

# Planungs-Tool für Passivhäuser - Monatsbilanzverfahren und hygrothermische Simulation

Florian Antretter\*, Katrin Klingenberg\*, Matthias Pazold\*, Dr. rer. nat. Harald Krause\*  
Dr.-Ing. Andreas Holm\*, Dr.-Ing. Hartwig Künzel\*

## KURZFASSUNG

Eine energieeffiziente Entwicklung und Sanierung des Gebäudebestands wird als eine Schlüsselkomponente für eine erfolgreiche Energiewende in Deutschland angesehen. Um dieses Ziel zu erreichen, sind zuverlässige Baukonzepte notwendig. Ein etablierter Ansatz ist das Passivhaus Konzept. Bei dessen Anwendung sollen kosteneffiziente, dauerhafte, komfortable und nachhaltige Konstruktionen entstehen.

Die Praxis zeigt, dass sowohl in Deutschland als auch bei der Übertragung der Prinzipien in andere Klimazonen Herausforderungen entstehen können, die neuer Lösungen bedürfen. Vor allem die detaillierte Komfortbewertung, die Berücksichtigung von Kühlung und Entfeuchtung sowie die hygrothermische Beurteilung von Bauteilen ist mit dem bestehenden Monatsbilanzverfahren nicht oder nur beschränkt möglich.

Der vorliegende Artikel beschreibt die historische Entwicklung des Passivhaus Konzepts, daraus resultierende Herausforderungen und in einem nächsten Schritt die Kombination des Monatsbilanzverfahrens zum Passivhausdesign mit einem dynamischen Gebäudesimulationsmodell, um verbesserte Lösungen entwickeln zu können. Die zu Grunde liegende Methodik des stationären Ansatzes und der dynamischen hygrothermischen Simulation wird beschrieben. Daraus erschließt sich die Herangehensweise zur Kopplung beider Methoden. Gemeinsam nutzbare Eingaben, wie z. B. die Gebäudegeometrie, Bauteilaufbauten oder die technische Gebäudeausrüstung werden nur einmal festgelegt. Weitere Informationen, z. B. Sollwertstellungen, innere Lasten, Lüftung oder Verschattung, können aus dem stationären Ansatz in die dynamische Berechnung übernommen werden. Hier ist es aber oft sinnvoll, zeitlich feiner aufgelöste Profile für eine detailliertere Beurteilung einzugeben.

An einem Anwendungsbeispiel wird die Umsetzung gezeigt und es wird erläutert, welche Ergebnisse sich durch die neu entwickelte Software erzielen lassen. Die Vorteile der Kombination eines schnellen stationären Ansatzes mit einer dynamischen hygrothermischen Simulation, beide Berechnungen basierend auf ein und demselben Gebäudemodell, werden hervorgehoben. Somit ergibt sich auch ein Schluss über mögliche Anwendungsgebiete und -grenzen der neu entwickelten Software.

## Historische Entwicklung und aktuelle Zielsetzung

Gebäude verursachen einen beträchtlichen Teil des weltweiten Energieverbrauchs. In Deutschland wurde 2011 rund 31 % der Primärenergie für die Konditionierung von Gebäuden und Warmwasserbereitstellung eingesetzt [BMWI, 2013]. Dieser Energiebedarf kann durch eine Verbesserung der Gebäudehülle und durch eine Berücksichtigung der Wechselwirkung von technischer Gebäudeausrüstung und Gebäude verringert werden. Um dies berechenbar zu machen, werden in der Praxis häufig vereinfachende Monatsbilanzverfahren eingesetzt. Speziell das Energiekonzept zum Design und zur Zertifizierung von Passivhäusern bietet eine umfassende Methodik, um die Beeinflussung der Gebäudehülle und die daraus resultierende Auslegung der Gebäudetechniksysteme abzubilden.

Das Passivhaus Konzept ist ein quantitatives, funktionell definiertes Energiekonzept für Gebäude. Die zu Grunde liegenden Prinzipien wurden in den USA in den 70er Jahren als Konsequenz der Ölkrise entwickelt [Shurcliff, 1982, Shurcliff, 1988]. Schon damals wurde diese Art des energieeffizienten Gebäudedesigns als ausgereift beschrieben, mit dem Hinweis, dass weitere Entwicklungen in Fenstertechnologie, bei Dampfbremsen und bei kompakten Anlagen-techniksystemen zu erwarten sind.

Die Grundlagen der Energiebilanzierung wurden Mitte der achtziger in der Schweiz veröffentlicht. Anfang der 90er Jahre führte Wolfgang Feist in Europa die Forschung und Entwicklung fort [Feist, 1992]. Seine Forschungen förderten die notwendigen Verbesserungen an Passivhaus Komponenten, die Shurcliff vorhergesagt hatte. Der entwickelte Standard wurde schnell in ganz Europa erfolgreich und wird von vielen als der führende Standard für energieeffizientes Gebäudedesign weltweit betrachtet.

Allerdings wurde eine der originalen Definitionen von Shurcliff, nämlich „prevention of moisture migration into cold regions within the wall, and other regions where much condensation could occur“ [Shurcliff, 1986], also die Sicherstellung, dass feuchtebedingte Probleme verhindert werden, in den späteren europäischen Definitionen nicht direkt übernommen. Die Notwendigkeit eines ausgefeilten hygro-

\* Siehe Autorenliste auf Seite 13

thermischen Designs der Bauteile, die für die vielfältigen Klimazonen Amerikas augenfällig ist, wurde in Europa lange nicht als ähnlich hoch eingestuft. Bei Übertragung des Konzepts auf andere Klimaregionen der Erde ist die hygrothermische Bauteil- und Gebäudebeurteilung jedoch wieder ausschlaggebend, um funktionsfähige Bauteile sicherzustellen und die Verbreitung des Konzepts voranzutreiben. Zudem gewinnt der Einfluss von Kühlung und Entfeuchtung auf den gesamten Gebäudeenergiebedarf in vielen Klimazonen an Bedeutung. Daraus resultieren weitere Anforderungen an die hygrothermischen Bedingungen im Gebäude, die man in Zentraleuropa nicht oder nur bedingt stellen muss, die aber in vielen Klimazonen notwendig zur Komfortbeurteilung sind.

Aktuell wird deshalb in Projekten zur Planung und zur Zertifizierung von energieeffizienten, komfortablen und schadensfreien Gebäuden oft ein mehrstufiger Ansatz verfolgt. In einem ersten Schritt wird für das energetische Design ein Monatsbilanzverfahren angewendet. Dieses verwendet pro Monat konstante Werte, z. B. für die Außentemperatur, um den Energiebedarf zu berechnen und verschiedene konzeptionelle Ansätze für das Gebäude miteinander zu vergleichen. Diese Methoden vernachlässigen aber alle instationären Effekte wie z. B. die Auswirkung thermischer Masse auf die kurzzeitigen Temperaturschwankungen und den Energiebedarf. Eine umfassende Komfortbeurteilung ist daher nicht möglich. Deshalb wird in einem nächsten Schritt ein dynamisches Gebäudesimulationsmodell eingesetzt, welches stündliche Werte nutzt um das dynamische Verhalten des Gebäudes abzubilden. Oft werden neue und innovative Materialien und Bauteilaufbauten verwendet, um die strengen energetischen Anforderungen einzuhalten. Deshalb wird ein dritter Schritt notwendig: Die hygrothermische Beurteilung der Bauteile um deren dauerhafte Schadensfreiheit sicherzustellen. Hierzu wird für die kritischen Bauteile eine hygrothermische Bauteilsimulation durchgeführt. Da für alle drei Schritte unterschiedliche Software benutzt wird, ist ein großer zeitlicher Aufwand notwendig, um alle Informationen mehrfach einzugeben. Dies birgt zusätzliches Potential für Fehler bei der Übertragung und beim Abgleich der Daten.

Wünschenswert ist deshalb ein Werkzeug, das es ermöglicht alle drei Schritte basierend auf einem einzigen Gebäudemodell durchzuführen. Es soll zum bestmöglichen Design von energieeffizienten Gebäuden unter Verwendung schneller Bilanzverfahren und detaillierter dynamischer Simulation anwendbar sein. Zusätzlich soll es nach einer anerkannten Methodik die Zertifizierung von Gebäuden erlauben. Die Entwicklung eines solchen Werkzeugs wird nachfolgend beschrieben.

## Passiv Haus Prinzip

Das Passivhaus Design Konzept basiert auf den folgenden vier Grundprinzipien:

- a) exzellente durchgängige thermische Dämmung der gesamten Gebäudehülle, einschließlich aller Wärmebrücken,
- b) luftdichte Gebäudehülle zur Vermeidung von ungewolltem Luftwechsel und konvektivem Feuchteintrag in die Bauteile,
- c) Hochleistungs-Fenster, mit an die Klimaregion angepassten Fensterflächen und -eigenschaften,
- d) konstante Frischluftzufuhr durch mechanische Lüftungsgeräte mit Wärme- und evtl. Feuchterückgewinnung (in den meisten Klimaregionen).

Wenn möglich, sollte die gesamte Gebäude-Konditionierung mit dem mechanischen Lüftungssystem bewerkstelligt werden. Neben einer optimalen Heizung und Kühlung der Räume werden damit auch Investitionskosten für eine sonst übliche separate Heiz- oder Kühlanlage mit entsprechenden Verteilungssträngen eingespart.

Passivhäuser zeichnen sich auch durch kosteneffiziente, dauerhafte, komfortable und nachhaltige Konstruktionen aus. Nach aktuell bestehenden europäischen Bestimmungen wird der Heiz- und Kühlbedarf auf jeweils 15 kWh/m<sup>2</sup> im Jahr, oder eine maximale Heiz- oder Kühllast von 10 W/m<sup>2</sup> beschränkt. Diese Anforderungen führen im Vergleich zu typischen neuen europäischen Gebäuden zu einem deutlich reduzierten Energiebedarf, bei gleichzeitiger Steigerung der Behaglichkeit in den Gebäuden. Im Vergleich liegt der Median-Wert für den Heizwärmebedarf der Gebäude in Deutschland im Jahr 2011 bei 127,8 kWh/(m<sup>2</sup>a) [Barkholz, Michelsen, 2012]. Neben dem Heiz- und Kühlenergiebedarf wird mit dem Standard ebenfalls der Primärenergieaufwand für Heizung, Kühlung, Warmwasserbereitung und sämtlicher Stromverbraucher, wie z. B. Haushaltsgeräte begrenzt. Diese Grenze liegt bei 120 kWh/m<sup>2</sup> im Jahr.

Der Passivhaus Standard basiert auf der Strategie der Vermeidung von Energiebedarf. Durch die hochdämmende und dichte Gebäudehülle und die Nutzung von passiven Solargewinnen kann der Aufwand für die Anlagentechnik zum Heizen und ggf. Kühlen deutlich reduziert werden. Somit lassen sich auch Null- oder Plusenergiegebäude mit vertretbarem Aufwand realisieren. Etwa 50 % der bekannten Nullenergiegebäude in kühleren Klimaregionen adaptieren unabhängig vom Gebäudetyp das Konzept des Passivhauses [Musall, Voss, 2011]. Durch Integration einer Fotovoltaikanlage kann bei Passivhäusern im Allgemeinen der gesamte Energiebedarf für Heizung, Warmwasser, Kühlung und elektrische Geräte in der Jahresbilanz

gedeckt werden. Der Passivhausstandard ist somit eine günstige Voraussetzung, um Plusenergiegebäude einfach und kosteneffizient zu realisieren.

## Energiebilanz für Passiv Häuser

Die zu Grunde liegende Berechnungsmethodik des Passivhausstandards ist eine genaue monatsbasierte Bilanzierung der thermischen Energieströme durch die Gebäudehülle, zuzüglich aller inneren Wärmegewinne oder -verluste. In kühlen Klimaregionen sollten die Transmissionswärmeverluste in etwa gleich der Summe aus inneren und solaren Wärmegewinnen sein. Nur ein kleiner Teil des Heizbedarfs sollte per Anlagentechnik gedeckt werden. Wenn laut IECC 2012 101.5.2 [International Code Council, 2012] nach Aufstellen der Bilanz die notwendige Spitzenheizleistung unter  $1 \text{ W/m}^2$  liegt, ist keine zusätzliche Heizanlage notwendig. Dabei wird angenommen, dass die inneren Wärmegewinne der typischen Wohnung diesen geringen Bedarf decken. Gleiches gilt für die Kühlung, für die ebenfalls eine Bilanzierung erfolgt. Jedoch sind in diesem Fall die Wärmegewinne nicht hilfreich zur Reduzierung des Kühlbedarfs, sondern nur die geringen Transmissionswärmeverluste oder die Wärmeabfuhr durch Nachtlüftung.

Auf dem Markt hat sich in der Vergangenheit nur ein Berechnungstool etabliert, speziell entwickelt zur einfachen Bilanzierung beziehungsweise Projektierung von Gebäuden nach dem Passivhaus-Standard und den entsprechenden Grundprinzipien: Das Passivhaus Projektierungspaket (PHPP) des Passivhaus Instituts (PHI) [Feist et.al 2007]. Das Planungstool verwendet Excel® als Programmbasis und berechnet den Jahresbedarf mit Monats-Bilanzen. Zur Abschätzung des gesamten Jahresbedarfs ist das Monatsbilanzverfahren ausreichend. Zur Ermittlung von Heiz- und Kühllasten wurden bestehende Berechnungsverfahren weiterentwickelt und ergänzt, die auf den Ergebnissen instationärer Simulationsmodelle beruhen, welche wiederum zuvor durch Messdaten aus gebauten Passivhäusern validiert wurden [passipedia, 2013].

Für Regionen außerhalb Mitteleuropas mit deutlich anderen Klimabedingungen, in die das Konzept übertragen wird, obwohl es ursprünglich nicht dafür ausgelegt war, sind aus folgenden Gründen Anpassungen nötig:

1. Zur Beurteilung der Kühllast und des Kühlbedarfs und damit verbundener Entfeuchtungs-Anforderungen ist das Verfahren bisher nur ausreichend für mäßig kalte und kalte Klimaregionen validiert. Für wärmere Regionen liefert eine dynamische Gebäudesimulation deutlich realistischere Ergebnisse und ermöglicht eine raumweise Betrachtung, die sich insbesondere bei leichten Bauweisen als notwendig herausstellt.
2. Gebiete mit hoher solarer Einstrahlung und dadurch hohen inneren Wärmegewinnen bzw. Lasten stellen eine Herausforderung für die Energiebilanzierung dar. Bei jüngsten Projekten traten häufig unbehaglich hohe Innenraumtemperaturen besonders in den Übergangsmontaten auf.
3. Als Werkzeug zur Energiebilanzierung liefert das bestehende Verfahren keine Möglichkeit zur Beurteilung der in den meisten Klimaregionen bestehenden Feuchteschadensrisiken aufgrund von hygrothermischen Transportphänomenen in Außenbauteilen. Die hygrothermische Bemessung von Bauteilen ist notwendig um beispielsweise Feuchtigkeitsanreicherungen in hervorragend gedämmten Bauteilen vorzubeugen. Stark schwankende und unterschiedliche klimatische Beanspruchungen erfordern deutlich unterschiedliche feuchteregulierende Maßnahmen, nicht zuletzt bei der Auswahl und dem Schichtaufbau der eingesetzten Materialien. Aussagen über die Behaglichkeit bezüglich der inneren Raumfeuchte können ebenfalls nicht getroffen werden.

Das aus der Historie und den beschriebenen Beschränkungen resultierende Ziel ist die Entwicklung einer einfach zu bedienenden Simulationsumgebung. Diese soll den Nutzer bei Dateneingabe sowie bei Ergebnisausgabe und -bewertung unterstützen. Sie soll schnelle Ergebnisse durch Anwendung der anerkannten Methodik zur Passivhausbilanzierung für die energetische Gebäudeauslegung berechnen, aber auch die dynamische Simulation von Gebäuden zur detaillierteren energetischen Analyse, zur Komfortabschätzung aber auch zur Beurteilung der Schadensfreiheit der Gebäudehülle ermöglichen.

## Methodik der Simulation

In diesem Abschnitt soll ein Einblick in die Berechnung, einschließlich grundlegender Gleichungen, für das stationäre Verfahren und für das dynamische Verfahren gegeben werden. Weiterführend wird die Kombination beider Verfahren in einer Anwendungssoftware zur Beurteilung des Energiebedarfs, des Komforts und des hygrothermischen Verhaltens von Gebäuden und Bauteilen, WUFI® Passive, vorgestellt.

## Stationäres Monatsbilanzverfahren

Das Monatsbilanzverfahren beruht auf Bauteilgruppen mit spezifischen, zusammengefassten Wärmeübergangskoeffizienten, Temperaturdifferenzen und betrachteten Zeitperioden. Die Grundlage dafür liefert das vereinfachte Verfahren der [DIN EN ISO 13790]. Der Wärmeübergangskoeffizient opaker Bauteile wird mit der Wärmeleitfähigkeit und der Materialstärke sämtlicher Materialschichten berechnet oder direkt eingegeben. Die monatlichen Transmissionswärmeverluste und -gewinne werden mit den Wärme-

durchgangskoeffizienten, den Bauteilflächen und der dem Bauteil zugeordneten Temperaturdifferenz berechnet. Die Temperaturdifferenz ergibt sich aus der Soll-Innenraumtemperatur und der mittleren Außenlufttemperatur. Neben der Außenlufttemperatur kann hier die Bodentemperatur für Kellerwände und -böden, oder eine erhöhte oder verringerte Außenlufttemperatur für angrenzende Anbauten außerhalb der thermischen Hülle, wie z. B. Garagen, angesetzt werden. Mithilfe der Temperaturdifferenz werden für einen betrachteten Zeitraum die Heizgradstunden (Gl. 1) nach [Feist et.al. 2007] berechnet. Für die jeweiligen Monats-Heizgradstunden wird die gesamte Stundenanzahl des Monats als Zeitraum gewählt. Die Jahres-Heizgradstunden sind von der monatlichen Differenz zwischen Wärmeverlust und -gewinnen abhängig. Ist diese Differenz für einen Monat größer als 0,1 kWh, wird der Monat bei der Berechnung des Jahres-Heizwärmebedarfs berücksichtigt und die entsprechenden Monats-Heizgradstunden zu den Jahres-Heizgradstunden addiert. Das bedeutet, dass der maßgebende Zeitraum für den Heizwärmebedarf variieren kann. Lüftungswärmeverluste werden ebenfalls berechnet. Maßgebend dafür sind der Außenluftvolumenstrom, die effektive Wärmerückbereitstellung der Wärmerückgewinnung und ebenfalls die Heizgradstunden.

$$G_t = (g_i - g_e) \cdot t / 1000 \quad (1)$$

wobei:

- $G_t$  - Heizgradstunden [kKh]
- $g_i$  - Innenraumtemperatur [°C]
- $g_e$  - Angrenzende Außentemperatur [°C]
- $t$  - Berücksichtigter Zeitraum [h]

Die benötigten Klimadaten enthalten neben Monatsmittelwerten der Außenlufttemperatur auch Solarstrahlungsdaten für die Haupt-Himmelsrichtungen (Norden, Osten, Süden, Westen) und die Globalstrahlung. Jedes Bauteil wird einer dieser Himmelsrichtungen zugeordnet. Neben den Wärmeverlusten über die Bauteile werden auch die Wärmegewinne durch solare Einstrahlung berechnet. Für opake Bauteile ist dafür der Absorptions- und Emissionsgrad erforderlich. Für transparente Bauteile (Fenster) sind detaillierte Angaben zum Fensterrahmen, zur Leibung, zum Überhang und zu sonstigen verschattenden Objekten möglich. Neben dem g-Wert wird damit die Glasfläche und ein Verschattungsfaktor berechnet und folglich das Wärmeangebot infolge Solarstrahlung.

Der Heizwärmebedarf wird mit Gl. 2, nach [Feist et.al. 2007] in Anlehnung an [DIN EN ISO 13790] berechnet. Die monatlichen Wärmeverluste werden mit den Monats-Heizgradstunden, der Jahreswärmeverlust mit den Jahres-Heizgradstunden berechnet.

$$Q_H = (Q_{T,H} + Q_{V,H}) - (Q_{S,H} + Q_{L,H}) \cdot \eta_H \quad (2)$$

mit:

- $Q_H$  - Heizwärmebedarf
- $Q_{T,H}$  - Transmissionswärmeverlust
- $Q_{V,H}$  - Lüftungswärmeverlust
- $Q_{S,H}$  - Wärmeangebot infolge Solarstrahlung
- $Q_{L,H}$  - Innere Wärmequellen
- $\eta_H$  - Nutzungsgrad der Wärmegewinne

Monatliche Wärmegewinne-Nutzungsgrade zeigen auf, welcher Anteil des Wärmeangebotes verwendet werden kann, um den Heizwärmebedarf während der Heizperiode zu senken. Die Nutzungsgrade (Gl. 3) werden mit dem Verhältnis von Wärmeverlust und -angebot (Gl. 4) sowie der thermischen Zeitkonstante des Gebäudes berechnet. Die Zeitkonstante ist von der Wärmespeicherfähigkeit und dem gebäudespezifischen Wärmeverlustkoeffizienten abhängig. Sie wird berechnet mit Gleichung 5, mit der Annahme eines stets beheizten Gebäudes und den dafür vorgesehenen Koeffizienten  $a_0 = 1$  und  $\tau_0 = 16$ .

$$\eta_H = (1 - \gamma_H^{a_H}) / (1 + \gamma_H^{a_H}) \quad (3)$$

$$\gamma_H = (Q_T + Q_V) / (Q_S + Q_I) \quad (4)$$

mit:

- $\eta_H$  - Wärmegewinne-Nutzungsgrad [-]
- $\gamma_H$  - Wärmeverlust, -gewinn Verhältnis für Heizbedarf  $\gamma_H = (Q_T + Q_V) / (Q_S + Q_I)$  [-]
- $a_H$  - Zeitkonstante für Heizbedarf [h]

$$a_H = a_0 + \frac{C / H_{L,H}}{\tau_0} \quad (5)$$

mit:

- $C$  - Innere Wärme-Speicherfähigkeit [Wh/K]
- $H_{L,H}$  - Gesamter Wärmeverlustkoeffizient für Heizbedarf [W/K]
- $a_0, \tau_0$  - definierte Koeffizienten.

Wie mit Gl. 2 gezeigt, berechnet sich der Heizwärmebedarf aus den Transmissionswärmeverlusten (Gl. 6) über alle Gebäudebauteile  $j$  und Wärmebrücken  $k$ , den Lüftungswärmeverlusten (Gl. 7) und den dem Bedarf entgegenwirkenden Wärmequellen infolge Solarstrahlung (Gl. 8) und innerem Wärmeangebot. Sämtliche Grenzwerte des Passivhaus-Standards beziehen sich auf die Energiebezugsfläche. Jeder Bedarf wird daher weitergehend durch die Energiebezugsfläche geteilt und somit der spezifische Bedarf berechnet.

$$Q_T = \sum_j (A_j \cdot U_j \cdot f_{Tj} \cdot G_{t,j}) + \sum_k (L_k \cdot \psi_k \cdot f_{T,k} \cdot G_{t,k}) \quad (6)$$

mit:

- $A_j$  - Bauteilfläche [m<sup>2</sup>]
- $U_j$  - Wärmedurchgangskoeffizient [W/(m<sup>2</sup>·K)]
- $f_{Tj}$  - Temperaturfaktor für abweichende Außentemperaturen [-]
- $G_{t,j}$  - Heizgradstunden [kK·h]
- $L_k$  - Länge der Wärmebrücke [m]
- $\psi_k$  - Linearer Wärmebrücken-Verlust-Koeffizient [W/(m·K)]

$$Q_V = V_{RAX} [n_{V,sys} \cdot (1 - \eta_{SHX}) \cdot (1 - \eta_{HR}) + n_{V,Res}] \cdot c \cdot G_{t,e} + V_{RAX} \cdot [n_{V,sys} \cdot \eta_{SHX} \cdot (1 - \eta_{HR})] \cdot c \cdot G_{t,g} \quad (7)$$

mit:

- $G_{t,e}$  - Heizgradstunden bezogen auf Außenlufttemperatur [kK·h]
- $G_{t,g}$  - Heizgradstunden bezogen auf Bodentemperatur [kK·h]
- $V_{RAX}$  - Effektives Luftwechselvolumen [m<sup>3</sup>]
- $n_{V,sys}$  - Mittlere mechanische Luftwechselrate [1/h]
- $n_{V,Res}$  - Mittlere natürliche Luftwechselrate [1/h]
- $\eta_{HR}$  - Effektiver Wärmebereitstellungsgrad des Lüftungsgeräts [-]
- $\eta_{SHX}$  - Effektiver Wärmebereitstellungsgrad des Erdwärmetauschers [-]
- $c$  - spezifische Wärmekapazität der Luft [J/(kg·K)]

$$Q_s = \sum_{\theta} (r_{\theta} \cdot g_{\theta} \cdot A_{F,\theta} \cdot J_{\theta}) \quad (8)$$

mit:

- $\theta$  - Himmelsrichtung (Norden, Osten, Süden, Westen, Horizontal) [-]
- $r_{\theta}$  - Abminderungsfaktor infolge Verschattung (gemittelt je Himmelsrichtung) [-]
- $g_{\theta}$  - g-Wert (gemittelt je Himmelsrichtung) [-]
- $A_{F,\theta}$  - Fenster Öffnungsfläche (Summe je Himmelsrichtung) [m<sup>2</sup>]
- $J_{\theta}$  - Solare Einstrahlung je Himmelsrichtung [W/m<sup>2</sup>]

toren, Häufigkeiten der Anwendung oder Nutzungsprofile reduziert. Mit der Energie und den Primärenergiefaktoren, abhängig vom jeweils eingesetzten Energieträger, wird der Jahres-Primärenergiebedarf ermittelt.

Ist ein Gerät oder die Anlage innerhalb der thermischen Hülle, wird der Energiebedarf als innere Wärmequelle gutgeschrieben und geht somit direkt in die Gleichung 2 zur Ermittlung des Heizwärmebedarfs ein. Die Wärmeabgabe der Bewohner bzw. Nutzer eines Gebäudes wird ebenfalls als innere Wärmequelle über Anwesenheitsprofile oder Anwesenheitsfaktoren berücksichtigt.

Analog zum Heizwärmebedarf wird der Kühlenergiebedarf berechnet. Ein Unterschied besteht darin, dass nicht die Wärmegewinne über Nutzungsfaktoren abgemindert werden, sondern die Wärmeverluste (Gl. 9). Der Faktor berücksichtigt somit, welcher Anteil der berechneten Wärmeabgabe zur Kühlung beitragen kann. Ein weiterer Unterschied liegt bei der Berechnung der Kühlgradstunden, die als negative Heizgradstunden ausgewiesen werden. Als Innentemperatur wird nicht mehr die Solltemperatur angesetzt, sondern die Sommer-Übertemperaturgrenze, die maximal akzeptierte Innentemperatur. Der Monat Juli wird besonders kritisch begutachtet und in kleinere Zeiträume aufgeteilt, für die die Außentemperatur erhöht wird. Für diese Zeiträume ergeben sich meist negative Heizgradstunden, folglich ein Wärmegewinn über die Gebäudehülle und damit ein zusätzlicher Kühlbedarf.

$$Q_C = (Q_{s,C} + Q_{i,C}) - (Q_{T,C} + Q_{V,C}) \cdot \eta_C \quad (9)$$

mit:

- $Q_C$  - Nutzkältebedarf
- $Q_{T,C}$  - Transmissionswärmeverluste
- $Q_{V,C}$  - Lüftungswärmeverluste
- $Q_{s,C}$  - Solarer Wärmeeintrag
- $Q_{i,C}$  - Innere Wärmequellen
- $\eta_C$  - Wärmeverlust Nutzungsgrad

$$\eta_C = (1 - \gamma_C^{a_C}) / (1 + \gamma_C^{a_C+1}) \quad (10)$$

$$\gamma_C = (Q_s + Q_i) / (Q_T + Q_V) \quad (11)$$

mit:

- $\eta_C$  - Wärmeverlust Nutzungsgrad [h]
- $\gamma_C$  - Wärmegewinn, -verlust Verhältnis für Nutzkältebedarf [-]
- $a_C$  - Zeitkonstante für Nutzkältebedarf [h]

Weiterführend wird berechnet, wie häufig die akzeptierte maximale Innenraumtemperatur im Jahr überschritten wird. Wird die Übertemperaturgrenze mehr als 10 % von einem Jahr überschritten, sind Sonnenschutzmaßnahmen

zur Reduzierung der solaren Wärmegewinne oder aktive Kühlgeräte notwendig.

Zur Dimensionierung der Anlagentechnik und ebenfalls als Passivhaus Kriterium wird die Spitzenheizlast und -kühl-last berechnet. Entsprechend ungünstige Witterungsbedin-gungen für den Sommer und Winter werden dafür ange-setzt. Diese Randbedingungen werden mit den Klimadaten geliefert und bestehen aus einem extrem kalten Tag und einem Tag mit sehr wenig Solarstrahlung zur Ermittlung der Heizlast und einem Tag mit extremer Wärmebelastung zur Berechnung der Kühllast. Die Transmissionswärmever-luste über die Gebäudehülle, sowie Wärmeverluste infolge Lüftung, solare Wärmegewinne und innere Wärmequellen werden berechnet. Der Unterschied zur Bedarfsberechnung besteht darin, dass kein Zeitraum angesetzt wird und auch kein Nutzungsgrad der Wärmegewinne bzw. -verluste eingesetzt wird.

### Dynamisch hygrothermische Gebäudesimulation

Die dynamisch hygrothermische Gebäudesimulation verknüpft einzelne Gebäudebauteile, wie z. B. Wände, Böden und Decken zu einem Gesamtgebäude. Für sämtliche Ge-bäudebauteile, bestehend auch aus verschiedenen zusam-mengesetzten Materialschichten, wie z. B. Holz, Mauerwerk, Dämmung, Folien oder sogar Luftschichten, wird der gegenseitig beeinflussende Wärme- und Feuchtigkeits-transport simuliert [Künzel, 1994]. Wärmeleitung, Wasser-dampfdiffusion und Kapillarleitung werden als Transport-mechanismen berücksichtigt. Die Wärmeleitfähigkeit und der latente Wärmetransport infolge Wasserdampfdiffusion mit Phasenwechsel sind abhängig von den Feuchteverhält-nissen im Bauteil. Der Feuchtetransport innerhalb eines Bauteils ergibt sich aus den Randbedingungen an seinen Oberflächen. Die resultierenden Differentialgleichungen werden mit Hilfe der Finiten-Volumen-Methode diskreti-siert. Das gekoppelte Wärme- und Feuchtetransport Mo-dell WUFI® Pro wurde durch eine Vielzahl von Labor- und Feldversuchen validiert [Künzel, 1994] und entspricht den Vorgaben der [DIN EN 15026]. Die Gleichungen 12 und 13 beschreiben den Wärme- und Enthalpiefluss sowie den Feuchtetransport durch ein Bauteil.

$$\frac{\partial H}{\partial g} \cdot \frac{\partial g}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \cdot \frac{\partial g}{\partial x} \right) + h_v \cdot \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\delta}{\mu} \cdot \frac{\partial p_D}{\partial x} \right) \quad (12)$$

$$\rho_w \cdot \frac{\partial u}{\partial \varphi} \cdot \frac{\partial \varphi}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \rho_w D_\varphi \frac{\partial u}{\partial \varphi} \cdot \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\delta}{\mu} \cdot \frac{\partial p_D}{\partial x} \right) \quad (13)$$

mit:

- $D_\varphi$  - Flüssigkeitstransportkoeffizient [m<sup>2</sup>/s]
- $H$  - Enthalpie des feuchten Baustoffs [J/m<sup>3</sup>]
- $h_v$  - Verdunstungsenthalpie des Wassers [J/kg]
- $\partial p_D$  - Wasserdampfpartialdruck [Pa]
- $\mu$  - Wassergehalt [m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>]

- $\vartheta$  - Temperatur [°C]
- $\lambda$  - Wärmeleitfähigkeit des feuchten Baustoffs [W/(m·K)]
- $\mu$  - Dampfdiffusionswiderstandszahl des trockenen Baustoffs [-]
- $\rho_w$  - Dichte des Wassers [kg/m<sup>3</sup>]
- $\varphi$  - relative Feuchte [-]
- $t$  - Zeit [s]

Die Kopplung aller Gebäudebauteile führt zu einem Multi-Zonen-Gebäudemodell. Eine Zone bildet einen oder meh-rere Räume ab, für die das gleiche Innenklima angenom-men wird. Die Zonengrenzen sind die Bauteile, welche somit die Zonen koppeln. Das Außenklima wird ebenfalls als Zone definiert. Abhängig vom Gebäudestandort wird das Außenklima durch gemessene Wetterdaten fest defi-niert und nicht simuliert, unter der Annahme nicht vom Gebäude beeinflusst zu werden. Neben Außentemperatur und -feuchte sind auch Strahlungs-, Wind- und Regenda-ten notwendig, z. B. zur Berücksichtigung solarer Einstrah-lung oder Schlagregen. Das Innenklima der Gebäudezonen wird simuliert, es wird vom jeweiligen Simulationsergebnis der Bauteilsimulation beeinflusst. Umgekehrt beeinflusst das Zonenklima die Randbedingungen der Bauteilsimula-tionen. Mit jedem Zeitschritt wird für jede Zone die Wär-me- und Feuchtebilanz (Gleichungen 14 und 15) [Lengsfeld, Holm, 2007] aufgestellt. Solange diese nicht erfüllt ist, bzw. innerhalb einer definierten Fehlertoleranz liegt, wird das Innenklima iterativ angepasst. Neben dem Wärme- und Feuchtetransport über die Gebäudehülle werden interne Wärme- und Feuchtequellen und -senken infolge anwesen-der Personen, Beleuchtung, Anlagentechnik, Lüftung und Infiltration und solarer Einstrahlung berücksichtigt und tragen ebenfalls einen Teil zu den Zonenbilanzen bei. Quel-len oder Senken können nicht nur in den Gebäudezonen angesetzt werden, sondern auch direkt innerhalb von Bau-teilschichten, z. B. zur Berücksichtigung einer Wand- oder Fußbodenheizung sowie zur Modellierung des hygrother-mischen Verhaltens hinterlüfteter Fassaden oder begrünter Dachkonstruktionen. Das Bauteil Temperatur- und Feuchte-feld wird dadurch direkt beeinflusst. Kurzwellige direkte und diffuse Solarstrahlung sowie die langwellige Strahlung aus der Umgebung wird von der Gebäudehülle absorbiert und als langwellige Strahlung emittiert. Transparente Ge-bäudebauteile, die Fenster, werden gesondert behandelt. Die Strahlungstransmission ist abhängig vom Sonnenstand und von der Bauteilorientierung. Für verschiedene Sonnen-einfallswinkel lassen sich verschiedene Transmissionsgra-de definieren. Der somit berechnete solare Wärmeeintrag erwärmt zum Teil direkt die Raumluft, wird aber auch den Innenoberflächen der Bauteile zugeschrieben.

$$\rho \cdot c \cdot V \cdot \frac{d\vartheta_i}{dt} = \sum_j A_j \cdot \alpha_j \cdot (\vartheta_j - \vartheta_i) + \dot{Q}_{Sol} + \dot{Q}_{IWQ} + n \cdot V \cdot \rho \cdot c \cdot (\vartheta_a - \vartheta_i) + \dot{Q}_{RLT} \quad (14)$$

mit:

- $\rho$  - Dichte der Raumluft [kg/m<sup>3</sup>]
- $\alpha_j$  - Wärmeübergangskoeffizient [W/(m<sup>2</sup> K)]
- $\vartheta_a$  - Außenlufttemperatur [°C]
- $\vartheta_j$  - Raumumschließungsflächentemperatur [°C]
- $\vartheta_i$  - Innenlufttemperatur [°C]
- $t$  - Zeit [s]
- $A_j$  - Raumumschließungsflächen [m<sup>2</sup>]
- $c$  - spezifische Wärmekapazität der Luft [J/(kg · K)]
- $n$  - Luftwechselrate [h<sup>-1</sup>]
- $\dot{Q}_{Sol}$  - kurzweilige Sonneneinstrahlung, die direkt zur Erwärmung der Innenluft bzw. Inneneinrichtungsgegenstände führt [W]
- $\dot{Q}_{IWQ}$  - innere Wärmequellen durch Personen, Beleuchtung und Geräte [W]
- $\dot{Q}_{RLT}$  - Wärmestrom, der durch raumlufttechnische Anlagen (RLT) zu bzw. abgeführt wird [W]
- $V$  - Raumvolumen [m<sup>3</sup>]

$$V \cdot \frac{dc_i}{dt} = \sum_j A_j \cdot \dot{g}_{wj} + n \cdot V(c_a - c_i) + \dot{W}_{IFQ} + \dot{W}_{RLT} \quad (15)$$

mit:

- $c_a$  - Absolute Feuchte der Außenluft [kg/m<sup>3</sup>]
- $c_i$  - Absolute Feuchte der Innenluft [kg/m<sup>3</sup>]
- $\dot{g}_{wj}$  - Feuchtestrom von der Wandinnenoberfläche zur Raumluft [kg/s · m<sup>2</sup>]
- $\dot{W}_{IFQ}$  - Feuchteproduktion im Raum [kg/h]
- $\dot{W}_{RLT}$  - Feuchte Zu- bzw. Abfuhr durch raumlufttechnische Anlagen [kg/h]

Das Zonen-Gebäudemodell wurde experimentell und durch Vergleichen mit anderer Software und Standards, wie z. B. [ASHRAE 140, 2007] validiert. Die energetische und feuchtetechnische Validierung ist in [Antretter et.al. 2011] beschrieben.

Variable Randbedingungen, wie z. B. das Außenklima oder sonstige eingegebene Zeitprofile, wie z. B. Luftwechselraten, werden für jeden Zeitschritt neu angesetzt. Jeder simulierte Zeitschritt basiert auf den vorherigen Zeitschritten. Mit diesen Initialisierungswerten wird der Wärme- und Feuchtetransport über Bauteile berechnet und folglich die Zonenwärme- und -feuchtebilanz aufgestellt. Solange diese Bilanzen nicht ausgeglichen sind, wird die Innenlufttemperatur und relative Innenfeuchte iterativ angepasst.

Die Anlagentechnik wird bislang durch ideale Systeme mit jeweils einer maximal zur Verfügung gestellten Leistung zur Heizung, Kühlung, Be- und Entfeuchtung oder mechanischen Lüftung abgebildet. Ist ein ideales Anlagensystem eingegeben, wird das Innenklima innerhalb definierter Soll-Temperatur- und Feuchtgrenzen gehalten, solange die zur Verfügung gestellte maximale Leistung ausreicht. Der tatsächliche Bedarf, d. h. wie viel pro Zeitschritt von der Maximalleistung notwendig war um die Grenzen einzuhalten, wird berechnet. Reicht die Leistung nicht aus, können die

Soll-Innenklimabedingungen nicht erreicht werden, sondern sie werden nur so weit angenähert, wie die maximal zur Verfügung stehende Leistung der Anlagentechnik es erlaubt.

## Verknüpfung beider Verfahren in WUFI® Passive

Beide Berechnungsverfahren, das Monatsbilanzverfahren nach Passivhaus-Standard, sowie die dynamische Gebäudesimulation beruhen auf Nutzereingaben und Annahmen. Einige Angaben sind klar definiert, wie z. B. Bauteilaufbauten, Gebäudeabmessungen und Gebäudestandort. Andere werden aus Messdaten (wie z. B. Klimadaten) ermittelt oder sind Erfahrungs- oder Normwerte (z. B. Luftwechselraten). In der neu entwickelten Software verwenden beide Berechnungsverfahren ein einziges zu Grunde gelegtes Gebäudemodell. Fundamentale Eingaben gelten dabei für beide Verfahren, sind jedoch häufig für die dynamische Simulation in einer höheren Detaillierung und/oder zeitlich feiner aufgelöst notwendig, nicht zuletzt wegen der zusätzlichen Betrachtung der Feuchte. Die hygrothermische Simulation erfordert als Beispiel Feuchtespeicherfunktionen einzelner Materialien, welche den Feuchtegehalt abhängig von der relativen Luftfeuchte wiedergeben, oder eine Wärmeleitfähigkeit, die möglicherweise temperatur- und feuchteabhängig ist. Für beide Berechnungsverfahren gleichermaßen gelten Gebäudeabmessungen, Dachneigungen, Bauteilorientierungen, Bauteilflächen und Materialstärken, Parameter der Fenster, wie Öffnungsflächen, solare Transmissionsgrade, Rahmenflächen oder Verschattungsfaktoren. Auch können Randbedingungen wie Soll-Innentemperatur, maximale Innentemperatur und natürliche Luftwechselraten ebenfalls zwischen beiden Berechnungsverfahren ausgetauscht werden.

Einen größeren Unterschied gibt es bei den Klimadaten. Für das Monatsbilanzverfahren reichen monatliche Mittelwerte der Außenlufttemperatur und der solaren Einstrahlung. Die hygrothermische dynamische Gebäudesimulation erfordert stündliche Werte der Außenlufttemperatur und -feuchte sowie stündliche Werte der Global- und Diffusstrahlung. Zur Berücksichtigung von Schlagregen auf externe Oberflächen werden weiterführend stündliche Werte von Windgeschwindigkeit und -richtung sowie die Niederschlagsmenge benötigt.

Ergebnisse der stationären Berechnung können für die dynamische Simulation übernommen werden, wie z. B. mechanische Luftwechselraten, der effektive Wärmerückgewinnungsgrad oder maximale Leistungskapazitäten der Anlagentechnik. Innere Wärmelasten, verursacht durch Personenbelegung, Beleuchtung und Haushaltsgeräten können übernommen werden, sollten jedoch mit feuchtespezifischen Angaben ergänzt werden. Für das Monatsbilanzverfahren ist es möglich solche Lasten über einen Nutzungsfaktor abzumindern, zur Berücksichtigung einer nicht ständigen Anwendung, oder Anwesenheit von Per-

sonen. Für die dynamische Simulation können die daraus resultierenden Mittelwerte über eine Zeitperiode als erste Annahme einer konstanten Verteilung auf einen Monat oder ein Jahr dienen, realistischer sind jedoch hinterlegte Zeitprofile, welche den tatsächlichen stündlich variierenden Eintrag widerspiegeln.

Der größte Unterschied liegt im bereits erwähnten Detaillierungsgrad. Je detailreicher eine Simulation ist, desto höher ist im Normalfall der benötigte Rechenaufwand. Das stationäre Monatsverfahren ist sehr schnell. Ein gewöhnlicher PC führt die gesamte Berechnung in weit weniger als einer Sekunde durch. Die Verarbeitung der stündlichen dynamischen Simulation dauert hingegen oft einige Minuten, oder sogar Stunden. Als Ergebnis liefert es neben stündlichen Innentemperaturen und -feuchten auch stündliche Innenoberflächentemperaturen, u. a. zur Berechnung der operativen Raumtemperatur. Beurteilungen zur Behaglichkeit können damit getroffen werden. Es können Werte wie der PMV und der PPD berechnet werden [Fanger, 1982]. Wenn Grenzwerte überschritten werden, können sogar genaue Aussagen darüber getroffen werden, wann oder wie häufig diese nicht eingehalten werden.

Die Verbindung beider Verfahren in einer Software liefert eine Vielzahl von Synergien. Auf der einen Seite ist es möglich, mit dem Monatsbilanzverfahren sehr schnelle Ergebnisse zu erhalten, einschließlich dem Heizwärmebedarf, dem Kühlenergiebedarf und dem Primärenergieaufwand. Auf der anderen Seite ist es möglich, ohne erneute Eingabe des Gebäudemodells mit ein paar Ergänzungen und mit etwas mehr Rechenaufwand sämtliche Aussagen über Komfort, Behaglichkeit und eventuelle Feuchteprobleme zu treffen.

Je nach gewünschtem Simulationsergebnis ist das entsprechende Verfahren zu wählen, dargestellt in Bild 1. Typischerweise fängt ein Benutzer mit der Berechnung nach dem Monatsbilanzverfahren an. Dazu ist im ersten Schritt die Eingabe der Gebäudegeometrie, einschließlich Bauteilaufbau und eingesetzter Materialien notwendig. Ein Sketch-Up Plugin erlaubt das Bearbeiten eines 3-dimensionalen Gebäudemodells in Sketch-Up [Sketch-Up, 2013]. Ebenfalls ist es möglich, mit einem Assistenten einfache Gebäudegeometrien schnellstmöglich durch festlegen weniger Parameter einzugeben. Wichtig ist in beiden Fällen die Definition der an den Bauteiloberflächen angrenzenden Zonen. Eine Eingabe per Bauteilliste, ohne visualisiertes 3D-Gebäudemodell, ist ebenfalls möglich. Bauteilaufbauten, Materialien und Fenstereigenschaften können aus umfangreichen Datenbanken ausgewählt werden. Außenklimadaten können manuell eingegeben, aus einer Datenbank gewählt oder aus generierten Wetterdaten eingelesen werden. Ein weiterer Schritt ist die Eingabe der Gebäudenutzung (Wohngebäude, Nicht-Wohngebäude), der Design-Parameter (u. a. Soll-Innentemperatur) und die Eingabe sämtlicher Energieverbraucher. Sind diese innerhalb der thermischen Gebäudehülle, werden sie ebenfalls direkt als innere Quelle angesetzt. Abschließend sind sämtliche Angaben zur Gebäudeausrüstung und zur Verteilung notwendig. Einzelne Geräte zur Gebäudeheizung, Belüftung, Warmwasserbereitung können hinzugefügt und deren Eigenschaften aus einer Datenbank ausgewählt werden. WUFI® Passive teilt dem Benutzer mit, ob alle notwendigen Eingaben vorhanden sind, fehlende Angaben werden aufgezeigt und der Benutzer wird an die entsprechende Eingabestelle geleitet. Sind alle Eingaben vorhanden oder werden Eingaben geändert, wird das Monatsbilanzverfahren sofort neu berechnet und das Ergebnis dargestellt.

Für die weiterführende hygrothermische Simulation hat der Benutzer danach die Möglichkeit das Berechnungsverfahren umzuschalten. Einige Eingabemasken werden entsprechend der notwendigen Eingaben geändert. Alle bereits vorhandenen Eingaben, welche wie zuvor beschrieben für die dynamische Simulation gleichermaßen gelten, werden automatisch übernommen. Weitere Eingaben, wie z. B. die Soll-Innentemperatur werden erst per Knopfdruck übernommen, da eine detailliertere Eingabe über ein Zeitprofil möglich wäre. Hat der Benutzer Materialien aus der Datenbank ausgewählt sind für diese bereits sämtliche hygrothermischen Eigenschaften hinterlegt. Innere Feuchtequellen oder -senken sollten ergänzt werden. WUFI® Passive prüft auch für das dynamische Verfahren, ob sämtliche notwendigen Eingaben vorhanden sind und ermöglicht erst bei deren Vollständigkeit den Start der Simulation. Während der Simulation kann der Benutzer die Wärme- und Feuchteprofile über die Bauteile pro Zeitschritt, den Heizwärmebedarf oder den Verlauf der Innentemperatur als Film mitverfolgen. Ist die Simulation abgeschlossen, stehen sämtliche Ergebnisse als Graphen bereit und ein zusammenfassender Report wird ausgegeben.

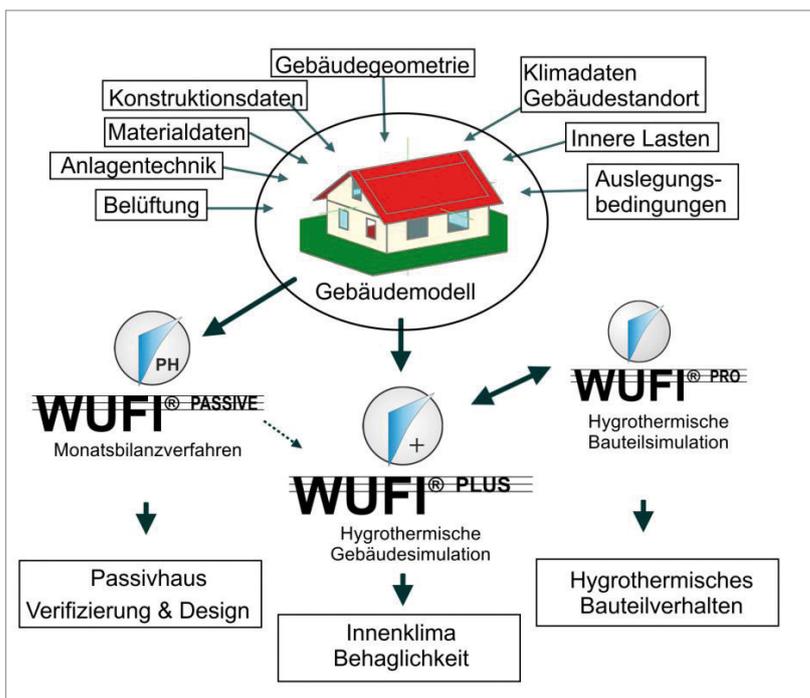


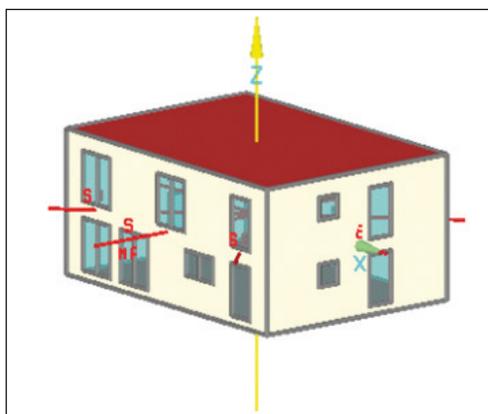
Bild 1: Eingaben, Interaktionen verschiedener Simulationsmethoden und Resultate

## Anwendungsbeispiel

Das zuvor beschriebene Planungstool wird im folgenden Abschnitt verwendet. Ein bereits zertifiziertes Bestands-Passivhaus wird erneut untersucht. Die durch WUFI® Passive mit der Monatsbilanzmethode berechneten Ergebnisse werden mit den Zertifizierungswerten verglichen. Es wird aufgezeigt, dass die dynamische Gebäudesimulation eine durchaus detailreichere Analyse des thermischen und hygrischen Verhaltens des Gebäudes und dessen Bauteile ermöglicht und beispielhaft auf einige mögliche weiterführende Untersuchungen eingegangen.

## Gebäudemodell und Randbedingungen

Gezeigt wird ein Einfamilienhaus im Passivhausstandard [Exner et al. 2012], fertiggestellt im Jahr 2004 in Wolfratshausen, Bayern, Deutschland. Das Gebäude wurde 2008 beim Wettbewerb Klimahaus Bayern (<http://www.klimahaus-bayern.de>) mit dem ersten Preis ausgezeichnet und ist nach den Richtlinien des Passivhaus Institutes Darmstadt zertifiziert. Das zwei Vollgeschosse hohe freistehende Einfamilienhaus, mit einer Energiebezugsfläche von 199,22 m<sup>2</sup> und einer Geschosshöhe von 2,5 m, ist auf einen 4 Personen Haushalt (2 Erwachsene und 2 Kinder) ausgelegt. Das kubische Gebäude wurde in Holzbauweise erstellt, der Raum unter dem Satteldach liegt außerhalb der festgelegten thermischen Gebäudehülle. Innerhalb der über den Winter beheizten Gebäudehülle sind 12 Räume, darunter 3 Badezimmer und eine Küche angeordnet. Das in WUFI® Passive visualisierte dreidimensionale Gebäudemodell ist in Bild 2 dargestellt. Das Dach und der darunterliegende Dachraum werden nicht simuliert und sind deshalb auch nicht dem Modell hinzugefügt. Es wird von einem stark belüfteten Dach ausgegangen und sowohl für das Monatsbilanzverfahren als auch für das dynamische Verfahren das Außenklima angesetzt, jedoch ohne solare Einstrahlung.



**Bild 2:** Gebäudemodell Passivhaus Prantl in WUFI® Passive

Ein Passivhaus-Kompaktgerät mit Fortluftwärmepumpe und einer Wärmeleistung von 1,5 kW, ergänzt durch einen 2 kW Lufterhitzer für Spitzenlasten im Zuluft-Lüftungska-

nal, deckt neben solaren und restlichen inneren Wärmequellen den Energiebedarf des Gebäudes, welcher mit 12 kWh/(m<sup>2</sup>a) berechnet wurde. Die Wärmeverteilung erfolgt hauptsächlich über das mechanische Lüftungssystem mit einem mittleren Luftvolumenstrom von 150 m<sup>3</sup>/h. Diese Annahme des Luftvolumenstroms wird auch für die dynamische Simulation getroffen, obwohl Tages-, Wochen-, und Jahresprofile, oder Temperatur, Feuchte und Kohlenstoffdioxid gesteuerte Luftvolumenströme eingegeben werden könnten. Es wird kein Gerät zur Kühlung eingesetzt, jedoch eine sommerliche manuelle Nachtlüftung angesetzt. Die Soll-Innentemperatur ist auf 20 °C ausgelegt und die Übertemperaturgrenze auf 25 °C festgesetzt.

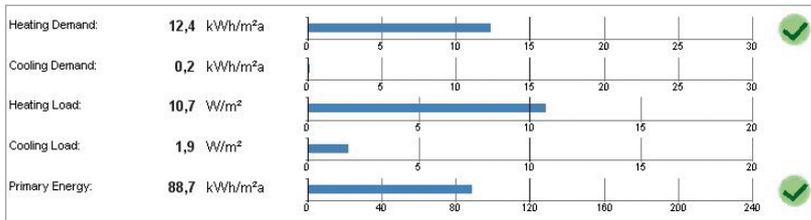
Der mittlere Wärmedurchlasskoeffizient der Fenster liegt bei 0,84 W/(m<sup>2</sup>K), der der Außenwände bei 0,110 W/(m<sup>2</sup>K). Die Decke hat einen mittleren U-Wert von 0,119 W/(m<sup>2</sup>K). Die Bodenplatte (U-Wert = 0,122 W/(m<sup>2</sup>K)) ist aufgeständert, das Gebäude ist nicht unterkellert. Die Verglasungsfläche (g-Wert = 0,52) Richtung Süden beträgt 14,5 m<sup>2</sup>, Richtung Osten 4,6 m<sup>2</sup>, Richtung Westen 3,6 m<sup>2</sup> und Richtung Norden 1,9 m<sup>2</sup>. Abgemindert wird die solare Einstrahlung durch jeweilige Verschattungsfaktoren und folgend im Mittel auf 43 % reduziert. Die Luftdichtheit wurde mit einer Luftwechselzahl von 0,4 1/h bei 50 Pascal Druckdifferenz definiert.

Für das Außenklima wurden zwei Datensätze, einer mit Monatsmittelwerten für das Monatsbilanzverfahren und einer mit stündlichen Werten für die dynamische Gebäudesimulation, für den Standort München mit Meteonorm [Meteonorm, 2013] erzeugt, um eine Vergleichbarkeit der beiden Verfahren herzustellen. Nach Passivhausstandard wurden sämtliche inneren Energieverbraucher eingegeben, darunter: Geschirrspüler, Herd, Kühlschrank, Waschmaschine und ein Kondensationstrockner. Weitere Kleingeräte und die Beleuchtung wurden entsprechend dem Wohnungsnutzungsprofil berücksichtigt. Die Anlagentechnik befindet sich innerhalb der thermischen Gebäudehülle. Wie erwähnt, wird jeder Energieverbraucher bei Wohnungsnutzung über die Betriebsdauern und Häufigkeiten der Anwendung in einem Jahr berücksichtigt. Für die dynamische Simulation können weiterführend tatsächliche Zeitprofile, z. B. für die Anwesenheit von Personen, hinterlegt werden. Zur besseren Vergleichbarkeit wurde jedoch darauf verzichtet und das nach Passivhausstandard berechnete Wärmeangebot aus inneren Wärmequellen pauschal über das Jahr angesetzt. Vereinfacht wurde ebenfalls auf die Eingabe sämtlicher Räume zur dynamischen Simulation verzichtet und der Innenraum als eine Zone angesetzt. Möglicherweise variierendes Raumklima zwischen unterschiedlichen Räumen wird somit nicht simuliert, weiterführend ist dies, u. a. zur Beurteilung der Behaglichkeit in einzelnen Räumen durchaus möglich.

## Ergebnisse Bilanzverfahren

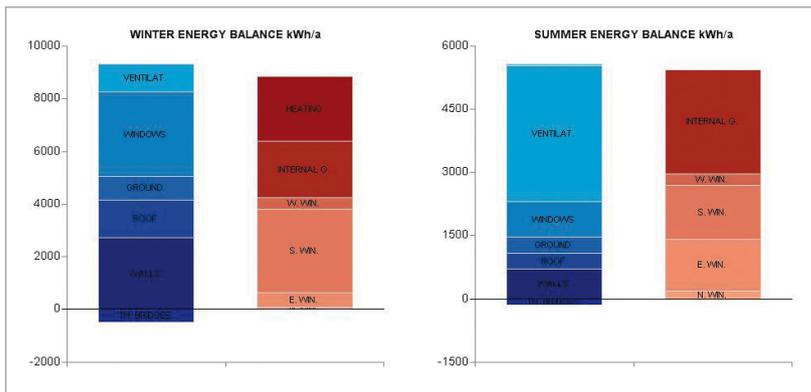
Im Folgenden wird eine Reihe von Ergebnissen dargestellt, welche mit dem Bilanzverfahren erzeugt wurden. Sind alle

notwendigen Eingaben für ein Passivhaus gemacht, wird das Monatsbilanzverfahren durchgeführt. Der Nutzer erhält sofort die Rückmeldung, ob der Passivhausstandard erreicht wird, siehe Bild 3.



**Bild 3:** Wesentliche Ergebnisse der Energiebilanz nach kompletter Eingabe eines Passivhauses (Bildschirmabbild aus WUFI® Passive)

Weiterführend wird unter vielem anderem in einem Report eine Zusammenstellung sämtlicher Ergebnisse in Bezug auf die Energiebilanz für die Heizperiode und für die Kühlperiode dargestellt (Bild 4).



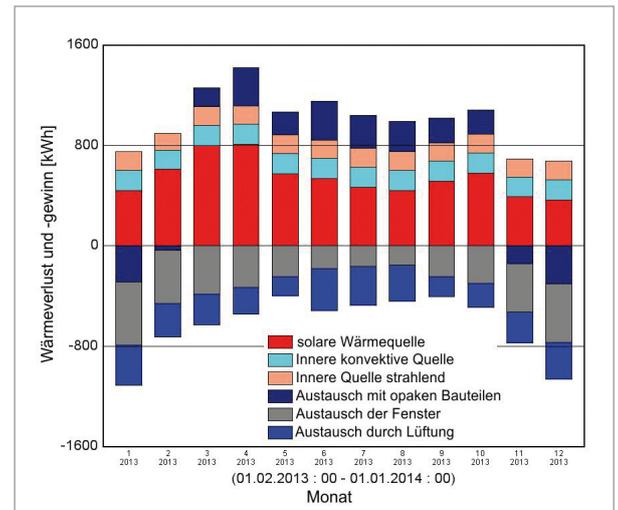
**Bild 4:** Jahresbilanzen für die Heiz- und Kühlperiode, berechnet mit Monatsbilanzverfahren (Bildschirmabbild aus WUFI® Passive)

### Ergebnisse dynamische Simulation

Die dynamische Simulation ermöglicht dem Anwender einen detaillierteren Einblick in die zeitabhängige Interaktion zwischen Gebäudehülle und Innenraumklima. Die stündliche Wärmebilanz wurde für das Innenklima ausgestellt und iterativ gelöst. Fehlende Wärme wurde durch die ideale Anlagentechnik bereitgestellt, um die Soll-Innenraumtemperatur von 20 °C nicht zu unterschreiten. Somit stellt diese Wärme den Heizwärmebedarf dar. Eine Kühlung wurde nicht hinzugefügt, wodurch die obere Temperaturgrenze nicht auf Grund von Kühlleistung beschränkt wurde. Als Ausgabegrafik stellt WUFI® Passive neben den stündlichen Werten der Wärmegewinne und -verluste diese auch aufsummiert über je einen Monat dar, wie in Bild 5 gezeigt. Im Sommer ist ein temporärer Sonnenschutz eingegeben, der die solare Einstrahlung von den Südfenstern auf 30 % verringert und sich somit deutlich auf die solaren Wärmegewinne auswirkt. Mit der dynamischen Simulation ist es

möglich, diesen von der Einstrahlung abhängig einzugeben. Bei der Simulation wurde der Sonnenschutz nur dann aktiviert, wenn ohne ihn die obere Solltemperaturgrenze überschritten worden wäre. An dieser Stelle sei erwähnt, dass die solaren Wärmegewinne im Monatsbilanzverfahren keine direkte Auswirkung auf die Wärmetransmission der Bauteile hat. Bei der dynamischen Simulation wird die eintreffende Wärmestrahlung zu einem Teil auf die Innenoberflächen der Bauteile verteilt und führt dort zu höheren Oberflächentemperaturen, welche sich wiederum auf die Transmissionswärmeverluste auswirken.

Die instationäre Gebäudesimulation unterscheidet nicht zwischen Heiz- und Kühlperiode. Die Zeiträume, in denen das Gebäude beheizt oder gekühlt werden muss, damit Soll-Innenraumklimabedingungen erfüllt werden, ergeben sich aus der Simulation. Ein direkter Vergleich mit den Wärmebilanzen des Monatsverfahrens (Bild 4) ist deshalb nur bedingt, nach weiterer Auswertung möglich. In [Schöner, 2012] ist beschrieben, dass bei Eliminierung instationärer Effekte und Angleichung der Vergleichszeiträume eine hohe Übereinstimmung erzielt wird.

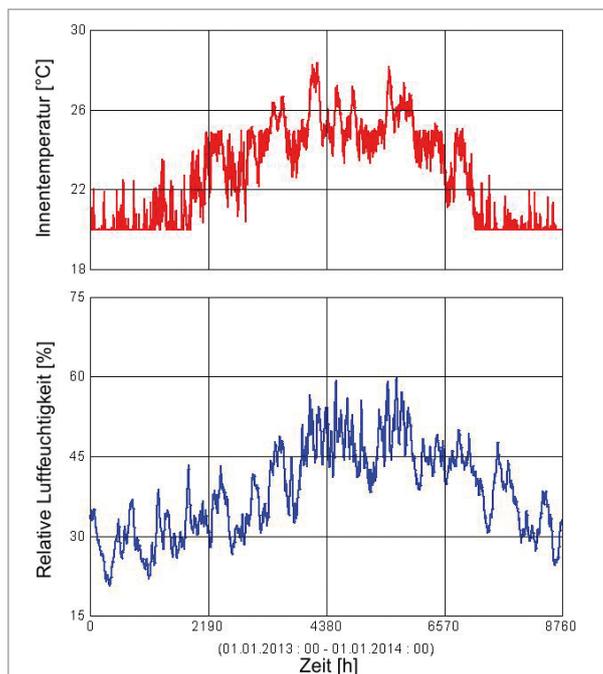


**Bild 5:** Monatssummen der einzelnen Wärmegewinne und -verluste

Die stündliche hygrothermische Simulation erfordert detailliertere Materialeigenschaften und des Weiteren stündliche Werte des Außenklimas. Ohne weitere Detaillierung der Eingaben, wie z. B. Zeitprofile der inneren Wärmegewinne und einem nicht konstanten sondern angetriebenen Luftaustausch wurde ein jährlicher Wärmebedarf von 3250 kWh/a ermittelt.

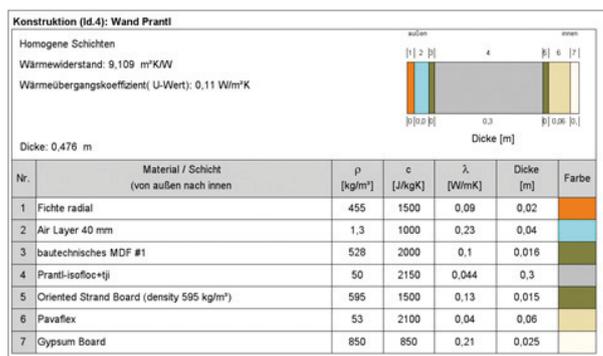
Neben den stündlichen Wärmeströmen stehen dem Anwender eine Vielzahl von weiteren stündlichen Simulationsergebnissen zur weiteren Auswertung zur Verfügung, unter anderem die Raumtemperatur und -feuchte, in Bild 6 dargestellt. Es ist deutlich zu erkennen, dass die sommerliche Übertemperaturgrenze überschritten wird.

Mit der hygrothermischen Simulation ist es ebenfalls möglich, Aussagen über den Wassergehalt in kritischen Bau-

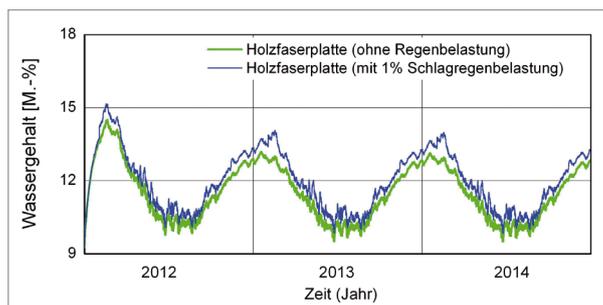


**Bild 6:** Simuliertes Innenraumklima mit WUFI® Passive

teilschichten zu treffen. In Bild 7 ist der Bauteilaufbau der Außenwand dargestellt, wie er in der hygrothermischen Simulation modelliert wurde. Bild 8 zeigt exemplarisch den mittleren Wassergehalt der äußeren Holzfaserschicht (Material / Schicht 3) der westlichen Gebäudewand stündlich über einen Zeitraum von 3 Jahren. Mit dieser Betrachtung lässt sich folgern, dass keine Wasserakkumulation über die



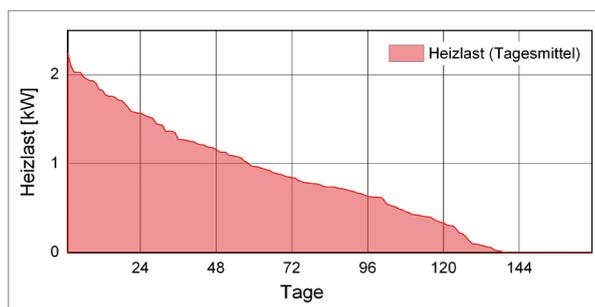
**Bild 7:** Bauteilaufbau der Außenwand (Annahme homogener Schichten)



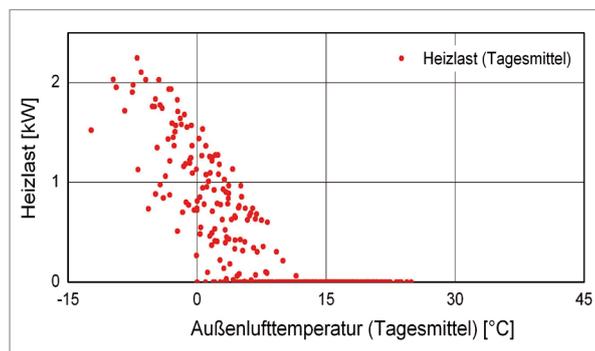
**Bild 8:** Feuchtegehalt in kritischen Bauteilschichten

Jahre stattfindet und kritische Holzfeuchtewerte nicht dauerhaft überschritten werden.

Zur Anlagendimensionierung sind Dauerlinien der Heizleistung oft hilfreich. WUFI® Passive berechnet die stündliche tatsächliche Heizlast. Zu Tagesmittelwerten umgerechnet wird in Bild 9 dargestellt, wie lange die jeweilige Heizlast notwendig ist, um die Soll-Innenraumtemperatur nicht zu unterschreiten. Auch die Heizlast in Abhängigkeit zur Außenlufttemperatur kann ohne weiteres ausgegeben werden (Bild 10).



**Bild 9:** Dauerlinie der Heizlast (Tagesmittelwerte), simuliert mit WUFI® Passive



**Bild 10:** Heizlast in Abhängigkeit zur Außenlufttemperatur

## Diskussion und Schlussfolgerungen

Das historisch gewachsene Konzept zur Auslegung von Passivhäusern und die klimaspezifische Anpassung der Methodik zur Bewertung führen zu Herausforderungen bei der Übertragung des rechnerischen Ansatzes zur Planung und Zertifizierung in andere Klimazonen. Häufig wird deshalb in der Praxis ein zeitaufwändiges und fehleranfälliges mehrstufiges Verfahren angewandt. Neben der rein energetischen Planung mit einem Monatsbilanzverfahren werden zur detaillierteren Berücksichtigung von instationären Effekten und zur Bewertung der Behaglichkeit dynamische Gebäudesimulationen durchgeführt. Eine feuchtetechnische Bewertung einzelner Bauteile komplettiert die bauphysikalische Auslegung der Gebäude.

Schon im Vorwort zum Handbuch für das Passivhaus Projektierungs Paket [Feist et.al 2007] wird die Frage gestellt, ob für jede Projektierung ein detailliertes, instationäres

Simulationsprogramm eingesetzt werden muss. Es wird angeführt, dass auch stationäre Bilanzverfahren, sofern sie über dynamische Eichsimulationen validiert wurden, ausreichend genaue Ergebnisse liefern können. Zusätzlich wird jedoch festgestellt, dass für manche Fragestellungen, wie die Betrachtung des sommerlichen Temperaturverhaltens oder des Einflusses der Gebäudemasse, nur hinreichend genaue Ergebnisse mit einer instationären Gebäudesimulation erzielt werden können. Suggestierter Hintergrund für das Zurückgreifen auf ein stationäres Bilanzverfahren ist der Zeitaufwand zur Modelleingabe und die Dauer einer dynamischen Simulation.

Betrachtet man die benötigten Eingaben, so liegt der zeitliche Hauptaufwand in der Erstellung der Gebäudegeometrie, der Eingabe der Material-, Bauteil- und Anlagentechnikdaten. Eine signifikante Beschleunigung kann hier mit Hilfe einer grafischen Nutzeroberfläche bei der Geometrieingabe sowie durch umfangreiche Datenbanken mit Materialien, opaken Bauteilaufbauten, Fenstern, inneren Lasten und Komponenten der technischen Gebäudeausrüstung erzielt werden. All dies wird in der neu entwickelten Software WUFI® Passive zur Verfügung gestellt. Der zeitliche Eingabemehraufwand, um eine dynamische Simulation durchzuführen, ist minimal. Hauptsächlich zusätzlich benötigt werden Zeitprofile für Sollwerteneinstellungen (z. B. Nachtabsenkung), innere Lasten (z. B. Küchennutzung vs. Schlafzimmernutzung) oder Lüftung (z. B. Nachtlüftung oder reduzierter Lüftung, wenn das Gebäude nicht belegt ist). Auch der Zeitaufwand zur Durchführung einer dynamischen Gebäudesimulation liegt in einem akzeptablen Bereich und nimmt mit steigenden Rechnerkapazitäten auch für kleine Schreibtischrechner weiter ab. Deshalb liegt es nahe, an das bestehende dynamische Gebäudesimulationsmodell WUFI® Plus die Methodik zur Auslegung und Zertifizierung von Passivhäusern anzubinden. Dies erfordert nur einen kleinen Mehraufwand an Eingaben und erlaubt die schnelle energetische Gebäudeplanung und eine Zertifizierung über das Bilanzverfahren. Im Anschluss daran ermöglicht die detaillierte dynamische Simulation, basierend auf demselben Gebäudemodell, Effekte abzubilden, die ein stationäres Verfahren nicht berücksichtigen kann, um damit weitere energetische Verbesserungen zu erreichen. Zusätzlich wird eine Komfortbewertung, z. B. nach [DIN EN 15251] und die feuchtetechnische Bemessung der Bauteile unter realistischen Randbedingungen möglich. Eine Übertragung des Passivhaus Konzepts auf andere Klimazonen unter frühzeitiger Vermeidung möglicher Probleme wird dadurch erleichtert.

Um Entwicklungen, wie den Entwurf und die Zertifizierung von Net-Zero- und Plusenergiegebäuden zu begleiten, muss neben der Interaktion von Gebäuden, Anlagen und Nutzung auch die Produktion und der Verbrauch elektrischer Energie abgebildet werden. Stationäre Bilanzverfahren reichen zum Abgleich der schwankenden Energieproduktion mit dem Verbrauch nicht mehr aus. Zukunftsfähige dynamische Simulationsmodelle müssen deshalb in der

Lage sein, den kompletten instationären Energiehaushalt eines Gebäudes korrekt zu beschreiben. Zusätzlich muss die hygrothermische Interaktion von der Gebäudehülle mit den verschiedenen Gebäudezonen abgebildet werden, um einerseits auch Energieaufwand für Be- und Entfeuchtung optimieren zu können und um andererseits dauerhaft schadensfreie Bauteile sicherzustellen.

Mit der in diesem Artikel vorgestellten Entwicklung des Planungs- und Zertifizierungswerkzeugs WUFI® Passive wird erstmals eine Lösung präsentiert, die eine kombinierte Bewertung von Energie, Komfort und hygrothermischem Bauteilverhalten, basierend auf einem einzigen Gebäudemodell, ermöglicht. Durch die vorgesehene Implementierung detaillierter Anlagentechnik- und Photovoltaiksimulation können in Zukunft nicht nur besonders energieeffiziente sondern auch dynamisch Energie produzierende und speichernde Gebäude, basierend auf dem bewährten Konzept für Passivhäuser, entworfen und projiziert werden.

## References

- Antretter, F., Sauer, F., Schöpfer, T., Holm, A. 2011. Validation of a hygrothermal whole building simulation software. Proceedings of Building Simulation 2011: 12th Conference of International Building Performance Simulation Association, Sydney, Australia.
- ASHRAE Standard 140 - 2007: Building Thermal Envelope and Fabric Load Tests.
- ASHRAE Standard 55 - 2010: Thermal Environmental Conditions for Humand Occupancy.
- Barkholz, H., Michelsen, C. 2012. Aktuelle Trends: ista-IWH-Energieeffizienzindex 2011 - Scheinbarer Stillstand an der Sanierungsfront. Wirtschaft im Wandel, Jg. 18 (8-9), 2012.
- Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (Internetauftritt): <http://www.bmwi.de/DE/Themen/Energie/Energiedaten/gesamtausgabe.html>, Zugriff 15.03.2013.
- DIN EN ISO 13790, September 2008. Energieeffizienz von Gebäuden - Berechnung des Energiebedarfs für Heizung und Kühlung (ISO 13790:2008).
- DIN EN ISO 15251, Dezember 2012. Eingangsparameter für das Raumklima zur Auslegung und Bewertung der Energieeffizienz von Gebäuden - Raumluftqualität, Temperatur, Licht und Akustik; Deutsche Fassung EN 15251:2007.

- DIN EN 15026, Juli 2007. Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Bauteilen und Bauelementen - Bewertung der Feuchteübertragung durch numerische Simulation; Deutsche Fassung EN 15026:2007.
- Exner, D. et al. 2012. EURAC research: ENERBUILD Result 5.4 - User habits, impact on energy consumption in passive houses - results of a comprehensive long-term measurement. S. 27-29.
- Fanger, P.O., 1982. Thermal Comfort. Robert E. Krieger Publishing company. Malabar, Florida.
- Feist, W. 1992. Passivhäuser in Mitteleuropa. Dissertation. University of Kassel.
- Feist, W. et.al.. PHPP Handbuch. 2007. PHI Darmstadt.
- Künzel, H.M., 1994. Verfahren zur ein- und zweidimensionalen Berechnung des gekoppelten Wärme- und Feuchtetransports in Bauteilen mit einfachen Kennwerten. Dissertation. University of Stuttgart.
- Lengsfeld, K., Holm, A. 2007. Entwicklung und Validierung einer hygrothermischen Raumklima-Simulationssoftware WUFI®-Plus, Bauphysik 29 (2007), Magazin 3, Ernst & Sohn Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH & Co. KG, Berlin.
- Musall, E., Voss, K. 2011. Ziel Klimaneutrale Gebäude - von der Bilanzierung zur Umsetzung. HLH Lüftung/Klima, Heizung/Sanitär, Gebäudetechnik, Bd. 62 (2011) Nr. 12 -Dezember. Seite 16-20.
- Passipedia, der Passivhaus-Enzyklopädie. [www.passipedia.de](http://www.passipedia.de), Passivhaus Institut, Seite: [http://passipedia.passiv.de/passipedia\\_de/planung/energieeffizienz\\_ist\\_berechenbar/energiebilanzen\\_mit\\_dem\\_phpp?rev=1273761457](http://passipedia.passiv.de/passipedia_de/planung/energieeffizienz_ist_berechenbar/energiebilanzen_mit_dem_phpp?rev=1273761457), Zugriff 14.03.2013.
- Schöner, T., 2012. Comparison of WUFI® Plus with the PHPP. Konferenzbeitrag ENERGODOM, Krakau 12.-14. September 2012.
- Shurcliff, W., 1982. The Saunders-Shrewsbury House. Self-published.
- Shurcliff, W., 1986. Superinsulated Houses. Annual Reviews Energy. 11: pp. 1-24. Annual Reviews Inc.
- Shurcliff, W., 1988. Superinsulated Houses and Air-To-Air Heat Exchangers. Brickhouse Publishing Company, Andover, MA.
- Sketch-Up 8, Trimble, <http://www.sketchup.com>, 24.03.2013.
- WUFI® Passive, Fraunhofer-Institut für Bauphysik, <http://www.wufi.de>, 24.03.2013.

## Autoren

Florian Antretter, M.Eng., Gruppenleiter Hygrothermische Gebäudeanalyse, Abt. Hygrothermik, Fraunhofer-Institut für Bauphysik (IBP).

Katrin Klingenberg, Dipl.-Ing. (Architektin), Passive House Institute US (PHIUS), USA.

Matthias Pazold, M.Eng., Hygrothermische Gebäudeanalyse, Abt. Hygrothermik Fraunhofer-Institut für Bauphysik (IBP).

Prof. Dr. rer. nat. Harald Krause, Hochschule Rosenheim, für das Kapitel Anwendungsbeispiel.

Prof. Dr.-Ing. Andreas Holm, Institutsleiter Forschungsinstitut für Wärmeschutz e. V. München (FIW).

Dr.-Ing. Hartwig Künzel, Abteilungsleiter Hygrothermik, Fraunhofer-Institut für Bauphysik (IBP).

Anmerkung zu den Seitenzahlen:

Bei Druckbeginn dieses Sonderdrucks lagen die endgültigen Seitenzahlen der wksb noch nicht vor.