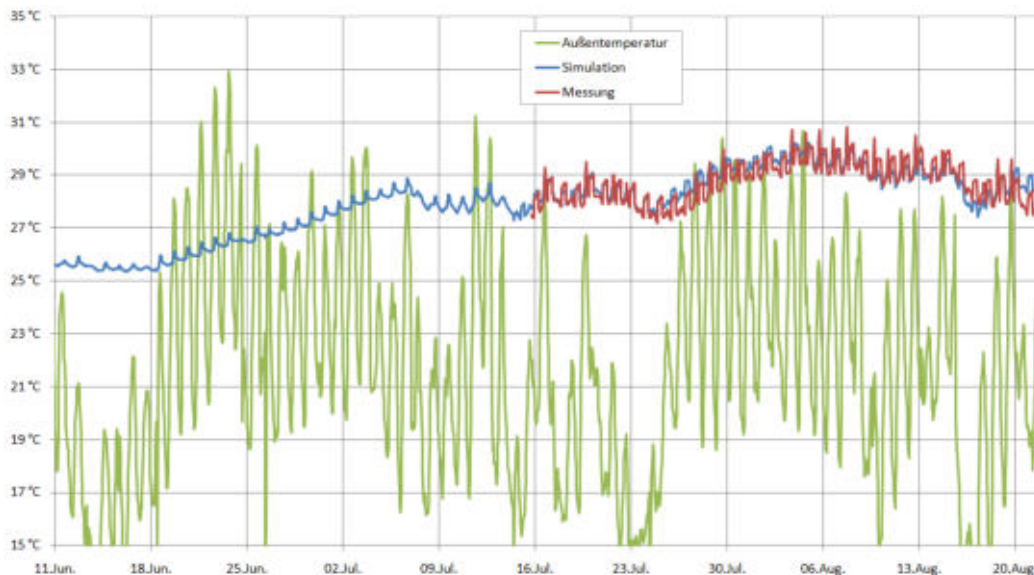


Abbildung 24: Vergleich der Simulation am erstellten 1-Zonen-Modell und der Messung der Raumtemperaturen im Südzimmer einer 3-Zimmer-Wohnung (Top B) im Passivhaus Kammelweg.

Vergleich der simulierten und gemessenen Raumtemperatur in °C zusammen mit der Außentemperatur

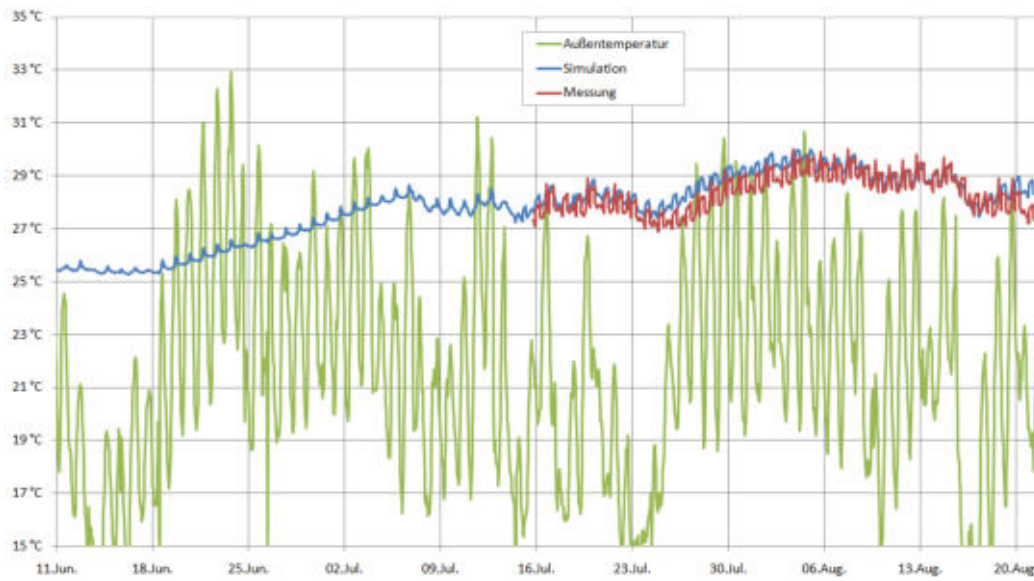


Abbildung 25: Vergleich der Simulation am erstellten 1-Zonen-Modell und der Messung der Raumtemperaturen im Nordzimmer einer 3-Zimmer-Wohnung (Top B) im Passivhaus Kammelweg.

Vergleich der simulierten und gemessenen Raumtemperatur in °C zusammen mit der Außentemperatur

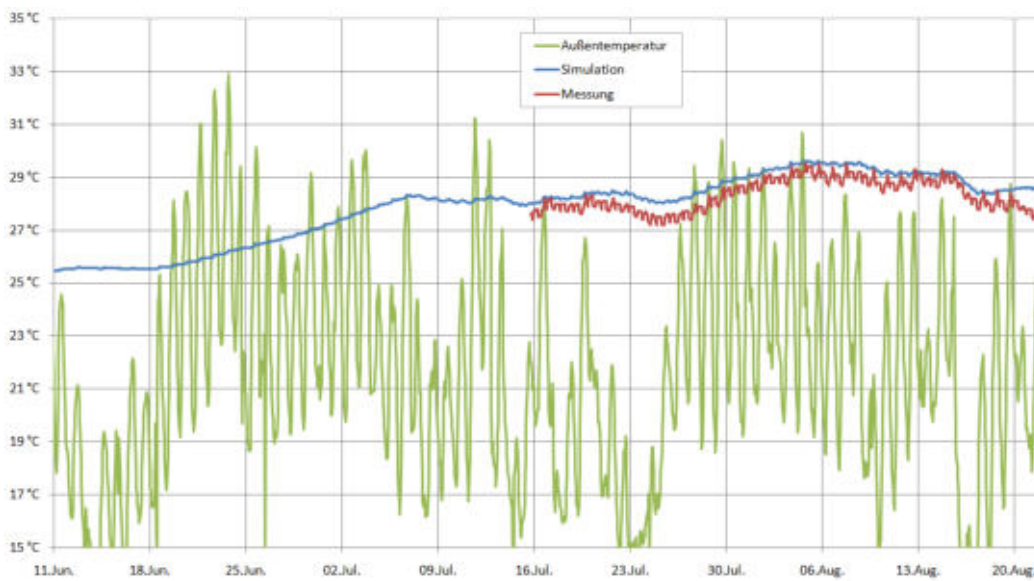


Abbildung 26: Vergleich der Simulation am erstellten 1-Zonen-Modell und der Messung der Raumtemperaturen im Badezimmer einer 3-Zimmer-Wohnung (Top B) im Passivhaus Kammelweg.

### 3.4 Vergleich unterschiedlicher Berechnungsweisen

Auf Basis des validierten Modells wurden zahlreiche Varianten einer Wohnung berechnet. Dabei wurde die Himmelsrichtung, die Bauweise, der Sonnenschutz, die Nachtlüftungsmöglichkeit variiert.

#### **Modell:**

Wohnung 6-Zonen Modell

#### **Variationen:**

Himmelsrichtung: Nord, West, Süd

Bauweise: leicht, mittelschwer, schwer, sehr schwer

Sonnenschutz:  $F_c=0.2, 0.5, 0.7, 1.0$

Nachtlüftung: Offene Türen, Offene Fenster, gekippte Fenster

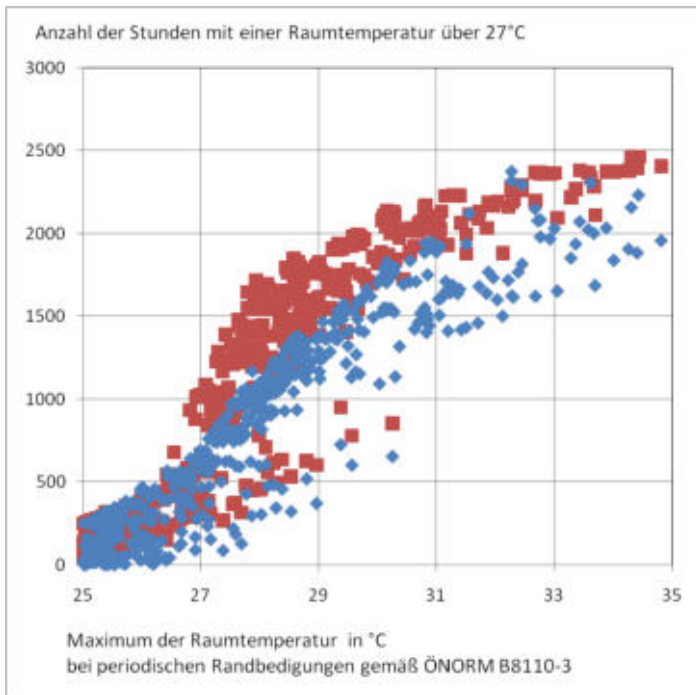
Variationen:  $3 \cdot 4 \cdot 4 \cdot 3 = 144$

Die Simulationen wurden für vier verschiedene Außenklimadatensätze durchgeführt:

- 1) Ganzjahressimulation mit einem Durchschnittsjahr
- 2) Ganzjahressimulation mit einer extremen Hitzeperiode im Sommer (Wien 2007)
- 3) Periodisches Außenklima gemäß ÖNORM B 8110-3
- 4) Periodisches Außenklima angepasst an Sommerperiode des Wiener Durchschnittsjahres

Der Vergleich der Ergebnisse zwischen den Simulationen mit einem periodischen Außenklima und den Ganzjahressimulationen ist in den folgenden Abbildungen dargestellt.

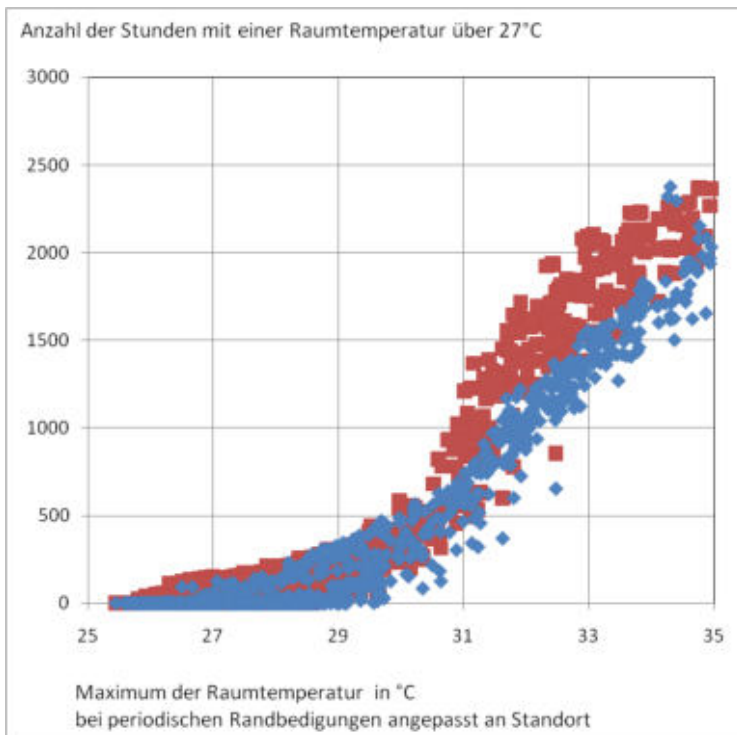
Aus dem Vergleich ist erkennbar, dass eine periodische Simulation durchaus geeignet ist, das thermische Verhalten von Räumen zu charakterisieren, wenn das periodische Außenklima vom Mittelwert und Tagesgang einen repräsentativen Verlauf hat. Die verbleibenden Abweichungen liegen im Zeitverhalten aufgrund von Speichervorgängen die über die 24h-Periode hinausgehen.



ROT = Jahr mit Hitzeperiode  
(Wien 2007)

BLAU= Durchschnittsjahr

Abbildung 27: Vergleich zwischen dem Ergebnis der Ganzjahressimulation und der Simulation mit dem periodischen Außenklima gemäß der aktuellen ÖNORM B 8110-3



ROT = Jahr mit Hitzeperiode  
(Wien 2007)

BLAU= Durchschnittsjahr

Abbildung 28: Vergleich zwischen dem Ergebnis der Ganzjahressimulation und der Simulation mit einem periodischen Außenklima, das an sommerliche Perioden in Wien angepasst ist.

## 3.5 Vorschlag zur Überarbeitung der ÖNORM B 8110-3

### 3.5.1 Einleitung

Die derzeit gültige ÖNORM B 8110-3: „Wärmeschutz im Hochbau. Wärmespeicherung und Sonneneinflüsse“ beinhaltet zwei Nachweisverfahren zur Vermeidung der sommerlichen Überwärmung von Räumen: den Nachweis über den Tagesverlauf der Raumtemperatur mit einem geeigneten Rechenprogramm und den Nachweis über die mindesterforderliche speicherwirksame Masse (= vereinfachter Nachweis). In dieser Norm gilt sommerliche Überwärmung als vermieden, wenn die empfundene Raumtemperatur während einer Hitzeperiode die Grenztemperatur von +27°C am Tage und +25°C in der Nacht nicht überschreitet.

Nach derzeit gültiger ÖNORM B 8110-3 werden im Nachweis über die mindesterforderliche speicherwirksame Masse (= vereinfachter Sommertauglichkeitsnachweis) für den Wohnbau nur jene inneren Wärmequellen berücksichtigt, die bei der Erstellung der Norm in dieses Berechnungsverfahren einbezogen wurden. Im Sinne der Normierung kann dieser Ansatz vertreten werden. Wenn der Bewertung der Sommertauglichkeit aber thermische Simulationen zugrundegelegt werden, sind innere Wärmequellen unbedingt zu berücksichtigen. Werden innere Lasten nicht in der Simulationsrechnung erfasst, werden die tatsächlich auftretenden Raumtemperaturen unterschätzt und es kann zu falschen Rückschlüssen auf das optimale Lüftungsverhalten kommen.

Der vereinfachte Nachweis nach ÖNORM B 8110-3 und die Simulation mit dem derzeitigen periodisch anzusetzendem Norm-Klima korrelieren gut, wenn innere Lasten in der Simulation berücksichtigt werden. Beim Vergleich des vereinfachten Nachweises mit den Ergebnissen aus Simulationen, denen der IWEC-Wetterdatensatz (= Testreferenzjahr) zugrundegelegt wurde, konnte keine Übereinstimmung festgestellt werden. Das Norm-Klima für die periodische Simulation ist also nicht repräsentativ für tatsächlich auftretende Temperaturverläufe. Um eine Vergleichbarkeit zwischen dem vereinfachten Nachweis und der Realität zu schaffen, ist es notwendig das periodische Klima in der ÖNORM B 8110-3 an das tatsächlich auftretende Klima anzupassen. Für Wien müsste dieser standortbezogene periodische Temperaturverlauf einen höheren Mittelwert und einen geringeren Tagesgang (= Durchschnittssommer) aufweisen.

## 3.5.2 Modellbildung

Im Folgenden sind die wesentlichen Teile des minimalen Modells zur Berechnung der sommerlichen Raumtemperaturen zusammengestellt.

Das Modell folgt den Vorgaben der EN ISO 13791 und EN ISO 13792.

### 3.5.2.1 Außenlufttemperatur

Das Außenklima wird durch die solare Einstrahlung, die Lufttemperatur und die Strahlungstemperatur des Himmels beschrieben. Näherungsweise wird die Strahlungstemperatur des Himmels der um 10 K verringerten Lufttemperatur gleichgesetzt.

Der Tagesmittelwert und die Tagesschwankung der Außenlufttemperatur ergeben sich aus der langjährigen Statistik der Lufttemperaturen für den Standort.

Mit der Herausgabe der ÖNORM B 8110-5 Beiblatt 2 und der Veröffentlichung der Datentabelle NAT13.xls auf der OIB Homepage ([www.oib.or.at](http://www.oib.or.at)) wurden für alle Katastralgemeinden in Abhängigkeit der Seehöhe der Tagesmittelwert der Außentemperatur zusammengestellt, der nur an 130 Tagen in 10 Jahren überschritten wird.

Im Bereich von städtischen Wärmeinseln ist neben einer Erhöhung des Tagesmittelwertes auch eine geringere Nachtauskühlung zu beobachten.

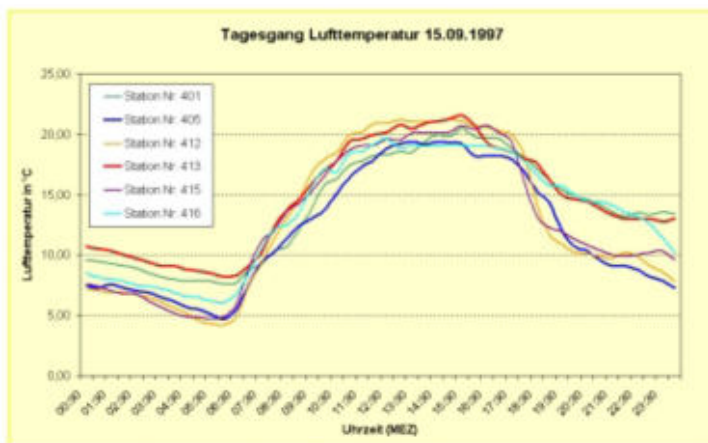


Abbildung 29: Beispiel einer maximalen Temperaturdifferenz zwischen den Stadtstationen und der Freilandstation Asten (15.9.1998) aus Mursch-Radlgruber, Erich et.al. ; 1999; Wärmeinsel Linz und belüftungsrelevante Strömungssysteme; Grüne Reihe Bericht Nr. 7/2002 Magistrat der Stadt Linz

Ein Vorschlag für die Abweichung der Lufttemperatur vom Tagesmittelwert der Außentemperatur ist in Abbildung 30 dargestellt. Außerhalb von städtischen Wärmeinseln kann eine Amplitude von 7 K (Tagesgang U) verwendet werden. Innerhalb von Wärmeinseln eine Amplitude von 5 K (Tagesgang I). Da der Wärmeinseleffekt von der Energiebilanz eines Gebietes abhängt steigt er mit der Siedlungsdichte bzw. Anzahl der Einwohner. Ein Vorschlag wäre es alle Gemeinden mit mehr als 10.000 Einwohner mit dem Tagesgang I und alle anderen mit dem Tagesgang U zu rechnen. Ein Liste aller Gemeinden mit mehr als 10.000 Einwohner ist unter [http://de.wikipedia.org/wiki/Liste\\_der\\_Städte\\_in\\_Österreich](http://de.wikipedia.org/wiki/Liste_der_Städte_in_Österreich) abrufbar.

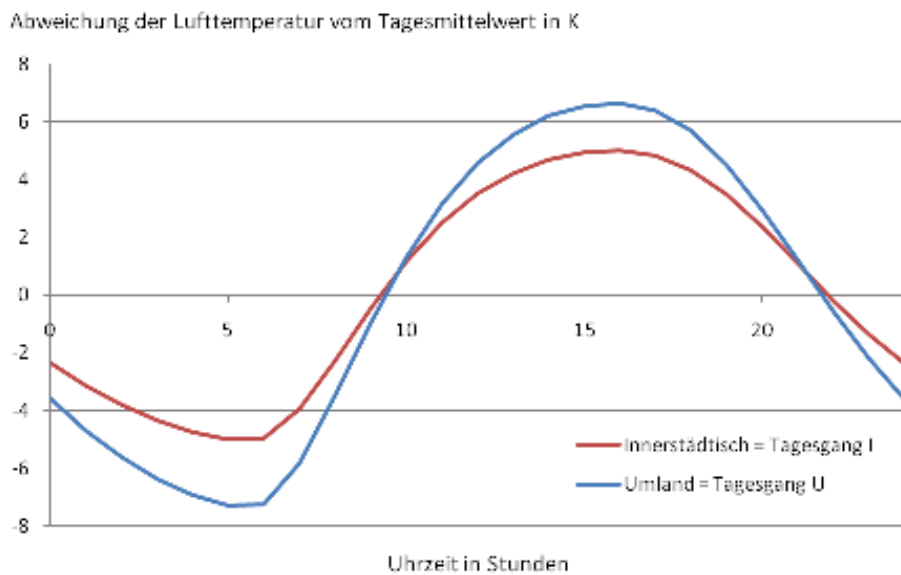


Abbildung 30: Tagesgang der Außentemperatur für städtische Gebiete (=Tagesgang I) und ländliche Umgebung (=Tagesgang U)



### 3.5.2.2 Solare Bestrahlungsstärke

Die Zusammenstellung der Formeln für die Berechnung der solaren Bestrahlungsstärke in diesem Kapitel wurde von Ao.Univ.Prof. DI Dr. Krec (Technische Universität Wien) gemacht.

Für einen isotropen Himmel kann die solare Einstrahlung für Standorte in Österreich näherungsweise durch folgende Formeln berechnet werden. Die Berechnung des Tagesverlaufs von Global- und Diffusstrahlung, berücksichtigt einerseits die Seehöhe des Standorts und andererseits erlauben sie die Berechnung solarer Bestrahlungsstärken auf beliebig orientierte Empfangselemente.

Als Ergebnis der Sonnenstandsberechnung liegt die Richtung zur Sonne zu den vollen Stunden des 15. Juli vor. Die Tabelle 1 zeigt die Komponenten des zur Sonne gerichteten Einheitsvektors zu den vollen Stunden des 15. Juli an einem Standort mit 15° geografischer Länge und 47° 30' geografischer Breite.

ANMERKUNG In ausreichender Näherung können die angegebenen Werte für beliebige Standorte innerhalb Österreichs verwendet werden.

Tabelle 1 : — Komponenten des Einheitsvektors zur Sonne am 15. Juli

$h$	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
$e_x$	-0.442	-0.265	-0.088	0.079	0.224	0.336	0.409	0.436	0.417	0.353	0.247	0.108	-0.056	-0.232	-0.41
$e_y$	0.892	0.929	0.903	0.816	0.673	0.484	0.262	0.023	-0.219	-0.445	-0.641	-0.793	-0.892	-0.929	-0.903
$e_z$	0.097	0.257	0.420	0.573	0.705	0.808	0.874	0.900	0.882	0.823	0.726	0.599	0.449	0.288	0.126

Die Orientierung der Empfangsfläche ist durch den Azimut  $\alpha$  und die Neigung  $\nu$  der nach außen orientierten Flächennormalen gegeben.

Die Komponenten des Einheitsvektors senkrecht zur Empfangsfläche sind gemäß Formel (1) zu berechnen.

$$n_x = -\cos \nu \cdot \cos \alpha$$

$$n_y = \cos \nu \cdot \sin \alpha \quad (1)$$

$$n_z = \sin \nu$$

Die Normalstrahlungsintensität außerhalb der Atmosphäre ergibt sich gemäß Formel (2) für den 15. Juli zu

$$S = 1322,4 \text{ in W/m}^2. \quad (2)$$

Die beim Durchgang durch die Atmosphäre geschwächte Normalstrahlungsintensität  $I(h)$  für die Stunde  $h$  des 15. Juli ergibt sich gemäß Formel (3)

$$I(h) = S \cdot e^{-\frac{T}{M(h)}} \quad (3)$$

wobei der Linke'sche Trübungsfaktor mit  $T = 4,5$  einzusetzen ist. Der Parameter  $M$  ist ein Maß für die zur Stunde  $h$  durchstrahlte Luftmasse und gemäß Formel (4) wird wie folgt berechnet:

$$M(h) = \frac{93807,6}{10000 - H} \cdot e_z(h) + 0,912018 \quad (4)$$

Es bedeutet:

$H$  Seehöhe des Standorts, in m

Die zur Stunde  $h$  auf die Empfangsfläche fallende solare Direktstrahlung  $B(h)$  ist gemäß Formel (5)

$$\begin{aligned} B(h) &= I(h) \cdot \cos \omega(h) \text{ für } \cos \omega(h) > 0 \text{ und} \\ B(h) &= 0 \text{ für } \cos \omega(h) \leq 0 \end{aligned} \quad (5)$$

zu berechnen, wobei der Cosinus des Winkels  $\omega$  zwischen der Richtung zur Sonne und der Flächennormale gemäß Formel (6)

$$\cos \omega(h) = e_x(h) \cdot n_x + e_y(h) \cdot n_y + e_z(h) \cdot n_z \quad (6)$$

zu berechnen ist.

ANMERKUNG Für Stunden, an denen sich  $\cos \omega(h) \leq 0$  ergibt, liegt die Empfangsfläche im Eigenschatten und wird somit nicht von direkter Sonneneinstrahlung getroffen.

Die zur Stunde  $h$  auf die Empfangsfläche fallende Himmelsstrahlung  $H(h)$  ist durch Formel (7)

$$H(h) = \kappa \cdot (S - I(h)) \cdot e_z(h) \cdot \frac{1 + n_z}{2} \quad (7)$$

gegeben, wobei für den Reitz'schen Trübungsfaktor  $\kappa = 0,333$  einzusetzen ist.

Die zur Stunde  $h$  auf die Empfangsfläche fallende terrestrische Reflexstrahlung  $R(h)$  ist durch Formel (8)

$$R(h) = \rho \cdot (I(h) + \kappa(S - I(h))) \cdot e_z(h) \cdot \frac{1 - n_z}{2} \quad (8)$$

gegeben, wobei für die Reflexionszahl der terrestrischen Umgebung  $\rho = 0,2$  einzusetzen ist.

Die zur Stunde  $h$  auf die Empfangsfläche fallende Diffusstrahlung  $D(h)$  ist durch die Summe aus Himmelsstrahlung und terrestrischer Reflexstrahlung gemäß Formel (9) gegeben:

$$D(h) = H(h) + R(h) \quad (9)$$

Die Globalstrahlung  $G(h)$  wird als Summe aus Direktstrahlung und Diffusstrahlung gemäß Formel (10) ermittelt.

$$G(h) = B(h) + D(h) = B(h) + H(h) + R(h) \quad (10)$$

Die von Herstellern angegebenen Strahlungstransmissionsgrade sind für senkrecht auf die Scheibe auftreffende Sonnenstrahlung definiert. Bei schrägem Strahlungseinfall wird der Strahlungstransmissionsgrad kleiner. Dieser Effekt ist bei der Berechnung der operativen Temperatur im Raum zu berücksichtigen.

Die Abhängigkeit des Reduktionsfaktors für den Strahlungstransmissionsgrad  $r_B(\omega)$  lässt sich für die einfallende Direktstrahlung gemäß Formel (11)

$$r_B(\omega) = \frac{\tau_s(\omega)}{\tau_s(0)} = 1 - (1 - \cos \omega)^\varepsilon \quad (11)$$

darstellen. Der Einfallswinkel  $\omega$  ist der Winkel zwischen der nach außen orientierten Flächennormale der betrachteten Glasscheibe und der Richtung zur Sonne. Durch den Exponenten  $\varepsilon$  wird die Reduktion des Strahlungstransmissionsgrades in Abhängigkeit von der vorliegenden Glasart bestimmt. Dieser Faktor kann aus dem winkelabhängigen g-Wert Angaben von Herstellern abgeleitet werden. Typische Werte sind in der folgenden Tabelle zusammengestellt.

Tabelle 2: — Beispielhafte Exponenten zur Reduktion des Strahlungstransmissionsgrades

Glasart und Bezeichnung	Wärmedurchgangskoeffizient $U_g$ in $W/m^2$	Lichttransmissionsgrad $\tau$	Gesamtenergiedurchlassgrad $g^b$	Exponent
Einfachglas <sup>c</sup>	5,8	0,90	0,87	3,1
Doppelverglasung <sup>c</sup>	2,8	0,80	0,75	2,3
2-fach-Isolierglas	1,1	0,70	0,60	2,5
3-fach-Isolierglas	0,7	0,70	0,48	1,5
3-fach-Isolierglas	0,5	0,70	0,48	1,5
Sonnenschutzglas	1,1	0,68	0,35	3,0
Sonnenschutzglas	1,1	0,50	0,25	3,9

Für die Diffusstrahlung ergibt sich der Reduktionsfaktor  $r_D(\omega)$  zu

$$r_D(\omega) = \frac{\varepsilon \cdot (\varepsilon + 3)}{(\varepsilon + 1) \cdot (\varepsilon + 2)} \quad (12)$$

Ergänzend zur Berechnung der solaren Einstrahlung aufgrund Sonnenstand und Flächenorientierung können sowohl der lokale Horizont als auch auskragende Bauteile bei der Ermittlung der solaren Bestrahlungsstärke gemäß ÖNORM EN ISO 13791 berücksichtigt werden.

### 3.5.2.3 Bauteile

Für opake Außenbauteile muss die Orientierung und Neigung, der Absorptionsgrad für Solarstrahlung, der Bauteilaufbau und die Fläche berücksichtigt werden. Wenn bei einer Konstruktion eine Vorsatzschale mit Hinterlüftung ausgeführt wird, ist der Absorptionsgrad für solare Strahlung nur 20% des Wertes ohne Hinterlüftung.

Für Verglasungen ist Orientierung, Neigung, Ug-Wert, g-Wert, Exponent der Winkelabhängigkeit des g-Wertes, und die Fläche zu berücksichtigen.

Innenbauteile werden durch ihren Bauteilaufbau und die Fläche berücksichtigt.

Die Wärmekapazität der Einrichtung wird berücksichtigt.

### 3.5.2.4 Innere Lasten

Die inneren Lasten werden für jede Stunde des Tages als konstant berücksichtigt.

Da die Berechnung auch für einzelne Räume in einer Wohnung durchgeführt werden kann, werden die inneren Lasten für Personen und Geräte den Aufenthaltsräumen zugeordnet. Die Aufenthaltsräume sind typischerweise 65 % der Wohnnutzfläche. Die anzunehmende Personenzahl orientiert sich an der durchschnittlichen Belegung von Wohnungen. d.h. 36 m<sup>2</sup> Nutzfläche/Person. mit 90 % Anwesenheit.

Tabelle 3: Innere Lasten für verschiedenen Haushaltsgrößen

	Haushaltsgröße			
	1 Person	2 Personen	3 Personen	4 Personen
Personen in W/m <sup>2</sup>	2,2	3,1	3,1	3,1
Geräte in kWh/a	1529	1933	2496	2813
Geräte in W/m <sup>2</sup>	5,4	4,7	4,1	3,4

Für Personen werden im Mittel 2,9 W/m<sup>2</sup> und für Geräte 4,5 W/m<sup>2</sup> angenommen.

Näherungsweise werden 50 % als konvektive und 50 % als Strahlungslast angesetzt.

Der solare Eintrag über Verglasungen berücksichtigt die Bestrahlungsstärke außen, den g-Wert der Verglasung, den Sonnenschutz (Fc) und die Fläche der Verglasung.

Der gesamte solare Wärmeeintrag wird zu 10% als konvektiver und zu 90% als Strahlungslast angesetzt.

### 3.5.2.5 Luftströmungen

Der Luftströmung über geöffnete Fenster o.ä. wird in Abhängigkeit der Öffnungsfläche und der Öffnungshöhe berücksichtigt. Das hier dargestellte Modell basiert nur auf dem thermisch induzierten Luftwechsel. Winddruck wird nicht berücksichtigt. Der ermittelte Luftwechsel liegt damit auf der sicheren Seite.

$$\dot{V} = 0,5 * 100 \frac{\text{m}^{0,5}}{\text{h} \cdot \text{K}^{0,5}} \cdot A \cdot \sqrt{H} \cdot \sqrt{\Delta T}$$

(13)

Der Faktor 0,5 wird empfohlen um mit dem errechneten Luftvolumenstrom auf der sicheren Seite zu bleiben. Strömungswiderstände wie Insektenschutzgitter oder Vorhänge werden nicht berücksichtigt. Der Insektenschutz sollte aus thermischen Gründen direkt um das Bett herum erfolgen.

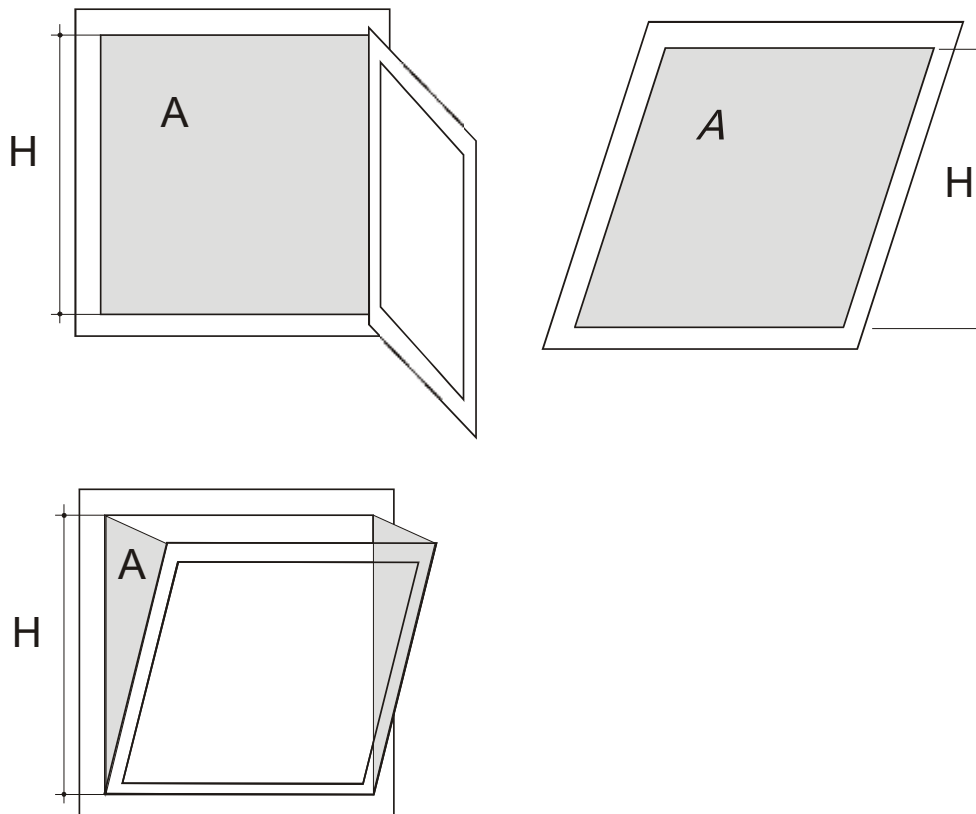


Abbildung 31: Definition von A und H für verschiedene Konfigurationen von öffnbaren FensterTüren

Ob bei der Berechnung offene Fenster angenommen werden dürfen, ist die Entscheidung des Auftraggebers für die Berechnung. Bei der Entscheidung müssen eine Reihe von Aspekten für die konkrete Situation beachtet werden:

Einbruchschutz,

Schutz vor Insekten und anderen Tieren

Absturzsicherung der BewohnerInnen, besonders Kleinkinder

Schlagregen, Sturm, ...

### 3.5.2.6 Darstellung des Rechenmodells als Netzwerk

Im Folgenden wird zur Darstellung der Berechnung des Wärmestroms in ein Bauteil eine effektive Temperatur verwendet. Dies ist möglich, da das Modell keine Nichtlinearitäten bei den Parametern berücksichtigt.

$$T_{\text{eff\_KIS}} = T_a + \frac{1}{h_c + h_r} \cdot (q_{\text{sol}} \cdot a_{\text{sol}} + h_r \cdot (T_r - T_a))$$

(14)

$$T_{\text{eff\_KI}} = T_a + \frac{h_r}{h_c + h_r} \cdot (T_r - T_a)$$

(15)

$T_a$  Lufttemperatur in °C

$T_r$  Strahlungstemperatur des Himmels in °C

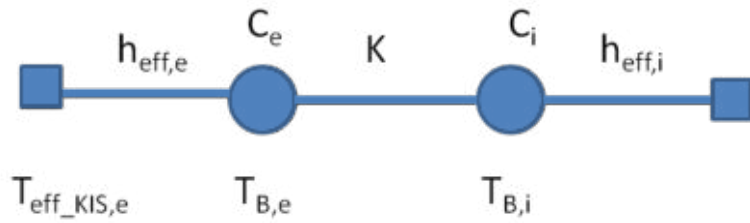
$h_c$  Konvektiver Übergangskoeffizient in W/m<sup>2</sup>K

$h_r$  Strahlungsübergangskoeffizient in W/m<sup>2</sup>K

$q_{\text{sol}}$  Solare Einstrahlung in W/m<sup>2</sup>

$a_{\text{sol}}$  Absorptionsgrad für Solarstrahlung

Außenbauteile:

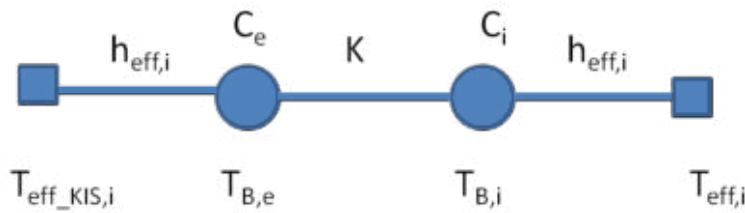


$h_{eff,e}$	Übergangskoeffizient
$T_{eff}$	effektive Temperatur
C	Wirksame Wärmekapazität für 24h-Periode
$T_B$	Oberflächentemperatur
K	Leitwert

$h_{c,e} = 25 \text{ W/m}^2\text{K}$ ,  $h_{r,e} = 5 \text{ W/m}^2\text{K}$ ,

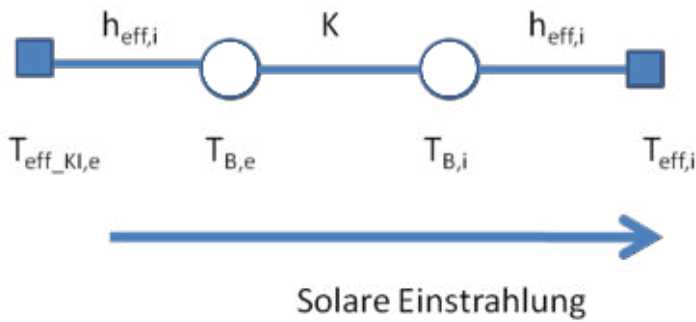
- $h_{c,i} = 2.5 \text{ W/m}^2\text{K}$  für horizontalen Wärmestrom
- $h_{c,i} = 1.0 \text{ W/m}^2\text{K}$  für Wärmestrom abwärts
- $h_{c,i} = 5.0 \text{ W/m}^2\text{K}$  für Wärmestrom aufwärts
- $h_{r,i} = 5 \text{ W/m}^2\text{K}$

Innenbauteile:



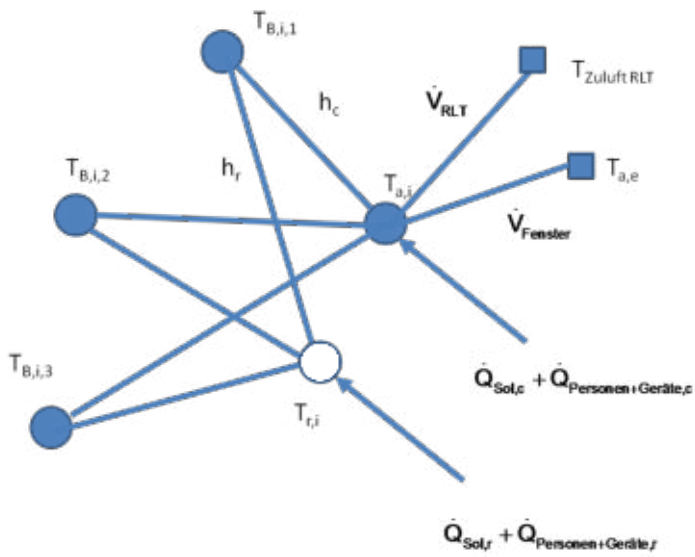
$h_{eff,e}$	Übergangskoeffizient
$T_{eff}$	effektive Temperatur
C	Wirksame Wärmekapazität für 24h-Periode
$T_B$	Oberflächentemperatur
K	Leitwert

Fenster:



$h_{eff,e}$	Übergangskoeffizient
$T_{eff}$	effektive Temperatur
C	Wirksame Wärmekapazität für 24h-Periode
$T_B$	Oberflächentemperatur
K	Leitwert

Raum:



- h Übergangskoeffizient
- $T_a$  Lufttemperatur
- $T_r$  Strahlungstemperatur
- $T_{Zulft}$  Zulufttemperatur Raumluftechnik
- $T_B$  Oberflächentemperatur
- $\dot{Q}_{Sol}$  Wärmeeintrag durch Sonne
- $\dot{Q}_{Personen+Geräte}$  Wärmeeintrag durch Personen und Geräte
- $\dot{V}_{RLT}$  Volumenstrom RLT
- c...konvektiv
- r...radiativ
- e..Außenumgebung



### 3.5.3 Umsetzung in Excel-Tool

#### 3.5.3.1 Übersicht

Aus den oben genannten Gründen, wurde für die Diskussion im Rahmen des ÖNORM Arbeitsgremiums ON AG 175-01 ein Software-Tool als Prototyp für Bauphysiksoftware entwickelt. Das Tool basiert auf Microsoft Excel. Mit Hilfe der Excel-Tabellenblätter werden die relevanten Eingabeparameter eingegeben und über ein Makro (ausführbare VBA-Befehle innerhalb von Excel) eine dynamische Berechnung der sommerlichen Raumtemperatur im untersuchten Raum durchgeführt. In der aktuellen Version des Excel-Tools kann ein quaderförmiger Raum eingegeben.

Tabelle 4: Eingabeparameter für das neuentwickelte Excel-Tool für den vereinfachten Nachweis der sommerlichen Überwärmung von Räumen.

Eingabeparameter	
Eigenschaften der umgrenzenden Bauteile des Raumes, sowie der Innenwände	<ul style="list-style-type: none"><li>• Schichtenaufbau</li><li>• Schichtdicke</li><li>• Wärmeleitfähigkeit</li><li>• spezifische Wärmekapazität</li><li>• Dichte</li><li>• Flächen</li><li>• Orientierung</li></ul>
Strahlungseigenschaften der Außenbauteile	<ul style="list-style-type: none"><li>• Strahlungsabsorptionsgrad der Außenoberflächen</li></ul>
Eigenschaften der Fenster	<ul style="list-style-type: none"><li>• Größe</li><li>• offenbar/nicht offenbar</li><li>• wärme- und strahlungstechnische Eigenschaften der Verglasung und des Rahmens</li><li>• Strahlungstechnische Eigenschaften und Position des Sonnenschutzes</li></ul>
Klima	<ul style="list-style-type: none"><li>• Seehöhe</li><li>• Tagesmittelwert des Standortklimas (Sommer)</li><li>• Tagesgang (innerstädtisch / Umland)</li></ul>
Innere Lasten	<ul style="list-style-type: none"><li>• Wärmeeintrag durch Personen und Geräte in Watt (Tagesverlauf)</li></ul>
Lüftung	<ul style="list-style-type: none"><li>• hygienische Luftwechsel mit Außenluft oder über Lüftungsanlage</li><li>• mögliche nächtliche Fensteröffnung (OFFEN, 10cmGEKIPPT, ZU)</li><li>• Luftwechsel der Lüftungsanlage</li></ul>

Nach Eingabe der einzelnen Parameter wird durch das Anklicken des „Start“-Knopfes das einprogrammierte Makro ausgeführt und die Ergebnisse (Raumtemperatur, Außentemperatur, Oberflächentemperaturen der Bauteile und einige andere Parameter) grafisch und tabellarisch zusammengefasst. Zusätzlich wird derzeit in einem gesonderten Tabellenblatt der vereinfachte Nachweis der sommerlichen Überwärmung nach der aktuellen ÖNORM B 8110-3 (mit der Annahme  $n = 1,5 \text{ h}^{-1}$  für den Fensterluftwechsel) ausgewiesen.

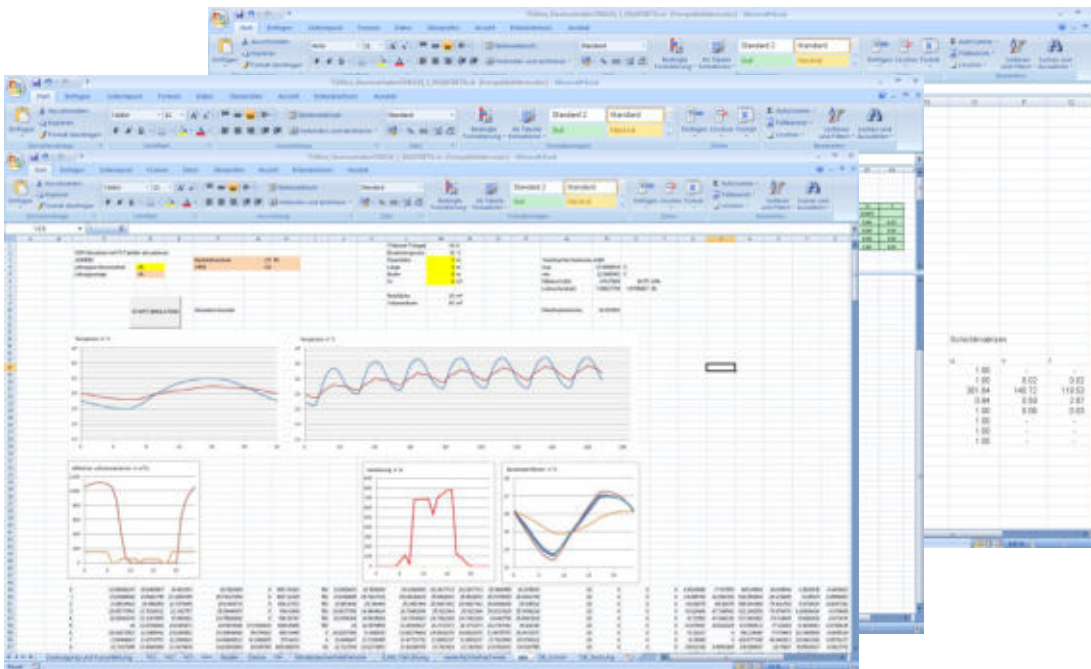


Abbildung 32: Screenshots des neuentwickelten Excel-Tools für den vereinfachten Nachweis der sommerlichen Überwärmung von Räumen.

### 3.5.4 Sommerliche Raumtemperaturen bei verschiedenen Bauweisen

Mit dem neuentwickelten Excel-Tool wurden verschiedene Bauweisen untersucht und verglichen. In den folgenden Abbildungen sieht man anhand eines typischen Raumes den Vergleich der Bauweise in Abhängigkeit der Inneren Lasten (Büro bzw. Wohnraum), der nächtlichen Fensterlüftung (Fenster offen bzw. geschlossen) und Verschattung.

Im Falle einer Wohnungsnutzung stellt diese Raumgröße ein Zimmer dar. Für die folgenden Abbildungen wurde der Raum als Wohnraum abgebildet mit einer Nutzungszeit von 06:00-21:00 und einem Tagesmittelwert der durch Personen und Geräte eingebrachten Wärmeleistung von  $4.5 \text{ W/m}^2$ .

Im Falle einer Büronutzung wurde für die folgenden Fälle ein Arbeitsplatz mit einer Nutzungszeit von 08:00 bis 17:00 mit einer Wärmeleistung durch Geräte von  $250 \text{ W}$  angenommen.

Folgende Annahmen wurden für alle Varianten gleich gewählt:

- Quaderförmiger Raum:  $4 \text{ m} \times 5 \text{ m} \times 3 \text{ m}$  (Breite x Tiefe x Höhe)
- Keine Innenwände; eine Trennwand war immer mit einer Gipskartonvorsatzschale versehen, die anderen Trennwände hatten je nach Bauweise folgende Aufbauten:

Leichtbau:	Doppelt beplankter Holzrahmenbau
Ziegelbau:	Innenwand 25cm Hochlochziegel, Außenwand 38cm Hochlochziegel +12 cm WDVS
Stahlbetonbau:	Innenwand 12cm Stahlbeton, Außenwand 18cm Stahlbeton +25 cm WDVS

- 1 Fenster:  $1,5\text{m} \times 1,5\text{m}$ ,  $U_g = 1,1 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ ,  $U_f = 1,5 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ ,  $\Psi = 0,05 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ ,  $g = 0,47$   
Ausrichtung nach Süden
- Lüftungsanlage vorhanden, Wärmerückgewinnungsgrad = 0,80  
Lüftung auch bei Abwesenheit  
Nachtluftwechsel über Lüftungsanlage  $n = 2,5 \text{ 1/h}$
- Seehöhe  $h = 220\text{m}$
- Innerstädtisches Klima mit einem Temperaturmittelwert  $T_{\text{mittel}} = 25^\circ\text{C}$

Nachts offene Fenster, tagsüber nur hygienischer Luftwechsel über Fenster,  
 Außenverschattung mit  $z = 0,16$ :

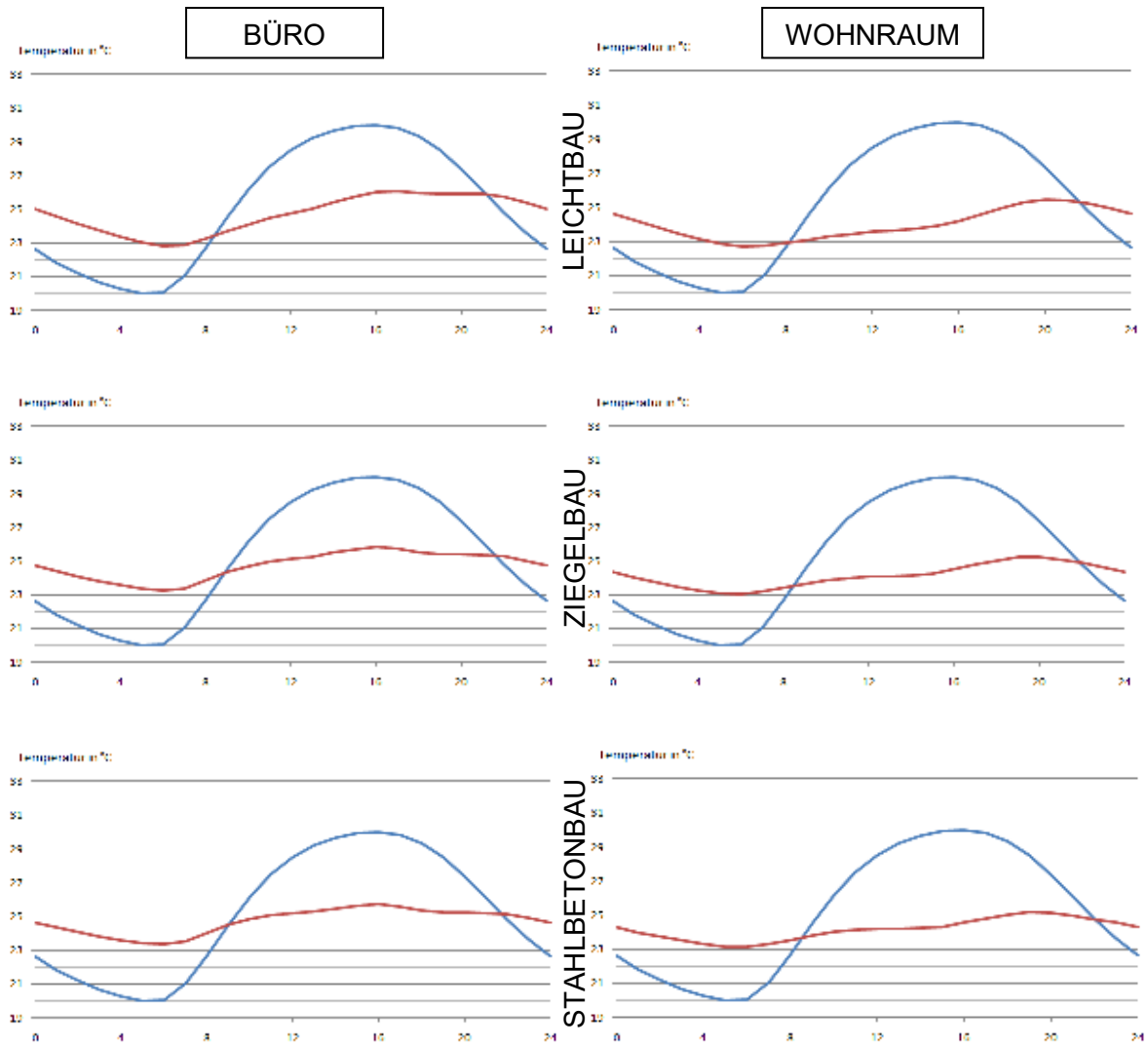


Abbildung 33: Vergleich der sommerlichen Raumtemperatur des beispielhaft gewählten Raumes in Abhängigkeit der verschiedenen Bauweisen (Leichtbau, Ziegelbau, Stahlbetonbau) in Abhängigkeit der Inneren Lasten (Bürobau bzw. Wohnbau) bei offenen Fenstern. Blaue Kurve: Außentemperatur. Rote Kurve: Operative Raumtemperatur.

Nachts geschlossene Fenster, tagsüber nur hygienischer Luftwechsel über Fenster  
 Außenverschattung mit  $z = 0,16$ :

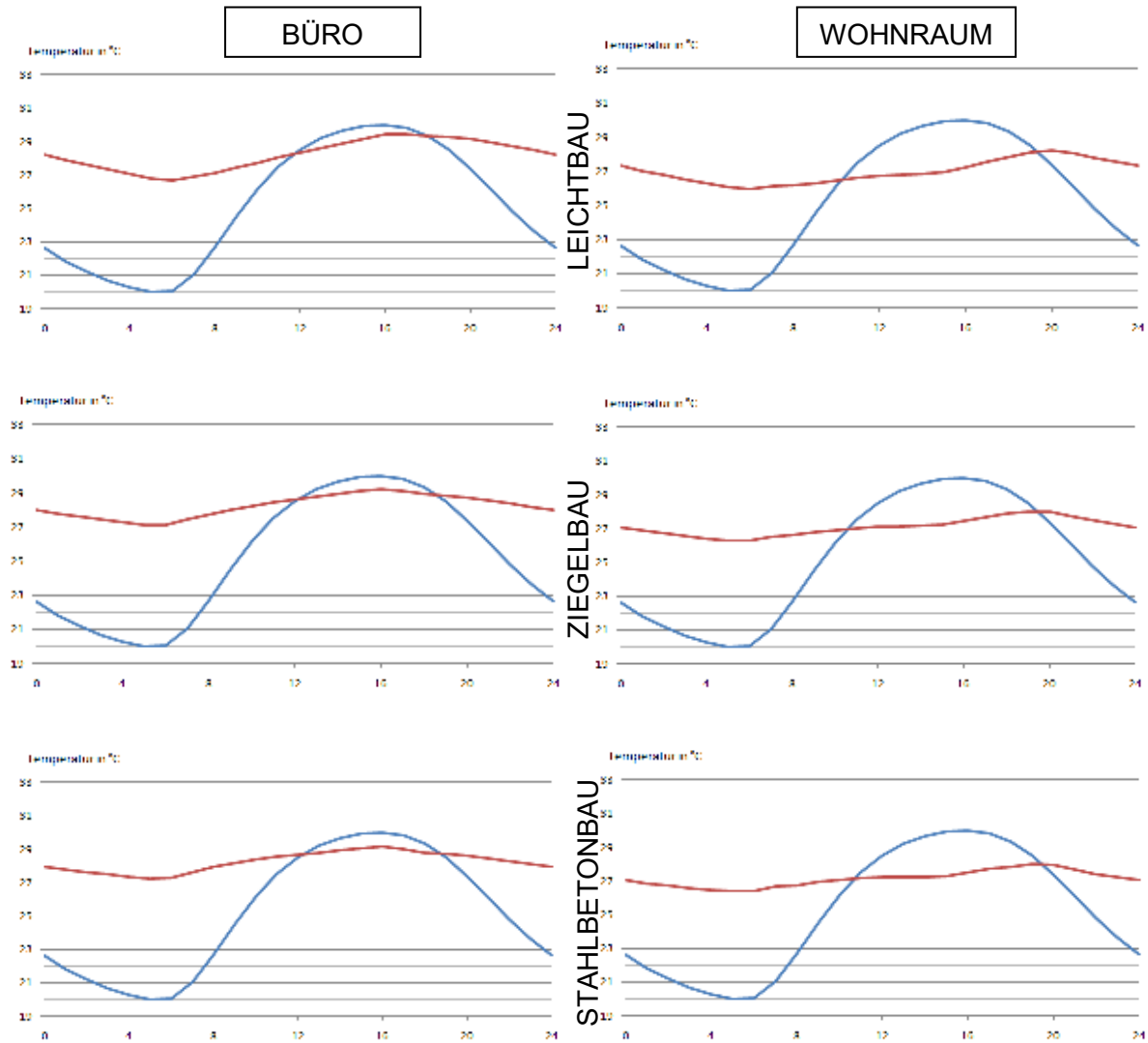


Abbildung 34: Vergleich der sommerlichen Raumtemperatur des beispielhaft gewählten Raumes in Abhängigkeit der verschiedenen Bauweisen (Leichtbau, Ziegelbau, Stahlbetonbau) in Abhängigkeit der Inneren Lasten (Bürobau bzw. Wohnbau) bei geschlossenen Fenstern. Blaue Kurve: Außentemperatur. Rote Kurve: Operative Raumtemperatur.

Nachts offene Fenster, tagsüber nur hygienischer Luftwechsel über Fenster, ohne Verschattungsmaßnahmen:

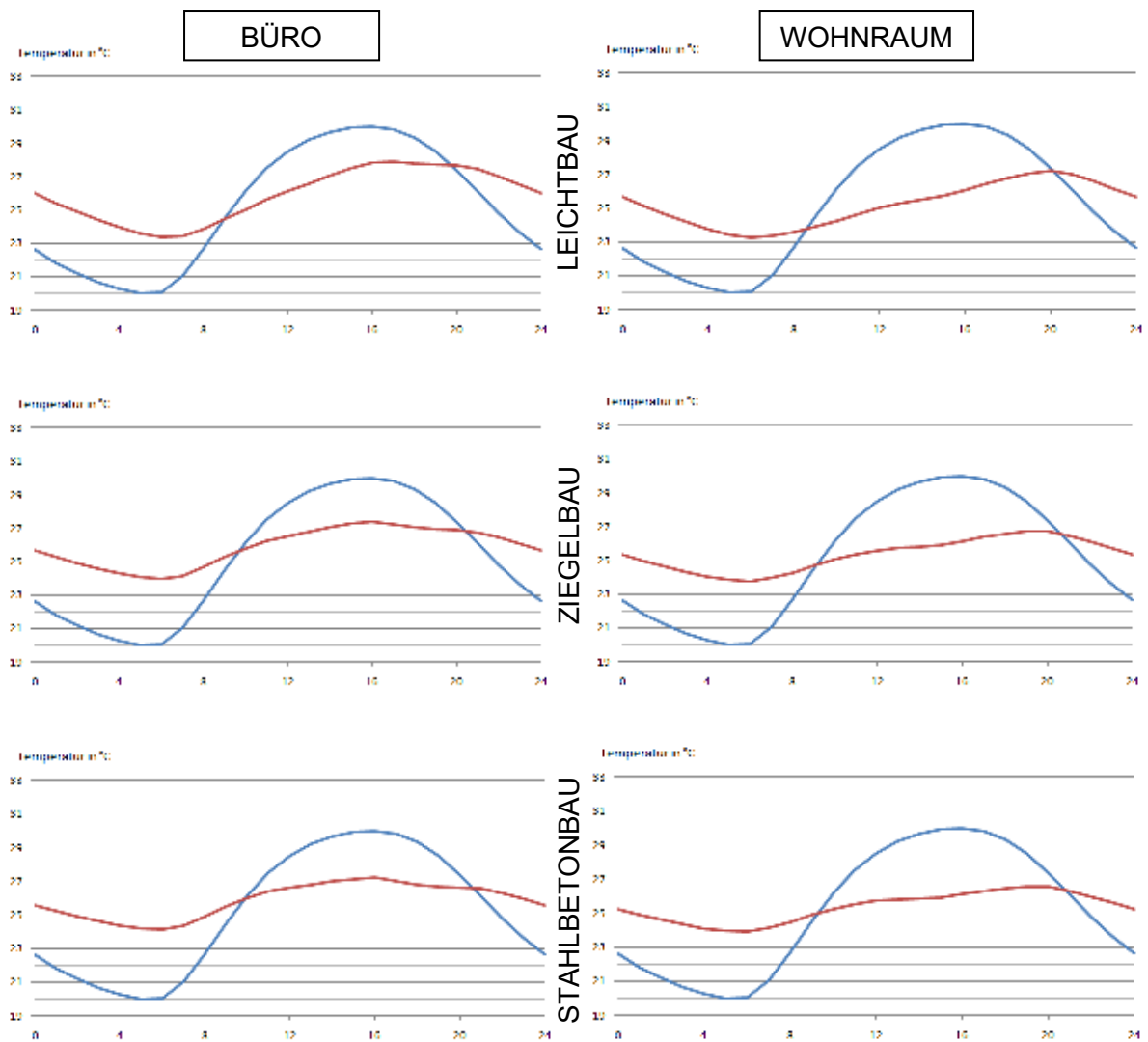


Abbildung 35: Vergleich der sommerlichen Raumtemperatur des beispielhaft gewählten Raumes in Abhängigkeit der verschiedenen Bauweisen (Leichtbau, Ziegelbau, Stahlbetonbau) in Abhängigkeit der Inneren Lasten (Bürobau bzw. Wohnbau) bei offenen Fenstern. Blaue Kurve: Außentemperatur. Rote Kurve: Operative Raumtemperatur.

Nachts geschlossene Fenster, tagsüber nur hygienischer Luftwechsel über Fenster, ohne Verschattungsmaßnahmen:

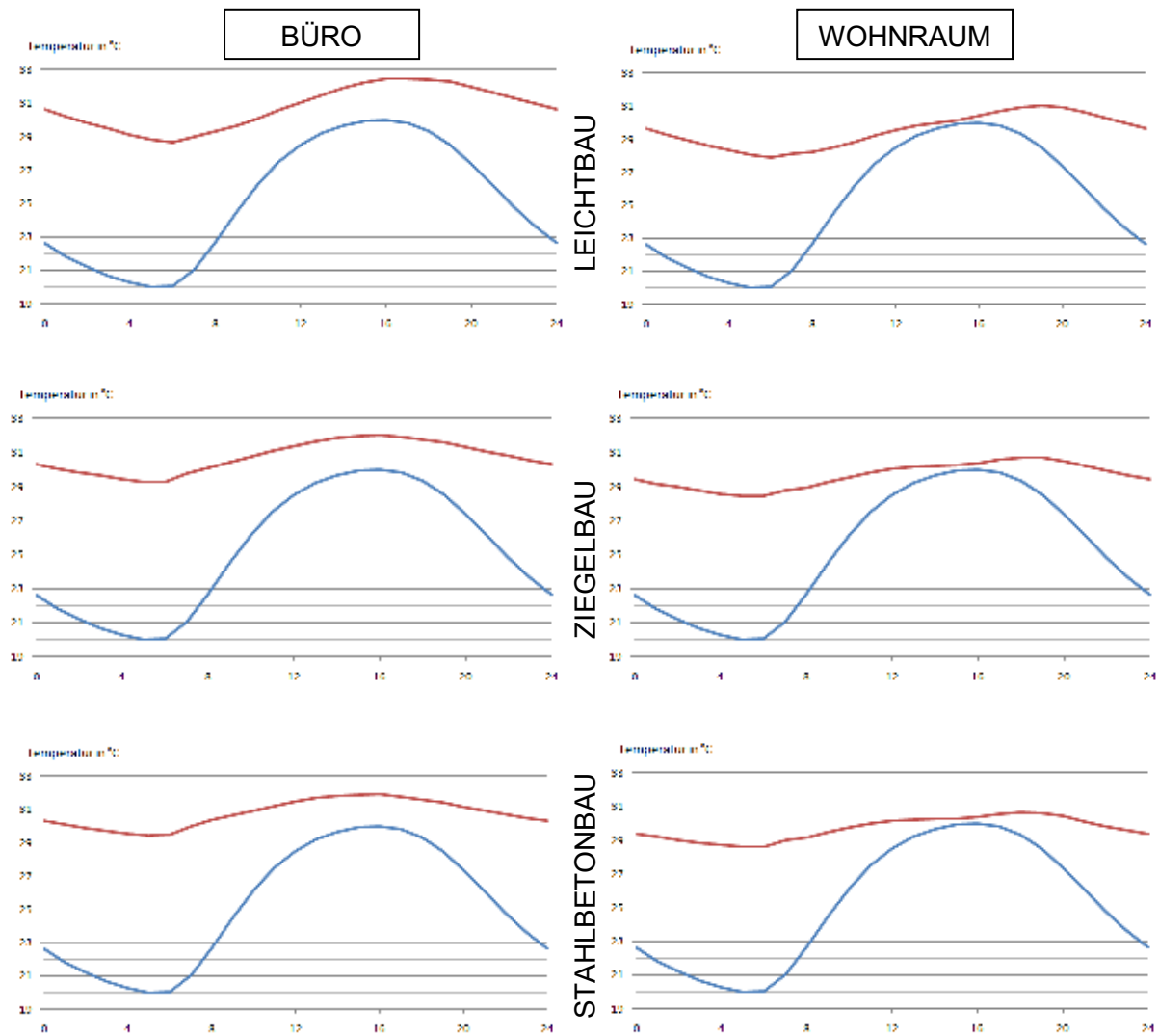


Abbildung 36: Vergleich der sommerlichen Raumtemperatur des beispielhaft gewählten Raumes in Abhängigkeit der verschiedenen Bauweisen (Leichtbau, Ziegelbau, Stahlbetonbau) in Abhängigkeit der Inneren Lasten (Bürobau bzw. Wohnbau) bei geschlossenen Fenstern. Blaue Kurve: Außentemperatur. Rote Kurve: Operative Raumtemperatur.

In den folgenden Abbildungen sind die Stufenantworten der sommerlichen Raumtemperaturen der oben beschriebenen Varianten des untersuchten beispielhaften Raumes dargestellt.

Nachts offene Fenster,  
tagsüber nur hygienischer Luftwechsel über Fenster  
Außenverschattung mit  $z = 0,16$ :

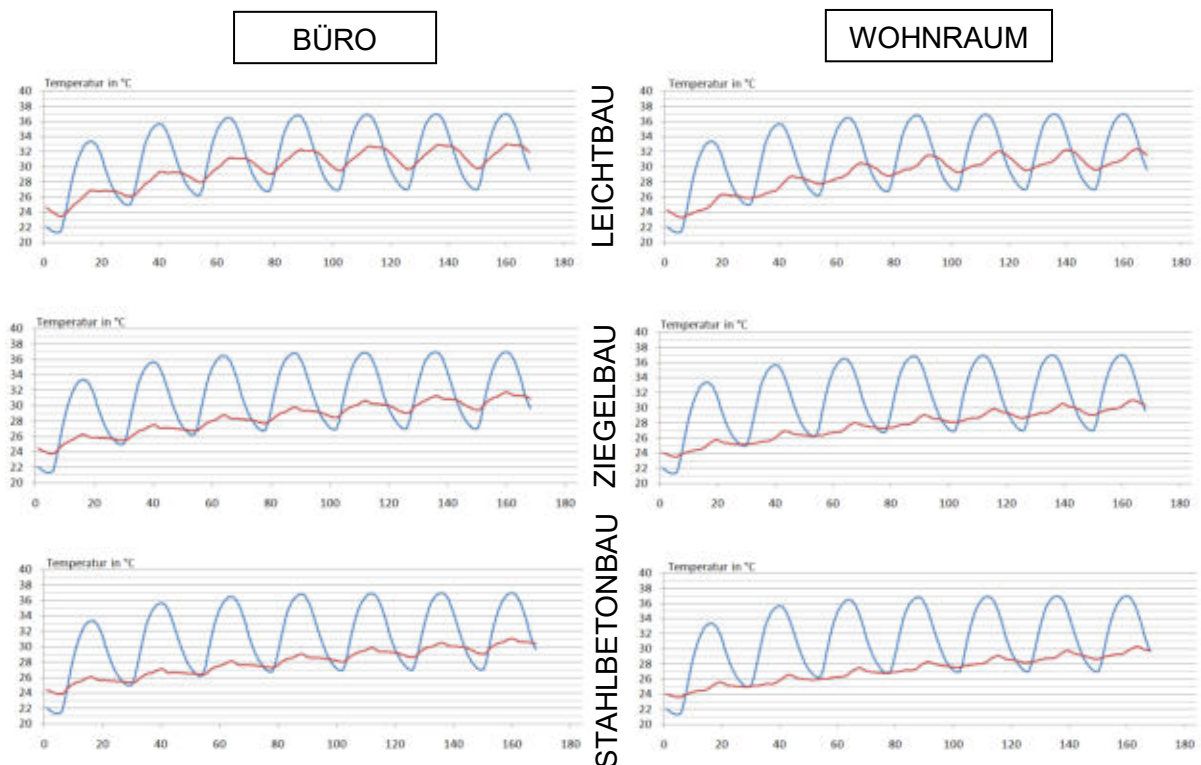


Abbildung 37: Vergleich Stufenantworten des beispielhaft gewählten Raumes in Abhängigkeit der verschiedenen Bauweisen (Leichtbau, Ziegelbau, Stahlbetonbau) in Abhängigkeit der Inneren Lasten (Bürobau bzw. Wohnbau) mit Außenverschattung und Nachtlüftung. Blaue Kurve: Außentemperatur. Rote Kurve: Operative Raumtemperatur.



Nachts geschlossene Fenster,  
 tagsüber nur hygienischer Luftwechsel über Fenster,  
 Außenverschattung mit  $z = 0,16$ :

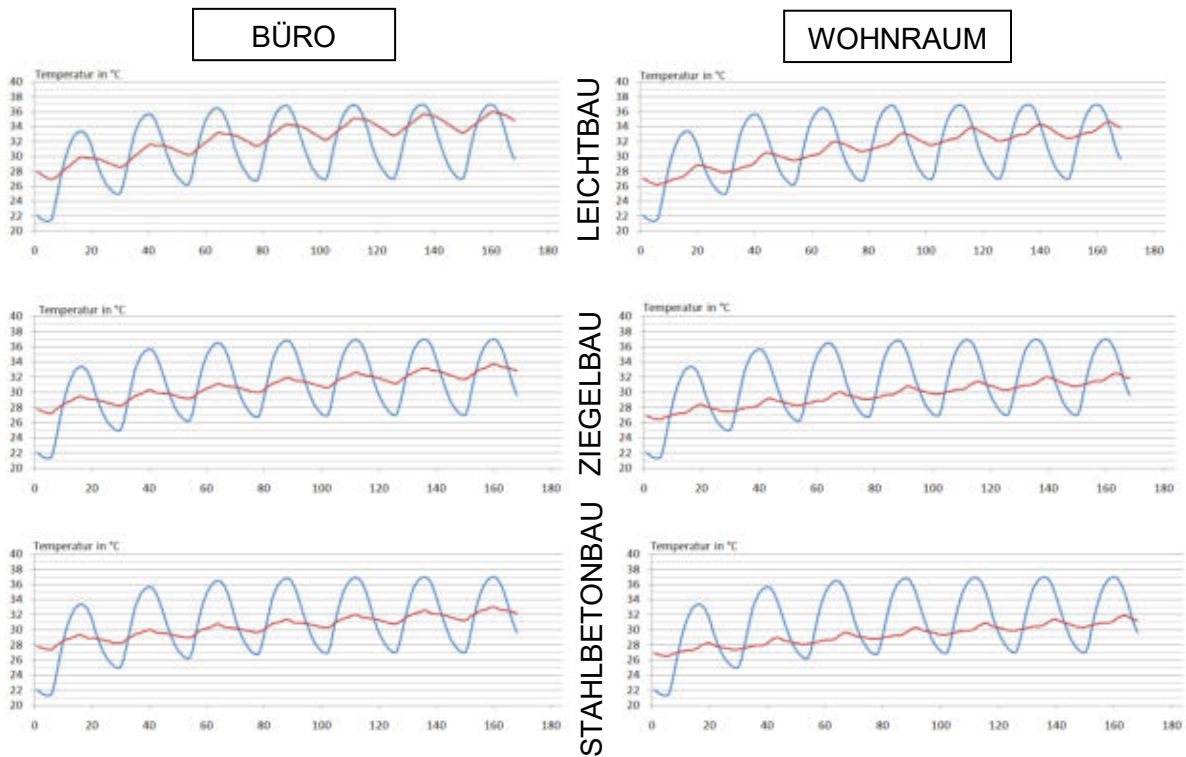


Abbildung 38: Vergleich Stufenantworten des beispielhaft gewählten Raumes in Abhängigkeit der verschiedenen Bauweisen (Leichtbau, Ziegelbau, Stahlbetonbau) in Abhängigkeit der Inneren Lasten (Bürobau bzw. Wohnbau) mit Außenverschattung ohne Nachtlüftung. Blaue Kurve: Außentemperatur. Rote Kurve: Operative Raumtemperatur.

Nachts offene Fenster,  
tagsüber nur hygienischer Luftwechsel über Fenster,  
ohne Verschattungsmaßnahmen:

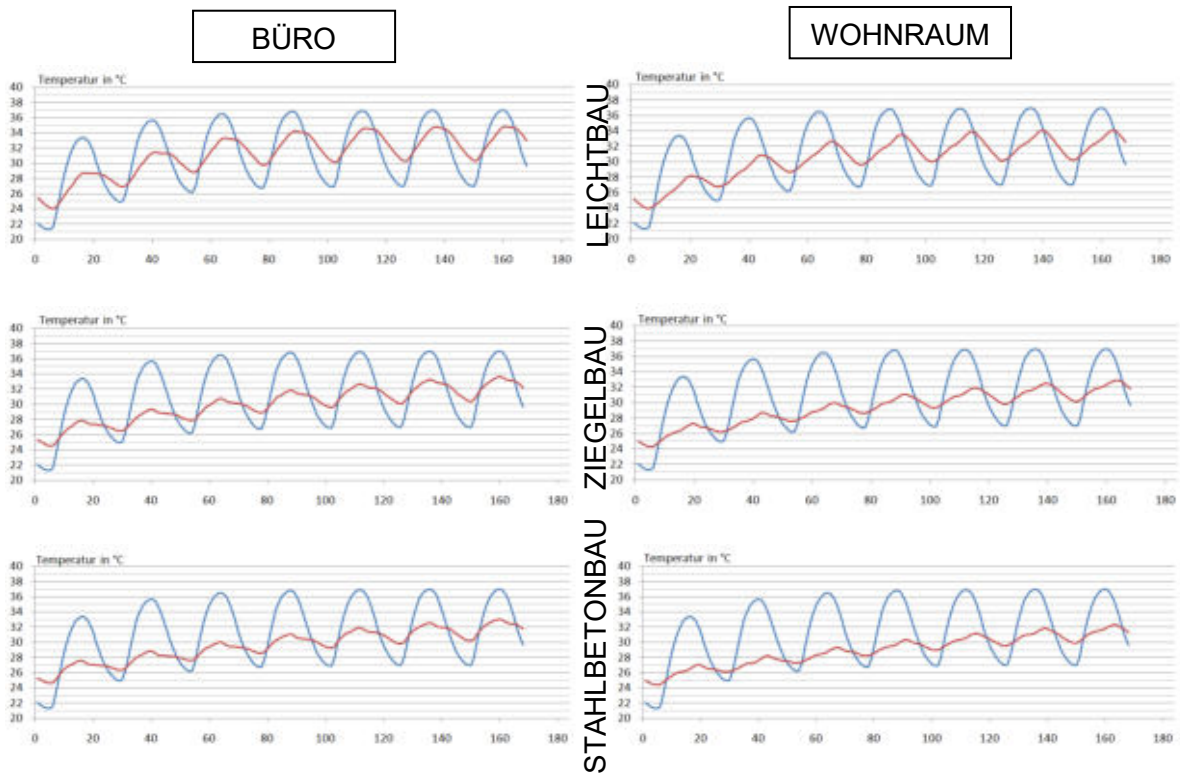


Abbildung 39: Vergleich Stufenantworten des beispielhaft gewählten Raumes in Abhängigkeit der verschiedenen Bauweisen (Leichtbau, Ziegelbau, Stahlbetonbau) in Abhängigkeit der Inneren Lasten (Bürobau bzw. Wohnbau) ohne Außenverschattung mit Nachtlüftung. Blaue Kurve: Außentemperatur. Rote Kurve: Operative Raumtemperatur.

Nachts geschlossene Fenster,  
tagsüber nur hygienischer Luftwechsel über Fenster,  
ohne Verschattungsmaßnahmen:

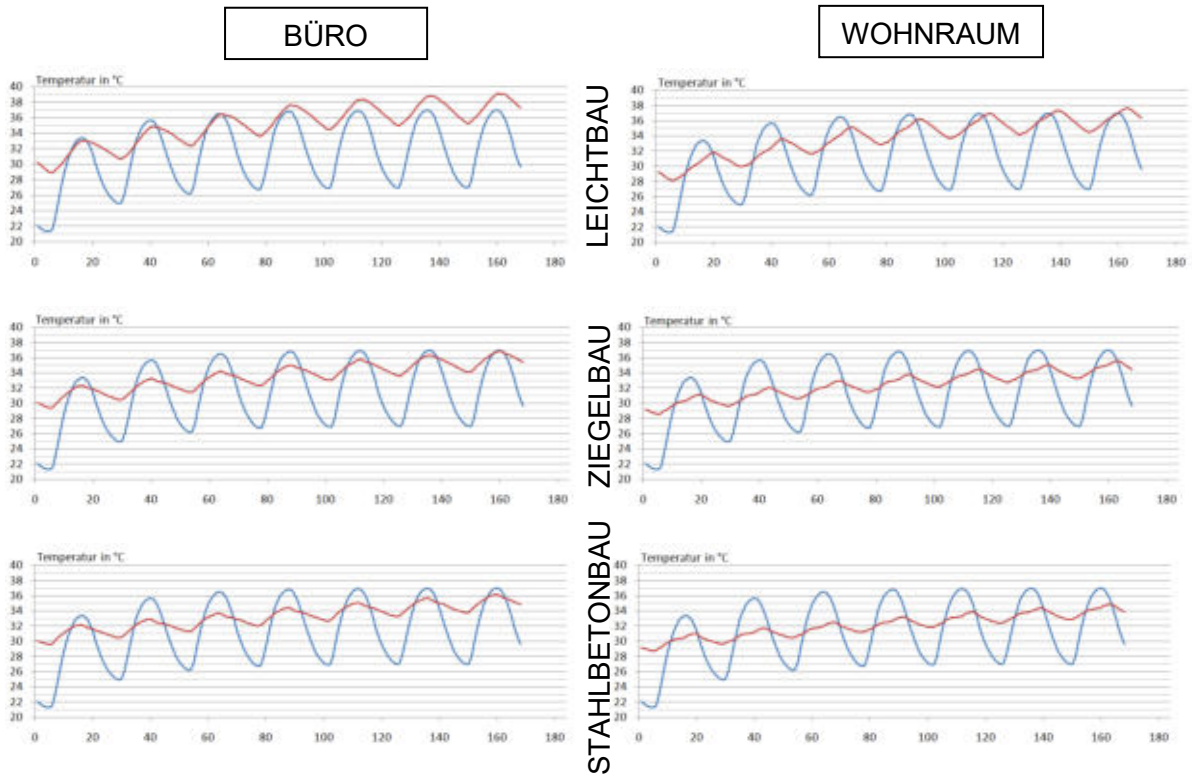


Abbildung 40: Vergleich Stufenantworten des beispielhaft gewählten Raumes in Abhängigkeit der verschiedenen Bauweisen (Leichtbau, Ziegelbau, Stahlbetonbau) in Abhängigkeit der Inneren Lasten (Bürobau bzw. Wohnbau) ohne Außenverschattung ohne Nachtlüftung. Blaue Kurve: Außentemperatur. Rote Kurve: Operative Raumtemperatur.

Schlussfolgerung:

Für das sommerliche Verhalten von Räumen ohne mechanische Kühlung ist die nächtliche Wärmeabfuhr über ausreichend große Öffnungen entscheidend. Eine mechanische Lüftung mit einem 2.5 fachen Luftwechsel hat bei weitem nicht die Wirkung von offenen Fenstern.

Für den "durchschnittlichen" Sommer (periodischer Zustand) bewirkt die Bauweise in dem betrachteten Raum einen Unterschied in der operativen Raumtemperatur von ca. 1 Kelvin.

Im Falle einer Hitzeperiode (Stufenantwort) ergibt sich ein Unterschied von 3 Kelvin.

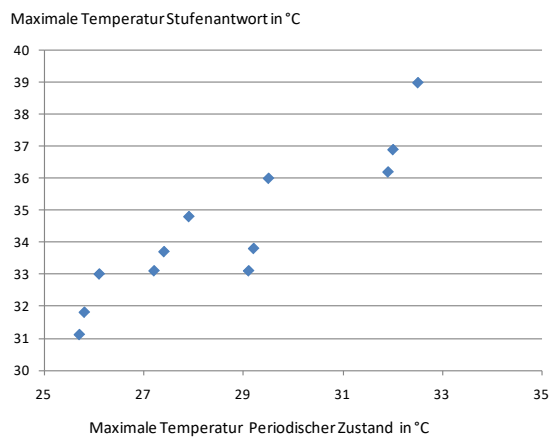


Abbildung 41: Gegenüberstellung der maximalen operativen Raumtemperaturen für den periodischen Zustand und die Stufenantwort

Aus Abbildung 41 ist erkennbar, dass eine Klassifizierung anhand der Ergebnisse für den periodischen Zustand die Basis für geringe sommerliche Raumtemperaturen darstellt. Um auch in Hitzeperioden geringe Raumtemperaturen zu haben, muss die Stufenantwort berechnet werden.

## Interpretation der Ergebnisse und Schlussfolgerungen

Das vorliegende Kapitel ist auf die Aufnahmen der Ergebnisse in das TQB fokussiert. Der unter <http://www.tq-building.org/tqkriterien.htm> vorliegende Kriterienkatalog soll überarbeitet werden. Es betrifft das Kapitel „3. Komfort für NutzerInnen“ des Kriterienkatalog Version 2.0 vom 31. August 2003. Hiervon betrifft es wiederum das Kapitel „3.2 Behaglichkeit (Thermischer Komfort)“ in dem folgende Änderungen vorgenommen werden müssen:

### Änderung des Planungsziels:

- Operative Temperatur  $\leq 26^{\circ}\text{C}$
- Streichen des Planungsziels relative Feuchte  $\leq 55\%$   
da nicht mit ÖNORM B 8110-3 nachgewiesen werden kann

### Wie bisher Nachweis:

Der Nachweis erfolgt nach ÖNORM B 8110-3 Ausgabe 2010.

### Änderung der Punktebewertung:

Für die Punktebewertung des thermischen Komforts im Sommer in TQB sind ausschließlich folgende Kriterien zu verwenden:

- 50 Punkte wenn mit B 8110-3 Güteklasse A nachgewiesen wird (Ob in der ÖNORM B 8110-3 Ausgabe 2010 die Bezeichnung Güteklasse A oder eine Bezeichnung gewählt wird ist noch offen.)
- 30 Punkte wenn mit B 8110-3 Güteklasse B nachgewiesen wird (Ob in der ÖNORM B 8110-3 Ausgabe 2010 die Bezeichnung Güteklasse B oder eine Bezeichnung gewählt wird ist noch offen.)
- 0 Punkte wenn Anforderung B 8110-3 nachgewiesen wird (Mit der OIB-Richtlinie 6 ist die B 8110-3 nachzuweisen. Die OIB-Richtlinie 6 ist bis auf Salzburg in allen Bundesländern verbindlich.)

## 4 Ausblick und Empfehlungen

Anhand der vorliegenden Ergebnisse des vorliegenden Arbeitspaketes wird eine Überarbeitung der derzeitigen ÖNORM B 8110-3 empfohlen.

Mit den erzielten Ergebnissen ist eine Umsetzung der dynamischen Berechnung in Bauphysiksoftware problemlos möglich.

Auf Basis der erzielten Ergebnisse sollten weitere Schritte unternommen werden unterschiedliche Fassadenvarianten zu modellieren und in die Berechnung zu integrieren. Da im Rahmen des AP 12 nur offenbare Fenster untersucht wurden, betrifft dies alle Varianten von doppelschaligen Fassaden die nicht vollständig geöffnet werden können.

## Literatur

- [1] H. Schöberl, T. Bednar, et al: „Anwendung der Passivtechnologie im sozialen Wohnbau“, Endbericht 5/2004, Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie, Bundesministerium für Wirtschaft und Arbeit, Wien 2004; auch erschienen im Fraunhofer IRB Verlag Stuttgart 2004 ISBN 3-8167-6634-X
  
- [2] Woloszyn, M., Rode, C., Roels, S., Kumaran, K., Sanders, Ch., Holm, A.: „Final report Annex 41 Whole Building Heat, Air and Moisture Response (MOIST-EN)“, Volume 1: Modelling Principles and Common Exercises, Volume 2: Experimental Analysis of Moisture Buffering, Volume 3: Boundary Conditions and Whole Building HAM Analysis, Volume 4: Applications: Indoor Environment, Energy, Durability, K.U.Leuven, Department of Civil Engineering, Laboratory of Building Physics, Leuven 2008