

## ERSTELLUNG EINES NEUEN, MESSDATENGESTÜTZTEN VALIDIERUNGS- SZENARIOS FÜR GEBÄUDE-SIMULATIONSPROGRAMME

M. Kersken<sup>1</sup>, I. Heusler<sup>1</sup>, and P. Strachan<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP, Holzkirchen, Germany

<sup>2</sup>University of Strathclyde, ESRU, Dept. of Mechanical and Aerospace Eng.,  
Glasgow, Scotland

matthias.kersken@ibp.fraunhofer.de

ingo.heusler@ibp.fraunhofer.de

paul@esru.strath.ac.uk

### KURZFASSUNG

In diesem Dokument wird die Erstellung eines in situ Datensatzes für die Validierung dynamischer Gebäude-Simulationsprogramme an einem realen Gebäude beschrieben. Dieser Validierungsdatensatz wird im Rahmen des IEA ECB ANNEX 58 "Reliable building energy performance characterisation based on full scale dynamic measurement" (ANNEX 58 Webseite) entwickelt. Der deutsche Projektteil wird durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) gefördert. Das hier entwickelte Validierungsszenario besteht aus einem Satz qualitativ hochwertiger Messdaten und einer exakten Dokumentation aller Randbedingungen. Dies ermöglicht es ein exaktes Modell des Validierungsszenarios zu erstellen und die damit gewonnenen Ergebnisse mit realen Messdaten zu vergleichen. Auf Grund der detaillierten Modellierung zeigen die verbleibenden Abweichungen die Grenzen der Software auf. Die Beschreibung der Szenarios enthält neben zahlreichen Wetterdaten eine detaillierte Dokumentation der Gebäudegeometrie, Hüllflächenbauteile, Wärmebrücken, Luftdichtheit, Lüftungskonzept, usw..

### ABSTRACT

This document describes the development of a full-scale empirical validation dataset for building energy simulation tools. This development is part of the IEA ECB ANNEX 58 "Reliable building energy performance characterisation based on full scale dynamic measurement" (ANNEX 58 Homepage). The German part of this project is government-funded by the Federal Ministry for Economic Affairs and Energy (BMWi). The validation method consists of a set of high quality measurement data and a precise documentation of all boundary conditions. This enables a user to create a complete model of the different validation scenarios. The results of this model can be compared to the real measurement data. Because of the detailed modelling the remaining deviations should indicate the limitations of the tool under investigation. The definition of the scenarios consists of extensive weather data and a detailed description of the building geometry, components compositions, thermal bridges, air tightness, ventilation, etc.

### EINLEITUNG

Die Planungsprozesse komplexer moderner Gebäude greifen heutzutage häufig auf Methoden bzw. Programme zur dynamischen thermisch-energetischen Gebäudesimulation zurück. Eine Grundvoraussetzung die der Verwendung solcher Programme zu Grunde liegt ist Annahme, dass diese in der Lage sind die vielfältigen und miteinander interagierenden physikalischen Prozesse innerhalb eines Gebäudes und seiner Anlagentechnik mit hinreichender Genauigkeit abzubilden. Die etablierten Systematiken zur Qualifikation von Gebäudesimulationsprogrammen sind die BESTEST (Building Energy Simulation Tests) (Judkoff et al., 1995), und andere vergleichbare Validierungsverfahren nach ASHRAE (ASHRAE 140) oder CEN Normen (ISO 13791, 15255 und 15265). Alle diese Verfahren basieren auf dem Vergleich mehrerer Programme zu Validierungszwecken. Das bedeutet, dass sich die „realen“ Vergleichswerte aus den Ergebnissen einer Reihe anderer dynamischer Simulationsprogramme und genormter Berechnungsverfahren zusammensetzen. Diese Tests zusammen mit ihren Vergleichs- bzw. Grenzwerten haben sich als sehr nützlich bei der Fehlerdiagnose neuer Programme erwiesen.

Ziel der in dieser Veröffentlichung dargestellten Arbeit ist die Erstellung eines qualitativ hochwertigen Datensatzes, der zur Validierung dynamischer Gebäudesimulationsprogramme geeignet ist. Zu diesem Zweck werden die zu den Messdaten gehörigen Randbedingungen exakt dokumentiert und für die Durchführung der Validierungen zur Verfügung gestellt. Dieser hohe Detaillierungsgrad ermöglicht es, die vermessenen Gebäude hinreichend genau zu modellieren, um die wichtigsten Teilmodelle eines Simulationsprogramms zu überprüfen. Die durchgeführten Arbeiten lassen sich in die folgenden vier Arbeitspakete aufteilen: Die Entwicklung des Experiments zur Generierung der erforderlichen Messdaten. Aufbau und Durchführung des Experiments zusammen mit den erforderlichen Prozessen zur Qualitätssicherung. Die Erstellung der Gebäudemodelle durch die einzelnen Validierungs-Teams erfolgt an Hand der zur Verfügung gestellten Randbedingungen. Die Analyse der jeweiligen Modellabweichungen nach Bekannt-

gabe der gesuchten Messdaten der Raumlufttemperaturen und Heizenergieverbräuche. Diese Veröffentlichung zeigt auf, welche Teilmodelle eines Simulationsprogramms mit Hilfe des vorliegenden Datensatzes validiert werden können und wie dies durch den Versuchsablauf ermöglicht wird. Die hier beschriebenen Messungen werden an den beiden in Abbildung 1 dargestellten Zwillingshäusern auf dem Freilandversuchsgelände des Fraunhofer-Instituts für Bauphysik IBP in Holzkirchen, ca. 40 km südlich von München durchgeführt. Bei diesen Zwillingshäusern handelt es sich um zwei identische Gebäude die repräsentativ für deutsche Einfamilienhäuser sind. Diese beiden Gebäude sind messtechnisch so vollständig ausgestattet, dass die Erfassung sämtlicher relevanter Zustände und Randbedingungen möglich ist. Mit Hilfe dieser Randbedingungsdaten ist die Erstellung eines hinreichend guten und detaillierten Simulationsmodells möglich, das in der Lage ist die gemessenen Raumlufttemperaturen und Heizenergieverbräuche nachzurechnen. Der hier entwickelte Versuchsablauf enthält unterschiedliche Szenarien, die eine eingehende Betrachtung verschiedener Teilmodelle der jeweiligen Programme ermöglichen. Neben unterschiedlichen Lüftungskonzepten in den einzelnen Räumen werden zahlreiche Szenarien bezüglich der Heizenergie, der Raumluft Solltemperaturen und der Rollläden durchlaufen. Die zu prüfenden Programme müssen, je nach Szenario, entweder die Raumlufttemperaturen oder die Heizenergieverbräuche nachbilden können.

## MOTIVATION UND RELEVANZ

Thermisch-energetische Gebäudesimulation wird heutzutage regelmäßig zur energetischen Bewertung von Gebäuden und Gebäudeentwürfen eingesetzt. Mit dem zunehmenden Einsatz unterschiedlicher Versorgungs- und Speichertechnologien in modernen Niedrig- und Nullenergiehäusern steigt die Komplexität der Interaktionen der unterschiedlichen Wärmetransport- und Wärmespeicherprozesse durch das immer dynamischere Verhalten der Gebäude. Potentielle Regelungsprobleme und sommerliche Überhitzung sind die Folge. Aus diesem Grund ist es essenziell für die Baubranche, dass die Gebäudesimulation in der Lage ist, verlässliche Vorhersagen zu liefern und dieses Vertrauen auch bei den Planungsverantwortlichen vorhanden ist. Derzeit existiert eine anerkannte generelle Validierungsmethodik, die auf analytischen und empirischen Methoden und auf dem Vergleich unterschiedlicher Software-Programme basiert (Judkoff et al 1983, Jensen 1993). Programmvergleichende Validierungsmethoden haben den Vorteil, dass sie relativ einfach sind und auf eine Vielzahl von Parametern angewendet werden können. Diese programmvergleichenden Methoden, zu denen der auch im Rahmen eines IEA Projects entwickelte BESTEST (Judkoff and Neymark 1995) gehört, sind sehr erfolgreich, vor allem wenn es darum geht Pro-

grammierfehler ausfindig zu machen. Die europäischen Normen zur Bedarfsberechnung von Heiz- und Kühlenergie und dem sommerlichen Wärmeschutz (ISO 13790, ISO 13791, EN 15255, EN 15265) stellen die nötigen Randbedingungen zur simulativen Abbildung ihrer Berechnungen zur Verfügung. Trotzdem bestehen diese Tests ausschließlich aus dem Vergleich der Ergebnisse mehrerer Simulationsprogramme, der Angabe zulässiger Abweichungen und einfachen analytischen Auswertemethoden.

Es gibt berechtigte Kritik, dass solchen programmvergleichenden Test keine real gemessenen Daten zu Grunde liegen. Empirische Validierungen können zwar ebenfalls durchgeführt werden, allerdings ist die Erstellung entsprechender qualitativ hochwertiger Messdatensätze inklusive der Randbedingungen teuer und zeitaufwendig. Es existieren derartige hochqualitativen Validierungsdatensätze aus vorangegangenen IEA Projekten, allerdings repräsentieren diese entweder reine Messzellen (z.B. IEA Annex 43/Task 34 (IEA ECB Annex 43)) oder sie bilden nur einzelne Komponenten wie z.B. Miko-KWK-Anlagen ab (IEA EBC Annex 42).

Es herrscht Einigkeit darüber, dass Validierungsdatensätze mit entsprechender Qualität benötigt werden um die erforderliche Sicherheit im Umgang mit detaillierten Gebäudesimulationen zu gewinnen. In vorangegangenen Projekten erstellte ähnliche Validierungsdatensätze weisen noch einige Schwächen auf, die mit diesem Datensatz behoben werden sollen. Die wesentlichen Verbesserungen in diesem Projekt sind die detaillierte Dokumentation der verwendeten Sensorik zusammen mit ihrer Messunsicherheit, die genau bekannten Gebäude mit ihrer hochwertigen Mess-, Steuer- und Regeltechnik sowie Verbesserungen in der simulationsgestützten Entwicklung des Versuchsablaufs.

Die Herausforderung sowohl bei der Entwicklung als auch bei der Durchführung von empirischen Validierungen an realen Gebäuden ist der benötigte Detaillierungsgrad der Gebäudekonstruktion, des Gebäudebetriebs und die Kenntnis nicht konstanter Randbedingungen während des Messzeitraums. Sobald ein beliebiger Wärmestrom nicht erfasst ist oder irgendein Konstruktionsdetail unbekannt ist werden immer Zweifel entstehen, ob eine Abweichung zwischen Messdaten und Simulation den Einschränkungen des Programms oder Defiziten in der Dokumentation bzw. der Messunsicherheit geschuldet ist. Die Dokumentation dieses Datensatzes ist derart gestaltet, dass alle räumlichen und temporalen Randbedingungen ausreichend detailliert festgehalten sind um Unsicherheiten aus der Messdatenauswertung und auf Grund nötiger Modellierungsannahmen so gering wie möglich zu halten. Auch ist das Experiment so aufgebaut, dass innerhalb des Erdgeschosses möglichst viele verschiedene Wärmeströme und Transportmechanismen auftreten um deren Abbildung in Simula-

tionsprogrammen überprüfen zu können. Dies sind unter anderem Lüftung- und Infiltrationswärmeverluste, Wärmetransmission, solare Gewinne, Verschattung, Luftströmungen zwischen einzelnen Räumen, usw. Um dies zu ermöglichen, werden zusätzlich zu der detaillierten Dokumentation, die Geometrie, Konstruktionen, Wärmebrücken, Verglasungsdaten, usw. enthält, sämtliche externen Randbedingungen die das Gebäude beeinflussen können wie solare Strahlung, Wind, Luft- und Erdreichtemperaturen messtechnisch mit erfasst und zur Verfügung gestellt.

Ein Vorteil, wie auch eine Schwierigkeit, bei der Verwendung echter Validierungsdaten ist die Tatsache, dass in den realen Messdaten zwingend sämtlich auftretenden physikalischen Effekte enthalten sind, die in realen Gebäuden auftreten, da diese Daten aus einem realen Gebäude stammen. So kann z.B. die Temperaturschichtung in einem Raum bei einem Programmvergleich ausgeschlossen sein obwohl in der Realität eine Schichtung auftritt und somit andere Temperatur- und Wärmestromverhältnisse an der Decke mit Einfluss auf die Energiebilanz des gesamten Raums vorherrschen würde.

Eine empirische Validierung weist auch Nachteile auf. Selbst ein verhältnismäßig simples Gebäude wie das IBP Experimentierhaus erfordert bereits eine sehr komplexe Modellierung. Viele Wärmebrücken müssen genau berechnet werden, interne Wände und Türen agieren sowohl als Wärmebrücken als auch als Überströmöffnungen. Alle diese Effekte müssen für einen detaillierten Vergleich der Temperatur- und Heizenergieverläufe berücksichtigt werden. Zusätzliche Unsicherheiten kommen aus unbekanntem bzw. unkontrollierbarem Abweichungen. So können z.B. Bauteilschichtstärken abweichend ausgeführt sein oder sich auch lokal ändern. Auch können die realen Dämmwerte eines Materials von ihrer Spezifikation abweichen. So kann z.B. Wasser durch Risse im Außenputz in die Dämmebene eindringen und die Wärmeleitfähigkeit des Material erhöhen. Andererseits wird in der Regel der reale mittlere Wärmedurchlasswiderstand eines Produkts höher sein als der spezifizierte. Dies ist auf Grund der Streuungen im Produktionsprozess erforderlich um sicher zu stellen, dass kein wesentlicher Anteil der ausgelieferten Produkte die spezifizierten Eigenschaften unterschreitet (DIN 4108-4).

## VORGEHEN BEI DER VALIDIERUNG

Die Entwicklung der Validierung innerhalb des IEA EBC ANNEX 58 folgt einer festen Struktur:

1.) An Hand der bekannten Gebäudeparameter und lokaler Wetterdaten eine dynamische Simulationsrechnung durchgeführt. Deren Ergebnisse werden verwendet, um den Messablauf im Hinblick auf die erforderliche Länge der einzelnen Messphasen und

der Höhe der fest vorgegeben Heizleistungsprofile zu spezifizieren.

2.) Anschließend wird die Messung entsprechend dieser Spezifikationen durchgeführt. Diese Veröffentlichung beschreibt die nötigen Schritte zur Vorbereitung und zur Durchführung der Messungen. Ein wichtiger Aspekt beim Entwurf dieses Experiments ist die Verwendung von zwei identischen Gebäuden am selben Standort mit geringfügig unterschiedlicher Konfiguration. So kann nicht nur ein Vergleich der absoluten Temperaturen und Heizenergie sondern auch ein Vergleich der gemessenen und vorhergesagten Unterschiede zwischen den beiden Zwillingshäusern während identischer Zeitperioden durchgeführt werden.

3.) Nach Abschluss der Messungen werden die entsprechenden Daten aufbereitet und an die teilnehmenden Validierungsteams für die „blinde“ Modellierung verteilt. Für die blinde Validierung werden den Teams zwar die Messdaten der Randbedingungen nicht jedoch die gesuchten Validierungsziele zur Verfügung gestellt. Zusammen mit der Tatsache, dass alle Änderungen während der späteren Fehlersuche physikalisch begründet werden müssen wird verhindert, dass eine generische Optimierung der Modellparameter hin auf die gesuchten Verläufe vorgenommen wird. Die bereitgestellte Spezifikation enthält die folgenden Informationen:

- Standort
- Gebäudegeometrie
- Optische und energetische Verglasungs- und Rahmendaten
- Bauteilaufbauten
- Eigenschaften der Rollläden
- Wärmebrücken
- Lüftungskonzept
- Heizkonzept
- Ergebnisse des Differenzdruckverfahrens (Bestimmung der Luftdichtheit)
- Bodenreflexionsgrad
- Innen- und Außenaufnahmen (Fotos)

Die Ergebnisse der Validierungsteams sind die stündlichen Vorhersagewerte des Heizwärmebedarfs und der Raumlufttemperaturen (entsprechende der aktuellen Validierungsphase). Zusammen mit den Simulationsergebnissen wird ein Modellierungsbericht erstellt der die theoretischen Teilmodelle des verwendeten Programms und sämtlich Annahmen der Modellierer enthält. Während dieses Zeitraums haben die Organisatoren der Validierungen alle Fragen der einzelnen Teilnehmer beantwortet und sämtliche Fragen und Antworten an alle Teams verteilt. Die Sammlung dieser Fragen dient als Grundlage für die exakte Definition des erforderlichen Detaillierungsgrads der Randbedingungen. Die Simulationsergebnisse bzw. deren Abweichungen dieser dritten Projektperiode enthalten entsprechend sowohl Einschränkungen und

Fehler der verwendeten Programme als auch fehlerhafte Nutzereingaben und evtl. Schwächen im experimentalen Ablauf bzw. dessen Spezifikation.

Da unterschiedliche Simulationsprogramme verschiedene mathematische Ansätze und physikalische Modelle verwenden, hängen die erforderlichen Eingangsparameter jeweils von dem untersuchten Simulations-Programm ab. Manche Programme verwenden z.B. Durchflusskoeffizienten zur Ermittlung von Lüftungsraten, Infiltration und Rückströmung durch offene Türen. Solche Parameter sind nicht in den Spezifikationen enthalten und müssen von den Validierungsteams an Hand deren Erfahrung gewählt werden. Andere Programme können vereinfachend feste Luftwechselraten ansetzt.

Im Rahmen des aktuellen IEA EBC ANNEX 58 nahmen 21 Validierungsteams von 13 Organisationen mit 11 verschiedenen Simulationsprogrammen teil.

4.) In der letzten Validierungsperiode werden den Teams die überarbeitete Spezifikation mit allen gestellten und beantworteten Fragen zusammen mit den Messdaten der Raumlufttemperaturen und Heizenergieverbräuche zur Verfügung gestellt. Mit Hilfe dieser Messdaten werden die Validierungsmodelle auf Fehler und Abweichungen hin überprüft. Um generische Optimierungen an die Messdatenverläufe zu unterbinden, müssen alle geänderten Parameter in einem überarbeiteten Bericht dokumentiert und physikalisch begründet sein. Die so ermittelten verbesserten Vorhersageverläufe werden wieder an die Organisatoren übermittelt. Die verbleibenden Abweichungen bezüglich der Temperatur- und Heizenergieverläufe können nun, nachdem sämtlich Benutzerfehler annulliert sind, den Einschränkungen der zu Grunde liegenden Algorithmen und den Modellannahmen der Simulationsprogramme zugeordnet werden. Somit ermöglichen diese abschließend ermittelten Abweichungen Aussagen über die Zuverlässigkeit von dynamischen, thermisch-energetischen Gebäudesimulationsprogrammen.

## VERSUCHSDESIGN

### **Standort und Geometrie**

Die beiden in Abbildung 1 dargestellten identischen Zwillingshäuser des IBP sind repräsentativ für typisch deutsche Einfamilienhäuser, die mit einer ausführlichen Mess-, Steuer- und Regeltechnik ausgestattet sind. Sie bestehen aus einem Keller, dem Erd- und einem Dachgeschoss. Für das hier entwickelte Validierungsszenario wird ausschließlich das Erdgeschoss herangezogen, dessen Grundriss Abbildung 4 entnommen werden kann. Die Außenbauteile entsprechen dem Wärmedämmstandard des Referenzgebäudes gemäß deutscher Energieeinsparverordnung Stand 2009 (EnEV 2009). Die Fenster sind mit einer 2-Scheiben-Wärmeschutzverglasung

( $U_g = 1,2 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ ) und elektrisch betriebenen Kunststoffrollläden ausgestattet. Um solare Wärmegevinne in die Validierung zu integrieren sind während der Messungen alle Rollläden des Erdgeschosses, außer denen der Südfenster, geöffnet. Die Betriebsweise der südliche Rollläden wird später in diesem Dokument erklärt.

Wie bereits erwähnt ist die Modellierung auch dieser verhältnismäßig simplen Gebäude nicht trivial. Um die erforderliche Komplexität der Validierungsmodelle zu begrenzen werden Keller und Dachgeschoss nicht in die Validierung eingebunden. Ihre gemessenen Lufttemperaturen dienen lediglich als Randbedingungen für die Berechnung des thermisch energetischen Verhaltens des Erdgeschosses. Da der Keller nicht explizit in die Modellierung aufgenommen ist, kann auf eine Berechnung der Wärmeverluste über die Kellerwände und Bodenplatte in das Erdreich mit den resultierenden Modellunsicherheiten verzichtet werden. Diese sind der Tatsache geschuldet, dass zwar die Erdreichtemperaturen bis in eine Tiefe von 2,0 m in den Messdaten zur Verfügung stehen, allerdings erreicht die Bodenplatte eine Tiefe von etwa 3,5 m. Auch hat sowohl das vorhandene Bodenmaterial als auch die vorherrschende Grundwassersituation einen wesentlichen Einfluss auf die Wärmeleitfähigkeit des Erdreichs. Da diese Modellparameter nicht ausreichend bekannt sind würde die Unsicherheit durch nötige Abschätzungen deutlich erhöht werden. Die Wärmeverluste des Dachgeschosses werden im Wesentlichen durch den Wärmedurchgang durch die Dachkonstruktion bestimmt. Das Dach der Zwillingshäuser besteht aus einer üblichen Holz-Sparrenkonstruktion mit Zwischensparrendämmung. Aufgrund der Art der Konstruktion entstehen komplexe zweidimensionale, im First- und Traufbereich sogar dreidimensionale Situationen. Auch wenn dies prinzipiell durchaus eine Schwachstelle des Validierungsszenarios ist, wird die Validierung auf das Erdgeschoss beschränkt. Trotz dieser Vereinfachungen werden bei der ausschließlichen Betrachtung des Erdgeschosses hinreichend viele Wärmeübertragungsmechanismen überprüft und der Modellierungsaufwand bleibt innerhalb rechtfertigbarer Grenzen. Die gemessenen Raumlufttemperaturen des freischwingenden Kellers und Dachgeschosses werden zusammen mit den Wetterdaten als Randbedingungen zur Verfügung gestellt. Wie Abbildung 2 entnommen werden kann, ist die Dynamik der Temperaturen im Keller und Dachgeschoss relativ gering. Somit sind die Randbedingungen für die Simulation des Erdgeschosses nach oben und unten relativ einfach über die Temperaturdifferenz, den Bauteilaufbau und die entsprechenden Wärmebrücken modellierbar.





Abbildung 1: Experimentierhaus, Ostansicht

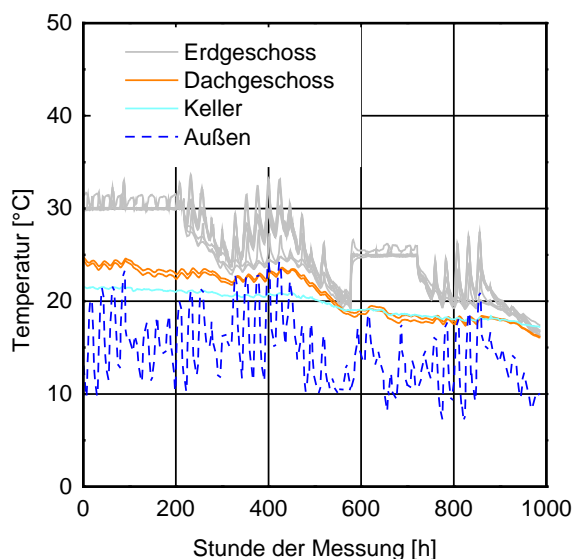


Abbildung 2: Temperaturen des Kellers, Erd- und Dachgeschosses eines der Zwillingshäuser

### Messplan

Die Teilmodelle der Gebäudesimulationsprogramme, die in dieser Validierung überprüft werden, beziehen sich im Wesentlichen auf die thermische Speicherung, der Wärmeleitung durch Bauteile und Materialien, der Interaktion zwischen einzelnen Räumen, Lüftung und Infiltration, die solaren Wärmegevinne, die Verschattung, der Heizung und der Berechnung klimatischer Randbedingungen, wie der Solarstrahlungsverteilung auf geneigte Flächen und der langwelligen Himmelstemperatur. Das hier entwickelte Validierungsszenario ist in vier unterschiedliche Perioden mit einer vorangehenden Initialisierungsphase unterteilt, wie Abbildung 3 und Tabelle 1 entnommen werden kann.

Während der Initialisierungsphase werden beide Häuser auf 30 °C beheizt, um identische und genau definierte Anfangsbedingungen zu erhalten. Diese ungewöhnlich hohen Innenraumtemperaturen werden gewählt, da die Messung auf Grund der Verfügbarkeit der Zwillingshäuser im Sommer 2013 durchgeführt werden.

In der ersten Messphase werden die Raumlufttemperaturen, wie in der Initialisierungsphase, auf 30 °C beheizt und die Heizleistung entsprechend geregelt. Die in dieser Phase gemessenen Raumlufttemperatu-

ren dienen als Eingangsgrößen für die zu validierenden Simulationsprogramme. Die erforderliche Heizleistung stellt die zu validierende Größe dar. In dieser Validierungsphase ist der Zusammenhang zwischen den erwünschten Gebäudetemperaturen und der resultierenden Energiezufuhr im Speziellen relevant. Dieses Szenario beschreibt die typische Betriebsweise einer Heizungs- und Kühlungsregelung.

In der zweiten Phase wird ein zufällig geordnetes logarithmisches binäres Signal (ROLBS) auf die Heizung des Wohnzimmers aufgeprägt. Die Höhe dieser Wärmezugabe wechselt zwischen 0 W und 500 W. Die Verwendung einer pseudo-zufälligen Folge von Wärmezugaben stellt sicher, dass diese Impulse und die auf sie folgende Reaktion unkorreliert mit den solaren Wärmegevinnen sind. Dies erleichtert im Rahmen der Analyse die Trennung zwischen Transmission, Wärmespeicherung und solaren Wärmegevinnen. Diese zweiwöchige Phase beinhaltet Heizimpulse mit 1 - 90 Stunden Dauer, um den Bereich aller, aus den durchgeführten Simulationen bekannter, Zeitkonstanten der Zwillingshäuser abzudecken. Das Konzept der ROLBS Testsequenz wird in dem EC COMPASS Projekt (van Dijk und Tellez 1995) entwickelt. Die langen Impulse in der Experimentierhaussequenz sind der hohen thermischen Masse dieser Gebäude und der resultierenden langen Zeitkonstanten begründet. Während der ROLBS Phase wird ausschließlich das Wohnzimmer beheizt, alle anderen Räume sind frei schwingend. Die Heizenergie der ROLBS Phase wird den Simulationsprogrammen zur Verfügung gestellt während die Raumlufttemperaturen aller Erdgeschossräume vorhergesagt werden sollen. In dieser Phase wird die Modellreaktion auf zusätzliche, Energiezugaben geprüft. Dies tritt häufig in Simulationen auf, meist um interne Wärmegevinne durch Personen und Geräte darzustellen. Da in dieser Phase nur das Wohnzimmer beheizt wird kommt auch der Interaktion zwischen den einzelnen Räumen, vor allem zwischen den Zu- und Ablufträumen, eine besondere Bedeutung zu.

Bei der dritten Phase handelt es sich wiederum um eine Konstanttemperaturphase. Diese Phase dient unter anderem dem Zweck, die beiden Gebäude wieder auf ein gemeinsames Ausgangsniveau zu bringen. Während dieser Phase wird die Solltemperatur auf 25 °C reduziert, da zu dieser Jahreszeit niedrigere Außenlufttemperaturen erwartet werden. Auch für diese Konstanttemperaturphase werden die gemessenen Raumlufttemperaturen als Randbedingungen bereitgestellt während der resultierende Heizenergieverbrauch der einzelnen Räume berechnet werden soll.

In der vierten Phase werden die Räume nicht beheizt, die Raumlufttemperaturen sind also frei schwingend und sollen mit Hilfe der zu validierenden Simulationsprogramms vorhergesagt werden. Die korrekte

Prädikation frei schwingender Raumlufttemperaturen ist vor allem für Bewertungen zum sommerlichen Wärmeschutz und Überhitzungsproblematiken relevant.

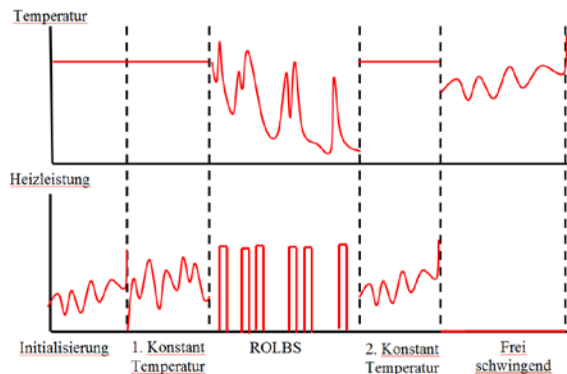


Abbildung 3: Schematischer Messplan

Tabelle 1: Messplan

Tage		Rollläden (Südfassade)	
		Haus O5	Haus N2
1-22	Initialisierung – Konstante Temperatur – 30°C in allen Räumen	unten	unten
23-29	Konstante Temperatur – 30°C in allen Räumen	oben	unten
30-44	ROLBS Sequenz im Wohnzimmer. Keine Heizung in den restlichen Räumen	oben	unten
45-50	Konstante Temperatur – 25°C in allen Räumen	unten	unten
51-61	Frei-schwingend	oben	unten

### Gebäudeausrüstung

Beide Zwillingshäuser sind mit einer hochentwickelten SPS-Steuerung ausgestattet, die auch in der Lage ist, die installierten Sensoren mit der für wissenschaftliche Zwecke erforderlichen Genauigkeit abzutasten. Alle Sensoren werden sekundlich erfasst, diese Daten werden anschließend zu 1-Minuten Mittelwerten zusammengefasst und auf dem Messdatensystem abgelegt. Für die Durchführung der Validierungen werden diese Messdaten sowohl als 10-Minuten als auch als Stundenmittelwerte zu Verfügung gestellt. Die benötigte Heizleistung wird mit Hilfe von phasenmoduliert regelbaren 2 kW Elektrokonvektoren eingebracht. Alle Fenster der Zwillingshäuser sind mit elektrischen Rollläden ausgestattet. Im Erdgeschoss sind alle Rollläden an den Ost- West- und Nordfassaden permanent geöffnet. Die südlichen Rollläden sind in einem der beiden Zwillingshäuser permanent, in dem anderen nur während der Initialisierungs- und der beiden Konstanttemperaturphasen geschlossen. Wie Abbildung 4 entnommen werden

kann, findet der Luftwechsel der drei nördlichen Räume Eingang, Küche und Schlafzimmer ausschließlich durch Infiltration durch die Fenster und die geschlossenen und zusätzlich abgedichteten Innentüren statt. Die restlichen, südlichen Räume werden über eine mechanische, druckneutrale Lüftungsanlage versorgt, wie ebenfalls in Abbildung 4 dargestellt ist. Die Zuluft wird mit 120 m<sup>3</sup>/h in das Wohnzimmer eingebracht während die Abluft mit 60 m<sup>3</sup>/h asymmetrisch aus Bad und Kinderzimmer abgesaugt wird. Diese Volumenströme werden durch phasenmoduliert geregelte Lüfter-Motoren konstant gehalten. Die Zulufttemperatur des Wohnzimmers wird als Randbedingung für die Simulationsprogramme zur Verfügung gestellt. Der Zugang zum Dachgeschoss ist (zweitürige gedichtete Dachluke) ist während der gesamten Messung geschlossen. Der Zugang zum Keller erfolgt über eine Außentreppe.

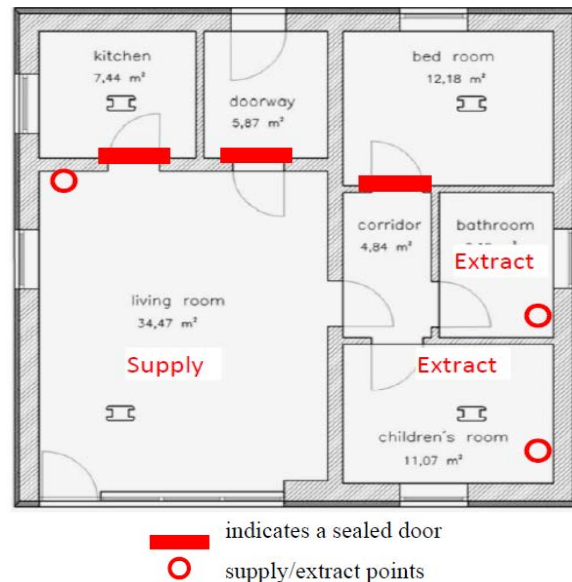


Abbildung 4: Grundrissplan des Erdgeschosses inklusive Lüftungskonzept.

### Sensorik

Die hier vorgestellten Messungen werden während der Monate August und September 2013 durchgeführt. Um das Verhalten der beiden Experimentierhäuser zu erfassen, ist jedes der beiden Gebäude mit den folgenden Sensoren ausgestattet. Alle diese Sensoren werden vor Messbeginn kalibriert. Die zu erwartende Messunsicherheit ist jeweils in Klammern angegeben:

- Lufttemperatur in allen 7 Räumen auf einer Höhe von 125 cm (inkl. Strahlungsschutz; ±0.12 K)
- Zusätzliche Lufttemperaturen im Wohnzimmer auf 67 cm und 187 cm Höhe (inkl. Strahlungsschutz; ±0.14 K)
- Lufttemperaturen im Keller und in den beiden Räumen des Dachgeschosses (±0.14 K)

- Relative Luftfeuchte im Wohnzimmer ( $\pm 2.3 \%$ )
- Frisch-, Zu- und Ablufttemperaturen; gemessen im Keller ( $\pm 0.04 \text{ K}$ )
- Heizleistung aller 6 beheizten Räume ( $\pm 1.5 \%$ )
- Leistungsaufnahme des Zu- und des Abluftventilators ( $\pm 1.5 \%$ )
- Lüftungsvolumenströme ( $\pm 3.5 \text{ m}^3/\text{h}$ )
- Wärmestrom durch die Westfassade ( $\pm 0.65 \text{ W}/\text{m}^2$ )
- Westwandtemperaturen der Innen- und Außenoberfläche sowie zwischen Mauerwerk und Dämmung ( $\pm 0.14 \text{ K}$ )

Die folgenden Klimarandbedingungen werden von der institutsinternen Wetterstation des IBP als Randbedingungen zur Verfügung gestellt. Diese Sensoren werden in regelmäßigen Abständen gemäß der Herstellerempfehlung rekali­briert:

- Außenlufttemperatur ( $\pm 0.10 \text{ K}$ )
- Relative Feuchte der Außenluft ( $\pm 2.0 \%$ )
- Erdreichtemperaturen in Tiefen von 0, 50, 100 und 200 cm
- Windgeschwindigkeit (in 10 m Höhe;  $\pm 0.1 \text{ m/s}$ )
- Windrichtung (in 10 m Höhe;  $\pm 1.0^\circ$ )
- Solare Strahlungsleistungen: Global, diffuse und vertikal (Norden, Osten, Süden, Westen) ( $\pm 2.0 \%$ )
- Langwellige atmosphärische Gegenstrahlung (horizontal und west; Unsicherheit  $< 34 \text{ W}/\text{m}^2$ )

### Qualitätskontrolle

Um qualitativ hochwertige Messdaten zu erhalten, muss der Zustand des Versuchsstands und der Messausrüstung genau bekannt sein. Der erste Schritt bei der Qualitätssicherung ist die Kalibrierung aller verwendeten Sensoren und Datenlogger. Die angegebenen Messunsicherheiten aller Instrumente sind weiter unten in diesem Dokument angegeben.

Es wird ein Differenzdrucktest zur Bestimmung der Luftdichtheit der beiden Gebäude durchgeführt. In jedem Haus werden zwei separate Messungen durchgeführt. Mit Hilfe der erste wird das gesamt Erdgeschoss bewertet. Die ermittelten  $n_{50}$ -Werte liegen mit  $1,62 \text{ h}^{-1}$  und  $1,54 \text{ h}^{-1}$  sehr nah am Anforderungswerte gemäß EnEV für Gebäude mit mechanischen Lüftungsanlagen ( $1,50 \text{ h}^{-1}$ ). Diese gemessenen  $n_{50}$ -Werte kann man abschätzend in Infiltrationsluftwechsel von  $0,113 \text{ h}^{-1}$  und  $0,108 \text{ h}^{-1}$  umrechnen (EN ISO 13789). Der rechnerische Unterschied der Infiltrationsluftwechsel zwischen den beiden Experimentierhäuser beträgt also ca. 5 %. Da die Messunsicherheit dieser Differenzdruckmessungen gem. EN 13829 etwa 14 %

beträgt, sind die errechneten Infiltrationsluftwechselraten der beiden Gebäude als gleichwertig anzusehen. Ein weiterer Druckdifferenztest wird durchgeführt, um die Luftdichtheit der südlichen Räume mit offenen internen Türen (Bad, Flur, Wohn- und Kinderzimmer) zu ermitteln. Gemäß späterem Validierungsszenario sind bereits die Türen zwischen Wohnzimmer und Küche sowie zwischen Flur und Schlafzimmer luftdicht abgeklebt. Mit in der Terssentüre installiertem Druckgebläse werden nun  $n_{50}$ -Werte von  $2,2 \text{ h}^{-1}$  und  $2,3 \text{ h}^{-1}$  ermittelt.

In einem dritten Schritt wird der real gemessene Heizenergieverbrauch der beiden Zwillingshäuser bei komplett geschlossenen Rollläden und identischer Innentemperatur verglichen. Wenn hier beide Gebäude ein identisches Verhalten aufweisen kann angenommen werden, dass weder die Konstruktionen noch die Materialien bislang nicht erkannte Schwachstellen aufweisen. In Abbildung 5 ist das Verhalten beider Häuser während dieser Nullmessung dargestellt. Aufsummiert über die gesamte Nullmessperiode von 8 Tagen unterscheiden sich Heizenergieverbrauch der beiden Häuser um ca. 0,5% (schwarze Linie der kumulierten Abweichung).

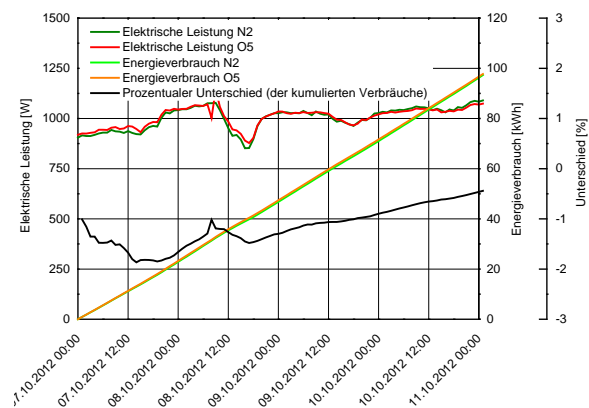


Abbildung 5: Energetisches Verhalten der Zwillingshäuser während der Nullmessung

### ZUSAMMENFASSUNG

Innerhalb des IEA ECB ANNEX 58 "Reliable building energy performance characterisation based on full scale dynamic measurement" wird ein neues messtechnisches Szenario zur Validierung der Genauigkeit und Zuverlässigkeit von thermisch-dynamischen Gebäudesimulationsprogrammen entwickelt. Dieses basiert auf qualitativ hochwertigen Messdaten in Verbindung mit einer detaillierten Dokumentation der Randbedingungen. Die Messungen werden an den beiden identischen Zwillingshäuser des Fraunhofer-Instituts für Bauphysik IBP am Standort Holzkirchen durchgeführt. Die Validierung besteht aus vier verschiedenen Phasen mit jeweils unterschiedlichen Konfigurationen von Raumlufttemperaturen, Rollladenbetrieb und Heizszenarien. Der

erste Schritt bei der Validierung ist eine „blinde“ Modellierung, bei der die teilnehmenden Simulationspartner zwar die Eingabedaten aus den Messungen nicht jedoch die Ergebnisse erhalten. Im nächsten Schritt werden auch die Ergebnis-Messdaten für die Fehlersuche in den Simulationsmodellen zur Verfügung gestellt. Durch diese Trennung zwischen Modellbildung und Fehlersuche und der Tatsache, dass alle Änderungen während der Fehlersuche physikalische begründet werden müssen wird verhindert, dass eine generische Optimierung der Modellparameter hin auf die gesuchten Verläufe vorgenommen wird. Dies ermöglicht die Identifikation und Eliminierung der Eingabefehler der Nutzer. Der Vergleich der simulationstechnisch vorhergesagten Verläufe von Raumlufttemperaturen und Heizleistungen mit den gemessenen Verläufen ermöglicht nun eine Abschätzung der Vorhersageunsicherheiten auf Grund von Modellannahmen und Programmierfehlern des jeweiligen Gebäudesimulationsprogramms ohne die Berücksichtigung der Einflüsse von Bewohnern.

Die im Rahmen des hier vorgestellten Validierungsszenarios erstellten Messdatensätze können zusammen mit ihrer detaillierten Dokumentation für Programmentwickler eine signifikante Hilfestellung sein, da hiermit nun erstmalig qualitativ hochwertige Datensätze zur Validierung von ganzen Gebäudemodellen zur Verfügung stehen.

In den kommenden Monaten wird eine vollständige Spezifikation des Messaufbaus in den Zwillingshäusern, der Messdaten, des anzuwendenden Validierungsverfahrens inklusive der Daten selbst und zulässigen Abweichungen veröffentlicht. Einige Validierungsteams nehmen bereits mit ihren jeweiligen Gebäudesimulationsprogrammen an der Validierung teil. Weitere Publikationen werden diese Ergebnisse der einzelnen Teams erläutern und die Unterschiede der Validierungsergebnisse des selben Programms durch unterschiedliche Bearbeiter-Teams herausarbeiten. Zusätzlich sind weitere Publikationen der einzelnen Validierungsteams zu erwarten die vor allem deren Prozess der Fehlersuche detailliert erläutern.

## LITERATUR

ASHRAE 140-2001: Standard Method of Test for the Evaluation of Building Energy Analysis Computer Programs.

DIN 4108-4:2013-02: Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden - Teil 4: Wärme- und feuchteschutztechnische Bemessungswerte.

DIN V 18599-2:2007-02: Energy efficiency of buildings – Calculation of the net, final and primary energy demand for heating, cooling, ventilation, domestic hot water and lighting – Part 2: Net energy demand for heating and cooling of building zones.

EN 13829:2000: Thermal performance of buildings. Determination of air permeability of buildings. Fan pressurization method.

EN 15255:2007: Energy performance of buildings - Sensible room cooling load calculation - General criteria and validation procedures.

EN 15265:2007: Energy performance of buildings - Calculation of energy needs for space heating and cooling using dynamic methods - General criteria and validation procedures.

EN ISO 13789:2007: Thermal performance of buildings - Transmission and ventilation heat transfer coefficients - Calculation method

EnEV 2009: Energieeinsparverordnung 29. April 2009

IEA EBC Annex 58, Reliable Building Energy Performance Characterisation Based on Full Scale Dynamic Measurements  
<http://www.ecbcs.org/annexes/annex58.htm>

IEA EBC Annex 42, The Simulation of Building-Integrated Fuel Cell and Other Cogeneration Systems (COGEN-SIM)  
<http://www.ecbcs.org/annexes/annex42.htm>

IEA EBC Annex 43/ SHC Task 34, Testing and Validation of Building Energy Simulation Tools,  
<http://www.ecbcs.org/annexes/annex43.htm>

ISO 13791:2012: Thermal performance of buildings - Calculation of internal temperatures of a room in summer without mechanical cooling - General criteria and validation procedures.

ISO 13790:2008: Energy performance of buildings - Calculation of energy use for space heating and cooling.

Jensen S O (ed), Validation of Building Energy Simulation Programs, Part I and II, Research Report PASSYS Subgroup Model Validation and Development, CEC, Brussels, EUR 15115 EN, 1993.

Judkoff, R., Neymark, J. 1995. International Energy Agency Building Energy Simulation Test (BESTEST) and Diagnostic Method, NREL, Colorado USA.

Judkoff R, Wortman D, O'Doherty R and Burch J, A Methodology for Validating Building Energy Analysis Simulations, SERI/TR-254-1508, Golden, Colorado, USA: SERI (now NREL), 1983.

van Dijk, H.A.L. and Tellez, F.M, Measurement and Data Analysis Procedures, Final Report of the JOULE II COMPASS Project (JOU2-CT92-0216), 1995.