

## VALIDIERUNG ENERGETISCHER GEBÄUDESIMULATIONSMODELLE MIT DER VDI 6020

Teresa Schöpfer<sup>1</sup>, Florian Antretter<sup>1</sup>, Christoph van Treeck<sup>1</sup>, Jérôme Frisch<sup>2</sup>, Andreas Holm<sup>1</sup>  
<sup>1</sup>Fraunhofer Institut für Bauphysik IBP, Holzkirchen  
<sup>2</sup> Technische Universität München, Lehrstuhl für Computation in Engineering

### KURZFASSUNG

Energetische Gebäudesimulationsmodelle müssen vor ihrem produktiven Einsatz getestet werden, um Modellfehler auszuschließen und Aussagen bezüglich der Rechengenauigkeit treffen zu können. Die Richtlinie 6020, Blatt 1 des Vereins Deutscher Ingenieure (VDI 6020) gibt dazu Benchmarks vor. Diese ermöglichen die Validierung von Software hinsichtlich der Berechnung der Reaktion eines Beispielraums auf innere Belastungen und Sollwertänderungen, für die Berücksichtigung der solaren Einstrahlung, sowie für eine Ganzjahres-simulation. In vorliegendem Beitrag wird die Richtlinie zur Validierung von zwei verschiedenen Berechnungsmodellen zur energetischen Gebäude-simulation verwendet. An einigen Fällen kann gezeigt werden, dass beide Modelle plausible und im Rahmen der Rechengenauigkeit korrekte Ergebnisse liefern. Jedoch weisen andere Fälle Unstimmigkeiten in den Vorgabedaten auf. Diese können nur durch zahlreiche Variantenrechnungen geklärt werden. Die Anwendung der oben genannten Richtlinie ist deshalb nach Meinung der Autoren nur teilweise zur Überprüfung von energetischen Gebäudesimulations-modellen sinnvoll. Fehlende oder unklare Eingabedaten verhindern eine durchgängig konsistente Anwendung der Norm. Der Beitrag diskutiert die durchgeführten Validierungsrechnungen und setzt sich kritisch mit der Richtlinie auseinander.

### ABSTRACT

Building Energy Simulation models must be tested before their productive use to eliminate model errors and to make statements regarding the computation accuracy. Guideline 6020, part 1 of the German Association of Engineers describes a set of such benchmark cases. These benchmarks enable the validation of software by the calculation of reaction of a sample area to internal loads and setpoint changes, for the consideration of solar radiation and for a whole year building performance simulation. In this article, the guideline is used for the validation of two different calculation models for building energy simulation. In some cases it can be shown that both models provide reasonable results in terms of computational accuracy. However, other cases show

discrepancies compared to the benchmark data. This behavior was clarified by conducting a series of different calculations and variations ("try and error"). In the opinion of the authors, the guideline is therefore only partially useful for the validation of building performance simulation models. Missing or unclear input data prevent a continuous consistent application of the standard. The article discusses the performance of validation calculations and critically reviews parts of the guideline.

### EINLEITUNG

Um die Genauigkeit und Realitätsnähe eines Gebäudesimulationstools überprüfen und zeigen zu können, bietet sich die Durchführung einer Validierungsrechnung an. So können die Funktionen der Software getestet und die Qualität der Ergebnisse dargelegt werden. Dazu bieten sich verschiedene Möglichkeiten.

Zum Einen kann die Software anhand umfassend dokumentierter, realer Experimente getestet werden. Die Randbedingungen des Experiments dienen als Eingabedaten und die Ergebnisse der Simulation können mit erfassten Messdaten verglichen werden. Zum Anderen bieten nationale und internationale Normen, Richtlinien und Standards Validierungsmöglichkeiten an. Als Beispiele können

- ASHRAE Standard 140
- VDI 6020
- VDI 6007
- DIN EN 15255
- DIN EN 15265

genannt werden. Sie stellen unterschiedliche Beispielfälle zur Überprüfung der implementierten Algorithmen und Modelle zur Verfügung. Zur Bewertung der berechneten Ergebnisse werden Vergleichswerte angegeben.

### SOFTWARE

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit der Validierung der energetischen Gebäudesimulationsmodelle WUFI<sup>®</sup>plus und iZone, die vom Fraunhofer Institut für Bauphysik IBP und dem Lehrstuhl für

Computation in Engineering der Technischen Universität München entwickelt wurden.

### WUFI®plus

Bereits seit vielen Jahren beschäftigt sich das Fraunhofer Institut für Bauphysik IBP mit der Entwicklung von Softwaretools zur Simulation im Bereich Bauteile und Gebäude. WUFI®plus ist ein Raumklimamodell, das die bewährte hygrothermische Bauteilsimulation der WUFI®-Familie mit energetischer Gebäudesimulation verbindet. Die Energie- und Massetransportprozesse im Bauteil und im Raum werden kombiniert. Bei der Simulation wird eine detaillierte Abbildung der Nutzung des Raumes, der Lüftung und der anlagentechnischen Komponenten sowie der Regelungsparameter berücksichtigt.

Dies ermöglicht realitätsnahe Aussagen zu Raumklima und Behaglichkeit, Schadensfreiheit der Gebäudehülle, sowie Energiebedarf des Gebäudes. Die Gefahr von Schimmelpilzbefall kann abgeschätzt werden. Der Energieaufwand und die benötigte Anlagenkapazität zum Erreichen gewünschter Behaglichkeit werden ermittelt.

### iZone

Das iZone Gebäudemodell (van Treeck et al. 2009) ist als Finite-Volumen Ansatz nach Clarke (2001) formuliert, wobei das Modell in einzelne Kontrollvolumen zerlegt wird. Die Forderung nach Energie- und Masseerhaltung liefert Gleichungssysteme, die unter gegebenen Randbedingungen und dem Einfluss eines (in diesem Falle idealisierten) regelungstechnischen Systems für einzelne Zeitschritte einer Ganzjahressimulation sukzessive gelöst werden. Als Datenstruktur dient ein Hexaedermodell, wobei zwischen Luftvolumen (fluid) und Festkörpern (solid) unterschieden wird. Zur Berechnung der kurzwelligen Strahlungsverteilung dient ein vereinfachtes Raytracing Schema in Verbindung mit einem detaillierten Fenstermodell. Der langwellige Strahlungsaustausch zwischen Oberflächen wird mittels eines Radiosity Verfahrens ermittelt. Die Kopplung der Lösungsverfahren geschieht explizit. Das Modell ist in (van Treeck 2010) detailliert beschrieben.

## SIMULATION

Für die Validierung von WUFI®plus und iZone wurden die Fallbeispiele der VDI Richtlinie 6020 gewählt.

### VDI Richtlinie 6020

Der Verein Deutscher Ingenieure, hat im Mai 2001 eine Richtlinie herausgegeben: VDI 6020 - Anforderungen an Rechenverfahren zur Gebäude- und Anlagensimulation. Diese Richtlinie wurde als

Instrument zur grundlegenden Überprüfung von Simulationsprogrammen erstellt. Für die Überprüfung der Programme stellt diese Richtlinie eine Reihe von Testbeispielen zur Verfügung, mit welchen verschiedene Bereiche der Programme getestet werden können. Bei der Validierung der oben genannten Programme kommt Blatt 1 der Richtlinie für thermisch-energetische Gebäudesimulation zum Einsatz.

Für die Berechnungen der Testbeispiele ist in der VDI-Richtlinie ein einfacher Typraum definiert.

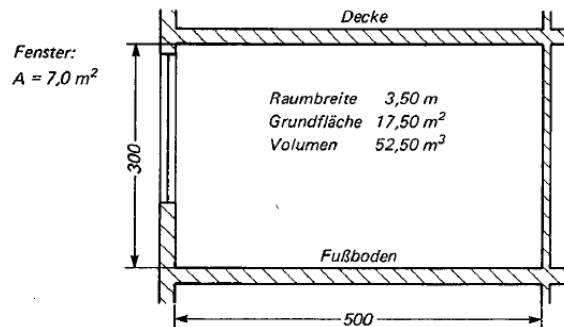


Abbildung 1: Geometrie des Testraums (VDI 6020)

Die Konstruktion des Typraumes ist, je nach Beispielfall, entweder eine leichte oder eine schwere Bauweise. Durch die verschiedenen Bauweisen werden zwei unterschiedliche Mengen an Speichermassen für den Raum bereitgestellt und die entsprechenden Reaktionen betrachtet. Der Testraum ist als Teil eines Gebäudes definiert. Die Außenwand grenzt von Fall zu Fall an jeweils unterschiedlich definierte Außenklimata an. Über die Innenwände findet kein Wärmeaustausch mit den Nachbarräumen statt.

### Testbeispiele

Die Testbeispiele sind in drei Gruppen aufgeteilt. So können anhand des Typraumes die Reaktion auf innere Belastungen und Sollwertänderungen (Beispiele eins bis sieben) und auf solare Einstrahlung (Beispiele acht bis elf), sowie Ganzjahressimulationen überprüft werden.

### Reaktion auf innere Belastungen und Sollwertänderungen

Die Testbeispiele eins bis sieben testen die Reaktion des Raumes auf innere Lasten und Sollwertänderung. Für diese Gruppe der Testbeispiele sind einheitliche Parameter zur Geometrie des Raumes und zur Position des Fensters gegeben. Der Raum ist mit dem Fenster Richtung Süden ausgerichtet. Es gelten für alle sieben Beispiele dieselben bauphysikalischen Parameter. Als Außenklima werden konstant  $22^\circ\text{C}$  angenommen. Es findet kein Wärmestrom über die Innenwände statt.

Alle Fallbeispiele werden ohne kurzweilige Sonnenstrahlung und langwellige Umgebungsstrahlung betrachtet. Auch der Bodenreflexionsgrad wird vernachlässigt. Mit diesen Fällen soll lediglich überprüft werden, welches Verhalten des Raumes aufgrund der unterschiedlichen im Raum auftretenden Lasten durch das Programm errechnet wird.

Diese sieben Beispielfälle werden für einen Zeitraum von 60 Tagen in stündlichen Schritten berechnet. So können der Einschwingvorgang und der dann eingeschwingene Zustand mit den Vergleichswerten der Richtlinie verglichen werden.

### **Solare Einstrahlung**

Die solare Einstrahlung, die in Beispiel eins bis sieben außer Acht gelassen wurde, wird in den Fällen acht bis elf berücksichtigt. In diesen Fällen wird das Strahlungsmodell des Simulationsprogramms, durch die winkelabhängige Berechnung der im Testreferenzjahr bereitgestellten Strahlungsdaten auf die Oberflächen und durch Verglasung auf die Probe gestellt. Durch diese Beispiele können mögliche Fehlerquellen im Strahlungsmodell leicht lokalisiert werden. In den Testbeispielen zur Überprüfung der solaren Einstrahlung wird ein Bauteilaufbau der „schweren“ Art verwendet. Für jedes Beispiel werden fünf Varianten gerechnet, die sich jeweils in der Ausrichtung der Fensterfläche in alle Himmelsrichtungen unterscheiden. Die Fälle werden über den Zeitraum von 365 Tagen berechnet. Für die Beispiele wird das Testreferenzjahr von Würzburg als Außenklima angesetzt und für die unterschiedlichen Anforderungen angepasst.

### **Ganzjahressimulation**

Wie sich die Simulation über den Zeitraum eines gesamten Jahres verhält, wird in den letzten Beispielen getestet. Dabei ist der Raum verschiedenen inneren und äußeren Lasten ausgesetzt und soll durch Beheizung und Klimatisierung eine Sollraumtemperatur halten.

Die Beispiele zur Ganzjahressimulation wurden in vorliegendem Beitrag mit iZone berechnet.

### **Simulation der Beispielfälle**

Die Validierung der Tools WUFI<sup>®</sup>plus und iZone beginnt mit der Modellierung des Typraums. Dazu wird die einfache Geometrie mit den beiden Programmen modelliert. In der Außenwand wird ein Fenster eingefügt. Die Größe dieser Fensterfläche ist in der Richtlinie nicht eindeutig angegeben und variiert zwischen 7,0 m<sup>2</sup> und 10,5 m<sup>2</sup>. Da für die Innentüre zwar Materialdaten, jedoch keine Dimension angegeben ist, wird bei der Modellierung auf diese verzichtet.

Es wird mit den Beispielen zur Überprüfung der Berechnung von Lasten und Sollwertänderungen begonnen. Der Testraum ist für alle Beispielfälle gleich. Für die unterschiedlichen Testrechnungen werden die jeweils vorgegebenen Randbedingungen definiert, die in den Tabellen A1, A3 und A4 der Richtlinie aufgeführt werden. Darin werden die Materialien der Bauteile für „leichte“ und „schwere“ Bauweise beschrieben. Ebenso werden deren bauphysikalische Parameter angegeben. Die Eigenschaften der Verglasung sind für die ersten Beispiele dabei überflüssig, da diese als opake Fläche ohne Speicherfähigkeit definiert werden soll. Die Wärmeübergangskoeffizienten werden nur für Konvektion angegeben. Die vorgegebenen Koeffizienten an den dem Testraum abgewandten Seiten der Innenwände werden ignoriert und durch eine adiabate Schicht in WUFI<sup>®</sup>plus und iZone ersetzt. Als variable Parameter werden die konvektiven und strahlenden Lasten durch Maschinen und deren Betriebszeit für die Beispiele festgelegt. In Beispiel fünf tritt Solarstrahlung hinter der Verglasung als Last auf. Die Strahlungsdaten werden als stündliche Werte angegeben. Sie werden durch eine Verschattung abgemindert. Es gestaltet sich schwierig, diese Werte zu interpretieren und entsprechend als Randbedingung in der Simulation zu definieren. Die fehlenden oder missverständlichen Angaben in den Tabellen A1-A3 der VDI erschweren die konsistente Durchführung der Validierung. Um die entsprechend richtigen Angaben ermitteln zu können sind zahlreiche Variantenrechnungen nötig.

Für die Simulation der zweiten Beispielgruppe zur Überprüfung der Berechnung der solaren Einstrahlung werden die Bauteile des Typraums mit Material „schwerer“ Bauweise belegt. Die bauphysikalischen Parameter der Komponenten sind sehr vereinfacht. Für die Außenwand werden keine entsprechenden Parameter angegeben. Das Fenster wird für jede Variante eines Beispiels in eine andere Orientierung ausgerichtet und die Verglasung mit den vorgegebenen Eigenschaften definiert. Die Klimatisierung der Raumluft wird mit unbegrenzter Anlagenleistung gewährleistet. Das TRY 05 Würzburg wird für jedes Beispiel entsprechend der Vorgaben verändert.

## **ERGEBNISSE**

Die Ergebnisse der Simulation der Testfälle aus der VDI Richtlinie 6020 können mit vorgegebenen Vergleichswerten ausgewertet werden. Diese Werte sind in der VDI 6020 leider nur als Grafiken vorhanden. Jedoch finden sich für die erste Gruppe der Testbeispiele Vergleichswerte in tabellarischer Form in der VDI Richtlinie 6007 – Berechnung des instationären thermischen Verhaltens von Räumen und Gebäuden (VDI 6007 2007). Diese Richtlinie

gibt ebenfalls Fälle zur Validierung von Gebäudesimulationsprogrammen vor. Die ersten sieben Fälle der Richtlinie 6020 sind denen der Richtlinie 6007 sehr ähnlich, weshalb diese Ergebnisse zum Vergleich tabellarisch aufgeführt werden. Diese Werte werden für die Bewertung der Berechnungen mit WUFI®plus verwendet.

Der zweite Teil der Testbeispiele kann leider zunächst nur graphisch mit den Vergleichsergebnissen in der VDI 6020 verglichen werden. Aus diesem Grund wurde für die Übertragung der Werte (insbesondere für die Fälle der Ganzjahressimulation, Beispiel 13 der Richtlinie) in eine vom Rechner interpretierbare Form ein spezielles Interpolationsverfahren zum Abgleich der eingescanten Daten unter hohem Zeitaufwand eingesetzt.

Für die Testfälle eins bis fünf werden jeweils der erste, der zehnte und der sechzigste Tag der Simulation hinsichtlich der sich einstellenden Lufttemperatur im Raum verglichen. So können Startwerte, das Einschwingverhalten und die Übereinstimmung im eingeschwungenen Zustand überprüft werden. Für das erste Beispiel wird ebenfalls das Einschwingverhalten über den gesamten Berechnungszeitraum verglichen. Die Beispiele sechs und sieben überprüfen die Wirkung der Klimatisierung. Daher wird für Simulation sechs die Anlagenleistung am zehnten Tag gegenübergestellt. Im siebten Fall ist ein Vergleich der Raumlufttemperatur am zehnten Tag vorgesehen.

Die erste Beispielgruppe wurde nur mit WUFI®plus gerechnet. Das Programm erzielte dabei größtenteils gute Ergebnisse. Wie Abbildung 2 und Abbildung 3 zeigen, stimmen die mit WUFI®plus berechneten Verläufe der Innenraumtemperatur mit den Vergleichsergebnissen der VDI-Richtlinie überein. Das Einschwingverhalten zeigt sich etwas träger. Jedoch erreicht WUFI®plus nach 60 Tagen das gleiche Temperaturniveau, das in der Richtlinie angegeben ist. Die Lasteintritte und -spitzen werden richtig abgebildet und erhöhen die Innentemperatur im richtigen Maß.

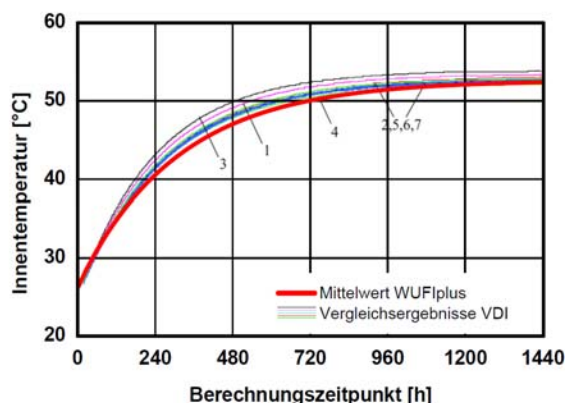


Abbildung 2: Mittelwert des Einschwingvorgangs über 60 Tage

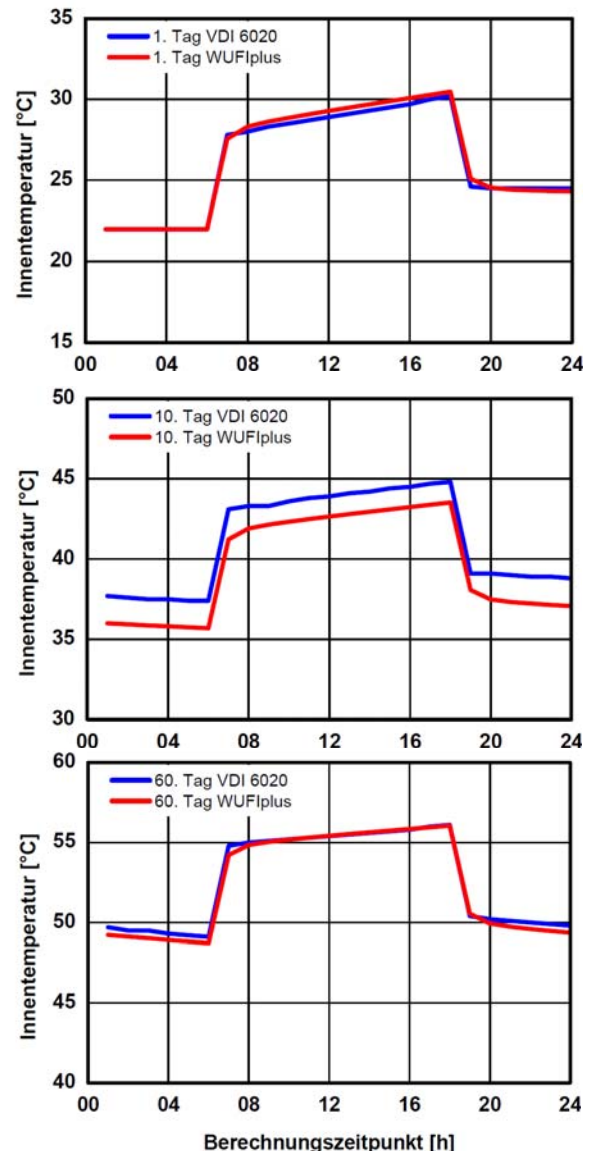


Abbildung 3: Testfall 1 - Vergleich der Innentemperaturen an den Berechnungstagen 1, 10, und 60

Für den Testfall fünf, der eine solare Last hinter der Scheibe als Last angibt, ist auch nach vielen Varianten keine Übereinstimmung zu erreichen. Der verzögerte Lasteintritt bei der Berechnung mit WUFI®plus, wie in Abbildung 4 deutlich, lässt sich durch eine falsche Angabe in der Richtlinie erklären. Der Lasteintrittspunkt in den Eingabeparametern stimmt nicht mit dem der Grafik überein. Die Erhöhung der Raumlufttemperatur wird jedoch entsprechend abgebildet.



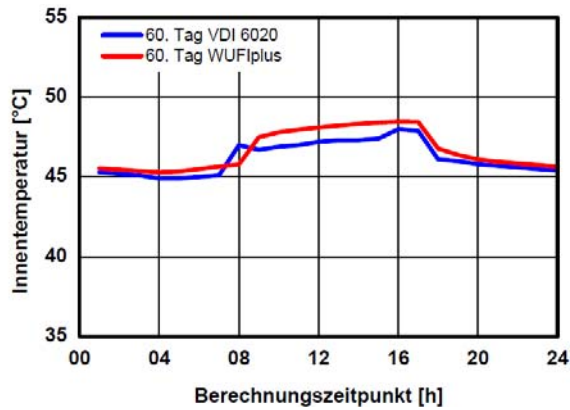


Abbildung 4: Testfall 5 - Vergleich der Innentemperaturen an den Berechnungstagen 1, 10, und 60

Die Vergleiche der Testfälle acht bis elf sind umfangreicher gestaltet. Es werden zwei Tage aus dem simulierten Zeitraum mit Vorgabewerten verglichen. Für jeden der beiden Tage werden die Werte aller fünf Varianten (Fensterorientierungen) gegenübergestellt. Für diese Fälle werden die Strahlungsbilanzen für den Tag und die jeweilige Fensterorientierung bewertet.

Beispiel acht zeigt die Energiebilanz über die Fensterfläche unter Berücksichtigung des langwelligen Strahlungsaustausches. Die zu vergleichenden Tage repräsentieren je einen sonnigen und einen bedeckten Tag. So können die direkte und die diffuse Strahlungsberechnung geprüft werden.

Die Simulationen des Beispielfalls mit beiden Programmen zeigte ein zufriedenstellendes Ergebnis. Die Berechnungen mit den Simulationstools zeigen Verläufe, die sich mit den Vergleichsergebnissen der VDI decken. Abbildung 5 zeigt die Vergleiche der Einstrahlung für unterschiedlich orientierte Fenster.

In Abbildung 5 (oben) ist ersichtlich, dass die von iZone vorhergesagte Anlagenleistung eine lokale Spitze aufweist. Dies ist nach Ansicht der Autoren dadurch zu erklären, dass für die Solarstrahlungsberechnung in iZone ein detailliertes Raytracing-Modell zur Strahlverfolgung zum Einsatz gelangt und in diesem Fall sehr kleine Zeitschritte verwendet worden sind, womit hierbei ein Strahlungseinfall auf der Nordseite zum Tragen kommt. Weiterhin ist, verglichen mit den Vorgaben der Norm, eine andere empirische Formulierung der konvektiven Wärmeübertragung eingesetzt worden.

Die Grafiken der Vergleichswerte zu Beispiel 10 werfen jedoch Fragen auf. Die Verläufe der Simulationsergebnisse und der Vergleichswerte zeigen die gleiche Höhe, jedoch treten Verschiebungen in Zeitrichtung auf. Dabei fällt keine einheitliche Richtung der Verschiebung auf. Innerhalb eines Tages bei unterschiedlicher Fensterorientierung

zeigen die Kurven eine stündliche Verschiebung nach

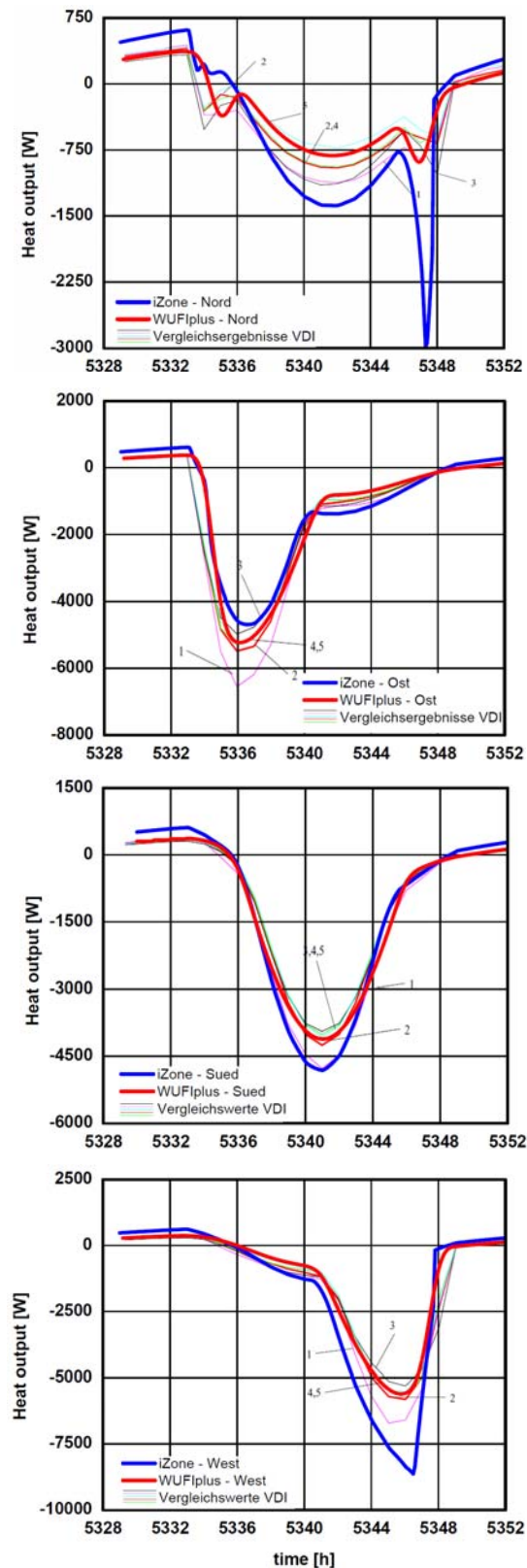


Abbildung 5: Fall 8 - 11. August - Vergleich unterschiedlich orientierter Fenster (von oben nach unten: Nord, Ost, Süd, West)

vorne oder nach hinten. Worauf dies zurück zu führen ist, oder ob dies ein Druckfehler in der Skalierung der Grafiken ist, kann nicht geklärt werden. Die abweichende Skalierung in der VDI im Vergleich zu den anderen Beispielfällen, obwohl der gleiche Tag verglichen wird, könnte aber ein Hinweis dafür sein.

Für den Fall der Ganzjahressimulation (Beispiel 13) ist in Abbildung 6 die Heizleistung für die Periode vom 31. Januar bis 7. Februar dargestellt. iZone kann die zeitliche Dynamik der Spitzenwerte gut voraussagen. Quantitative Unterschiede sind durch die zuvor erwähnten Unterschiede bei der Berechnung des Wärmeübergangs zu erklären.

Abbildung 7 vergleicht die mit iZone berechnete maximale Heizleistung mit den in der Norm definierten Werten. Für das zeitliche Profil des Nutzerverhaltens wurden folgende Belegungszeiten angenommen: werktags Arbeitszeit von 7 bis 17 Uhr, Anlagenbetrieb von 8 bis 18 Uhr; außerhalb dieser Zeiträume wurde eine Grundtemperatur von 18°C gehalten. Weitere Details sind in (van Treeck 2010) dargestellt.

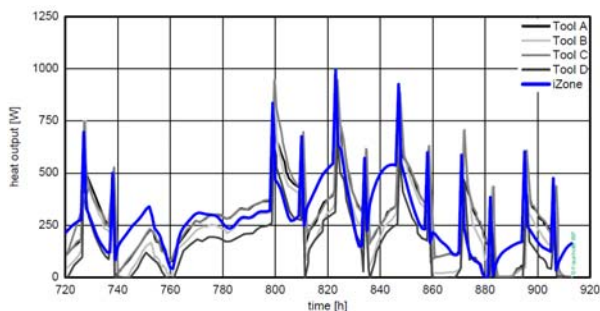


Abbildung 6: Heizleistung [W] für den Monat Januar aus iZone verglichen mit den Werten von Beispiel 13

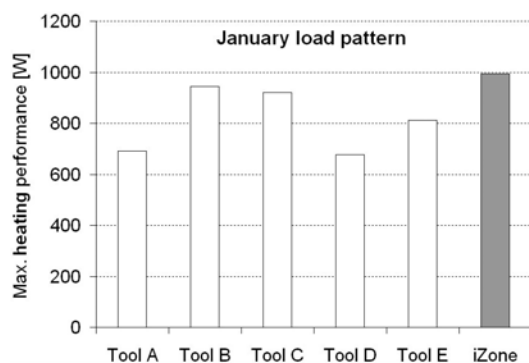


Abbildung 7: Vergleich der berechneten maximalen Heizleistung von iZone für Januar im Beispiel 13

## ZUSAMMENFASSUNG

Die Validierung der Gebäudesimulationsprogramme WUFI®plus und iZone mit der VDI Richtlinie 6020 zeigte größtenteils gute Ergebnisse und damit die Qualität der Software. Jedoch gestaltete sich die

Durchführung der Testrechnungen aufgrund zahlreicher Unstimmigkeiten in den Angaben der Richtlinie schwierig und durch die zahlreichen Variantenrechnungen um die richtigen Parameter für die Eingabe herausfiltern zu können, zeitaufwendig. Dies hinterlässt kein abschließend befriedigendes Ergebnis einer Validierung.

Um eine Gebäudesimulationssoftware produktiv einsetzen zu können, muss mit Hilfe von Validierungsrechnungen die Qualität geprüft und gezeigt werden. Um verlässliche und fundierte Ergebnisse zu erhalten, empfiehlt sich die Durchführung von Testrechnungen nach weiteren Richtlinien und Normen. Dies könnte künftig mit VDI 6007 und ASHRAE 140 erfolgen.

## LITERATURVERZEICHNIS

- ANSI/ASHRAE Standard 140: Building Thermal Envelope and Fabric Load Tests. 2007
- DIN EN 15255: Wärmetechnisches Verhalten von Gebäuden - Berechnung der wahrnehmbaren Raumkühllast - Allgemeine Kriterien und Validierungsverfahren; Deutsche Fassung EN 15255:2007
- DIN EN 15265: Wärmetechnisches Verhalten von Gebäuden - Berechnung des Heiz- und Kühlenergieverbrauchs - Allgemeine Kriterien und Validierungsverfahren; Deutsche Fassung EN 15265:2007
- Clarke J. (2001). Energy simulation in building design (2nd). Butterworth-Heinemann.
- VDI 6007: Berechnung des instationären thermischen Verhaltens von Räumen und Gebäuden, Raummodell – Blatt 1 Oktober 2007
- VDI 6020: Anforderungen an Rechenverfahren zur Gebäude- und Anlagensimulation, Gebäudesimulation - Blatt 1 2001
- van Treeck, C., Frisch, J., Egger, M., and Rank, E. (2009) Model-adaptive analysis of indoor thermal comfort. In Building Simulation 2009, Glasgow, Scotland.
- van Treeck, C. (2010). Habilitationsschrift, Technische Universität München.