

Ein Vorschlag zur Heizlastauslegung im Passivhaus

Zusammenfassung

Passivhäuser benötigen in der Heizzeit sehr kleine Heizleistungen (ca. 500 – 1500 W). Die Praxis (und theoretische Überlegungen) haben gezeigt, daß man in ihnen bis zu einem Heizleistungsbedarf von ca. $10 \text{ W/m}^2_{\text{Wohnfläche}}$ auf ein konventionelles Heizsystem (und die hierdurch entstehenden Kosten) verzichten kann. Die benötigte Wärme wird in diesem Fall durch Nachheizen der Zuluft über das Lüftungssystem zugeführt. Allerdings hat sich das übliche Verfahren zur Bestimmung der Norm-Heizlast nach DIN 4701 für Gebäude im Passivhausstandard als ungeeignet erwiesen, da es die tatsächlich benötigten Heizleistungen um ca. den Faktor 3 überschätzt und daher den Verzicht auf ein konventionelles Heizsystem unter Umständen ungerechtfertigterweise verhindert. Dies ist darauf zurückzuführen, daß die Wärmegewinne (solare Gewinne und interne Wärmequellen) in der Norm-Heizlastauslegung nicht berücksichtigt werden. Im Vergleich zu den drastisch verringerten Wärmeverlusten sind diese jedoch erheblich.

Ziel dieser Studie war es deshalb, ein Verfahren zu entwickeln, mit dem die tatsächlich anfallenden maximalen Heizleistungen zuverlässiger bestimmt werden können. Zu diesem Zweck wurde mit Hilfe dynamischer Gebäudesimulationen der Einfluß der wichtigsten Gebäudekenngrößen auf die Auslegungsheizlast untersucht. Auf der Grundlage dieser Untersuchungen konnte ein stationäres Berechnungsverfahren zur Bestimmung der Heizlast im Passivhaus und Niedrigenergiehaus entwickelt werden, welches auch die Wärmegewinne berücksichtigt. Mit seiner Hilfe ist eine genauere Bestimmung der maximal benötigten Heizleistung eines Gebäudes mit einem Fehler kleiner 5 % im Vergleich zur dynamischen Simulation möglich.

1 Einleitung

In Passivhäusern ist es erstmals möglich, auf ein konventionelles Heizsystem zu verzichten. Die notwendige Heizwärme kann über ein sehr einfaches, kostengünstiges System, nämlich die ohnehin erforderliche Lüftungsanlage, durch Nachheizen der Zuluft ins Haus eingebracht werden. Dadurch lassen sich die Kosten für das herkömmliche Heizsystem einsparen und in eine verbesserte Lüftung und verbesserten Wärmeschutz investieren. Systembedingt sind dadurch jedoch die installierten Leistungsreserven gering. Die Obergrenze für die zu transportierende Leistung ist durch die Auslegungsluftmenge gegeben, denn die Luft kann auf maximal 50°C erwärmt werden, um Staubverschmelzung auf den Lüftungskanälen und Unbehaglichkeit in den Zuluftträumen zu vermeiden [1]. Für $\dot{V}_{\text{Zuluft}} = 120 \text{ m}^3/\text{h}$ ergibt sich beispielsweise aus $P_{\text{Heiz}} = \dot{V}_{\text{Zuluft}} \cdot c_{\text{Luft}} \cdot (\vartheta_{\text{Zuluft}} - \vartheta_{\text{Raum}})$ (1)

eine maximale Heizleistung $P_{\text{Heiz}} = 120 \text{ m}^3/\text{h} \cdot 0,34 \text{ kWh}/(\text{m}^3 \cdot \text{K}) \cdot (50^\circ\text{C} - 20^\circ\text{C}) = 1200 \text{ W}$ (oder ca. 10 W/m^2).

Bisherige und zukünftige Planungsinstrumente, wie z.B. die DIN 4701 oder die europäische Norm DIN EN 12831, sind durch ihr Verfahren, welches nur Wärmeverluste der Gebäude, jedoch keine solaren Gewinne oder Gewinne aus Abwärme

elektrischer Geräte berücksichtigt, für die Auslegung des Heizsystems in Passivhäusern ungeeignet. Sie überschätzen die tatsächlich benötigten Heizleistungen erheblich. Messungen zeigten, daß – entgegen der Auslegung nach DIN 4701, bei der Auslegungstemperaturen zwischen -10 °C und -16 °C berücksichtigt werden – im Passivhaus Kranichstein die maximalen (tagesmittleren) Heizleistungen bei tagesmittleren Außentemperaturen um 0 °C auftraten. Der Grund hierfür ist, daß bei sehr tiefen Außentemperaturen (diese kommen systematisch bei Hochdruckwetterlage vor) nennenswerte direkte Solarstrahlung auftritt. Bei Passivhausstandard führt diese zu einem merklichen solaren Heizbeitrag.

Interne Wärmegewinne in der Größenordnung von ca. 1 bis 5 W/m^2 können bei Passivhäusern mit gemessenen Heizlasten von $7,4\text{ W/m}^2$ [2] im Gegensatz zu konventionellen Bauten mit Heizlasten größer 60 W/m^2 nicht mehr vernachlässigt werden.

2 Berechnungsgrundlagen

Für die Untersuchungen wurden die Heizlasten eines modellierten Hauses in einer dynamischen Jahressimulation mit dem Gebäudesimulationsprogramm DYNBIL [3] berechnet. Dabei wurden die wesentlichen ein Gebäude beschreibenden Kenngrößen (Fensterfläche, Wandaufbau...) variiert, um ihren Einfluß auf die maximal benötigte Heizleistung abschätzen zu können. Aus den Ergebnissen wurden Zusammenhänge zwischen Heizlast und Wetterdaten, Gebäude- und Nutzerkenn-daten formuliert. Den Untersuchungen lag ein Modell des im Oktober 1991 fertiggestellten Passivhauses in Darmstadt-Kranichstein zugrunde. Der verwendete Wetterdatensatz ist das Testreferenzjahr des Deutschen Wetterdienstes für Hof (Ort mit sehr großer Gradtagzahl).

Basisfall

Das Passivhaus ist ein mit wirtschaftlich und planerisch vertretbaren Mitteln wärmetechnisch optimierter Gebäudetyp [4]. Eine weitere energetische Verbesserung (über den Passivhausstandard hinaus) scheint bei verbleibenden Heizkosten in Höhe von maximal ca. $1,50\text{ DM/m}^2_{\text{Wohnfläche}} \cdot a$ ($= 15\text{ kWh}/(\text{m}^2_{\text{Wohnfläche}} \cdot a) \cdot 10\text{ Pfg/kWh}$) (Grenzwert für ein Passivhaus) finanziell (und ökologisch) nicht sinnvoll.

Für das untersuchte Passivhaus galten folgende Annahmen:

- Lüftungsanlage mit über 75 % Wärmerückgewinnung und daraus resultierendem energieäquivalenten Luftwechsel von $0,09/\text{h}$ (zur Definition vgl. Abschnitt 3)
- Wandaufbauten
 - Dach: Leichtbaufertigteil mit Steg-Träger und $44,5\text{ cm}$ Einblasdämmung ($k_D = 0,09\text{ W/m}^2\text{K}$)
 - Außenwand: $17,5\text{ cm}$ Kalksandstein mit $27,5\text{ cm}$ Wärmedämmverbundsystem ($k_{AW} = 0,14\text{ W/m}^2\text{K}$)
 - Kellerdecke: Stahlbeton mit 25 cm Wärmedämmung auf der Unterseite ($k_{KD} = 0,13\text{ W/m}^2\text{K}$)
- Dreischeiben-Wärmeschutzglas mit Kryptonfüllung, $\varepsilon = 0,10$ ($k_V = 0,62\text{ W/m}^2\text{K}$, $g = 53\%$), $19,1\text{ m}^2$ Südfensterfläche, $6,3\text{ m}^2$ Nordfensterfläche.

3 Parametervariationen

Es wurde jeweils eine Gebäudekenngröße variiert und die simulierten maximalen Heizleistungen in einem Diagramm dargestellt. Dadurch sollten die Abhängigkeiten der Heizlast von den einzelnen Kenngrößen herausgearbeitet werden. Die Ergebnisse sind im folgenden dargestellt:

Interne Quellen

Zu den internen Quellen zählen die Abwärme der im Haushalt verwendeten Geräte einschließlich Warmwasserbereitung sowie anwesende Personen. Als Wärmesenken wirkt die Verdunstung aus feuchten Handtüchern sowie kaltes Wasser, das sich z.B. in Toilettenspülkästen erwärmt. In der Summe ergeben sich nach Abzug der Wärmesenken bei diesem Simulationslauf ca. 2,5 W/m² interne Quellen, dieser Wert entspricht dem im Energiepaß Heizung/Warmwasser angegebenen Wert für Einfamilienhäuser [5].

Um den Einfluß der internen Wärmequellen zu quantifizieren, wurden diese in einer Parametervariation zwischen 0 und 5,8 W/m² (bzw. 0 – 7962 kWh/a) variiert. Die Parametervariation der internen Quellen ist in Abb. 1 dargestellt.

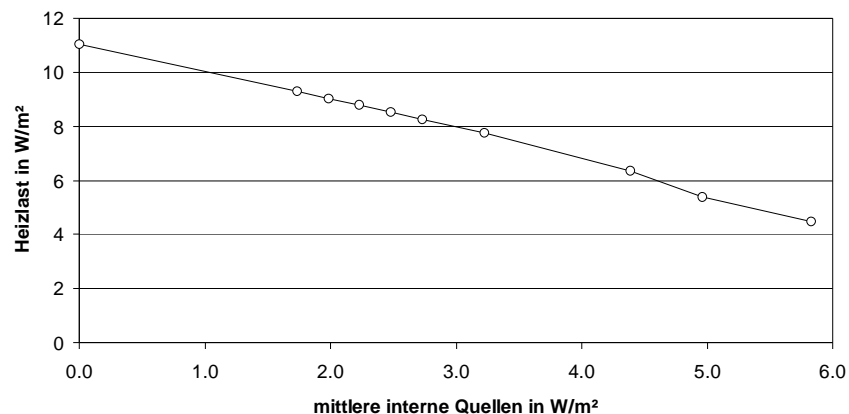


Abb. 1: Heizlast für eine Variation der internen Quellen

Man erkennt einen nahezu linearen Zusammenhang zwischen internen Quellen und Auslegungsheizlast. An den Auslegungstagen sind die anfallenden internen Quellen nahezu vollständig nutzbar und verringern die benötigte Heizleistung. Erst bei sehr großen Quellen (> 18 kWh/Tag inkl. Personenabwärme) muß ein Ausnutzungsfaktor berücksichtigt werden.

Äquivalenter Luftwechsel

Der energieäquivalente Luftwechsel verringert sich durch den Einsatz einer Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung. Er ist folgendermaßen definiert:

$$n_{\text{äq.}} = (1 - \eta_{\text{WRG}}) \cdot n_{\text{Anlage}} + n_{\text{Restinfiltration}} \quad (2)$$

$$\text{mit } n_{\text{Anlage}} = \frac{\dot{V}_{\text{Anlage}}}{V_{\text{Haus}}}$$

In diesem Parameterlauf wurde der (energie-) äquivalente Luftwechsel von 0,001 – 0,5/h variiert. Für die Heizlast wird ein linearer Zusammenhang zum äquivalenten

Luftwechsel erwartet, die in Abb. 2 sichtbare Nichtlinearität für sehr kleine Luftwechsel resultiert aus den Annahmen für die steigende Wärmerückzahl (diese Annahme ist notwendig, da ansonsten die Restinfiltration kleiner 0 m³/h werden würde). Dadurch steigt der Infiltrationsanteil überproportional an.

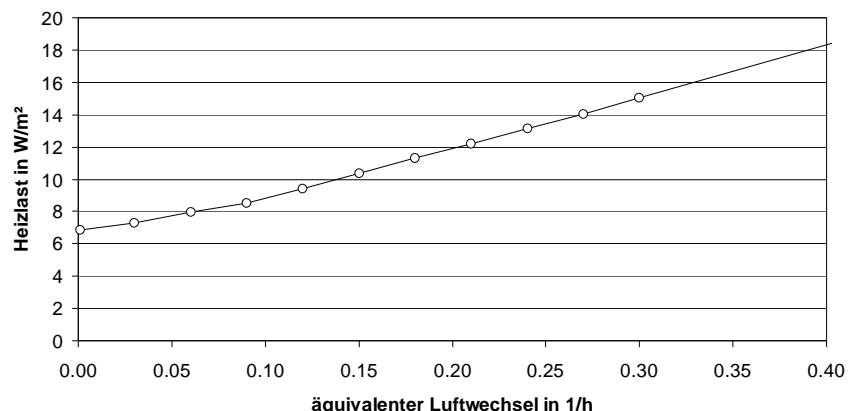


Abb. 2: Heizlast bei einer Variation des (energie-) äquivalenten Luftwechsels

Aus dem Diagramm ist zu erkennen, daß, um die Heizlast unter 10 W/m² zu halten, eine Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung unerlässlich ist, da äquivalente Luftwechsel ohne Wärmerückgewinnung unter 0,3/h nicht dem für Wohnhäuser in üblicher Größe und Belegung hygienisch notwendigen Luftwechsel genügen, um Schadstoffe aus Möbeln und Teppichen, sowie Gerüche, Wasserdampf und CO₂ aus der Atemluft zuverlässig abzutransportieren.

Wandaufbauten

In einem Simulationslauf wurde der Wärmeschutz des Gebäudes, ausgehend von einem für ein gutes NEH typischen Wandaufbauten ($k_{Wand} = 0,186 \text{ W/m}^2\text{K}$), schrittweise verbessert.

Der Wärmeleitwert wurde aus der Summe aller Transmissionswärmeleitwerte (die Kellerdecke wird mit einem Gewicht von 0,33 berücksichtigt) und den spezifischen Lüftungswärmeverlusten gebildet:

$$H = \sum_{Haus} (k \cdot A) + 0,33 \cdot (k \cdot A)_{Kellerdecke} + \sum_{Haus} (\Psi \cdot l) + n_{\dot{a}q} \cdot c_p \cdot \rho \cdot V_{Haus} \quad (3)$$

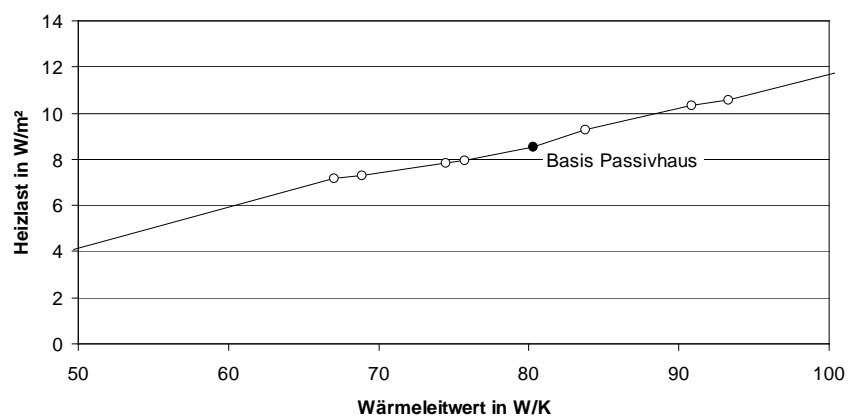


Abb. 3: Heizlast für unterschiedliche Wandaufbauten

In Abb. 3 ist die Auslegungheizlast über dem Wärmeleitwert der Häuser dargestellt. Der Verlauf der Kurven läßt einen annähernd linearen Zusammenhang erkennen, d.h. die Heizlast der Häuser steigt proportional zum Wärmeleitwert der Wandaufbauten an. Um den Grenzwert der maximalen Heizleistung von 10 W/m², bis zu dem auf ein separates Heizsystem verzichtet werden kann, einzuhalten, darf je nach Standort ein Wärmeleitwert von ca. 90 – 100 W/K nicht überschritten werden.

Verglasung

Um den Einfluß der Verglasungsqualität auf die Auslegung des Heizsystems zu überprüfen, wurde diese variiert. Es kamen folgende Verglasungen zum Einsatz (Glasstärke jeweils 4 mm):

Verglasung	k_V (W/m ² K)	g (%)	Beschreibung
3-fach ISO	1,69	67,6	3-fach Isolierglas mit Luftfüllung,
4-fach ISO	1,23	61,5	4-fach Isolierglas mit Luftfüllung,
2-fach WSA	1,43	65,9	2-fach Wärmeschutzglas, Argon und selektive Beschichtung,
3-fach WSA	0,75	52,6	3-fach Wärmeschutzglas, Argon und zwei selektive Beschichtungen,
3-fach WSK	0,62	52,8	3-fach Wärmeschutzglas, Krypton und zwei selektive Beschichtungen,
4-fach WSK	0,41	43,4	4-fach Wärmeschutzglas, Krypton und drei selektive Beschichtungen.

In Abb. 4 ist die Heizlast über dem k -Wert der Verglasung aufgetragen.

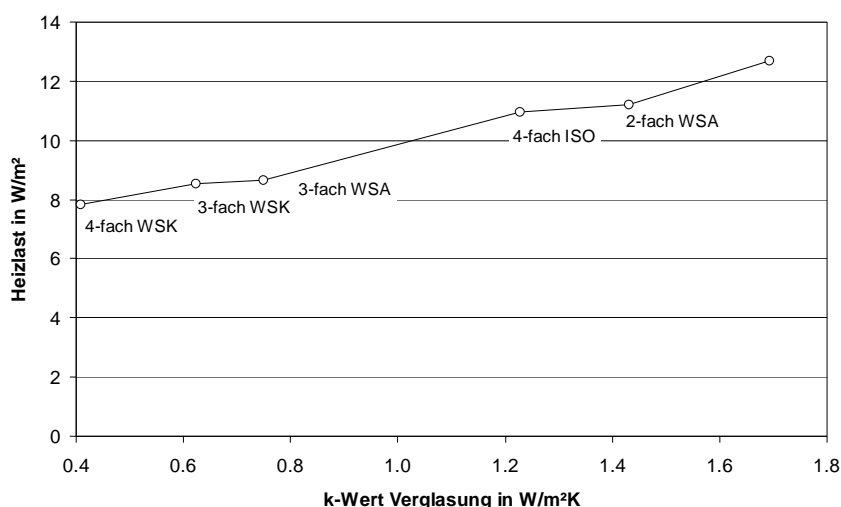


Abb. 4: Heizlast für unterschiedliche Verglasungen

Der Anstieg der Heizlastkurve ist nur annähernd linear. Das ist auf den Einfluß des g -Wertes der Verglasung zurückzuführen. Durch die Darstellung der Heizlast über dem Verglasungs- k -Wert werden in der x-Achse nur die Wärmeverluste der Fensterflächen, nicht aber die je nach Verglasung unterschiedlichen solaren Gewinne, aufgetragen.

Orientierung

Die untersuchten Gebäude sind im Basisfall alle optimal nach Süden ausgerichtet. In dieser Simulationsreihe wurden die Häuser aus der Hauptrichtung Süden heraus gedreht.

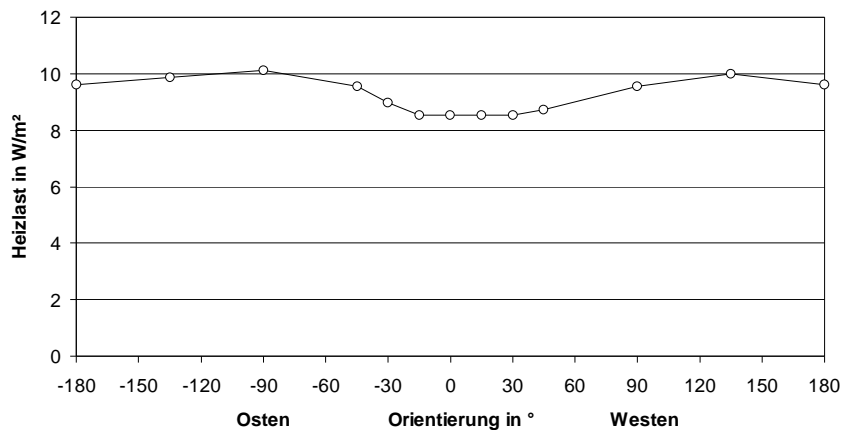


Abb. 5: Heizlast in Abhängigkeit von der Orientierung der Hauptfassade

Drehungen bis zu 30° aus der Südrichtung erhöhen die Auslegungsheizlast um weniger als 5 % und sind daher für die Auslegung nicht relevant. Erst stärkere Orientierungsabweichungen müssen bei der Auslegung des Heizungssystems berücksichtigt werden. Für eine Nordausrichtung sinkt die Auslegungsheizlast gegenüber einer Ost/West-Ausrichtung ein wenig, da die Verglasung der hinteren Fassade dann wieder eine optimale Südausrichtung bekommt.

Innere Speichermassen

In dieser Untersuchung wurden zusätzlich zu den bestehenden Wänden zwischen 0 und 29 m² Innenwände in jeden der sieben Räume eingebracht. Dabei wurde das Haus vollständig als Massivbau angenommen, die zusätzlichen Wände sind massive Kalksandsteinwände.

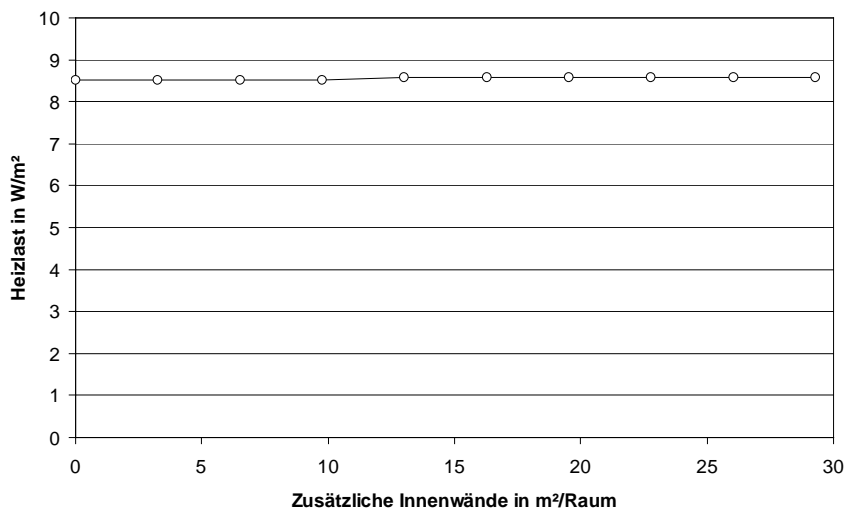
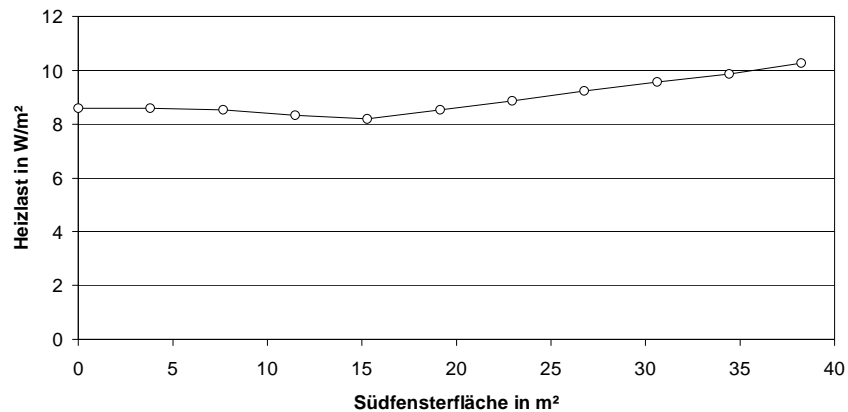


Abb. 6: Heizlast für eine Erhöhung der thermisch wirksamen Kapazität

Da das untersuchte Haus ohnehin eine Zeitkonstante von über 200 h besitzt, konnte ein nur sehr geringer Einfluß der zusätzlichen inneren Speichermassen auf die Auslegungsheizlast festgestellt werden.

Südfensterfläche

In diesem Simulationslauf wurde die Südfensterfläche (von 0 bis 38 m²) und mit ihr die Wärmebrücken durch Rahmen und Randverbund der Verglasung variiert und der Einfluß auf die Heizlast untersucht. Die Flächenangaben beziehen sich hierbei immer auf die transparente Verglasungsfläche. In Abb. 7 ist die Heizlast über der Südfensterfläche dargestellt.



**Abb. 7: Heizlast für eine Variation der Südfensterflächen
(mit 3-Scheiben Wärmeschutzverglasung und Kryptonfüllung)**

Die Heizlast sinkt bis zu einem Optimum von ca. 15 m² Südfensterfläche leicht ab, um für größere Südfensterflächen wieder zuzunehmen. Sie bleibt jedoch für beinahe sämtliche Fälle unter dem Grenzwert von 10 W/m² (Ausnahme: 38 m² Südfensterfläche).

Dieser gegenüber den anderen Untersuchungen gänzlich andere Verlauf der Heizlastkurve mußte näher untersucht werden. Bei einer genaueren Betrachtung der maximalen Heizleistungen fiel auf, daß diese je nach Fenstergröße in zwei unterschiedlichen Perioden auftraten. Beim Testreferenzjahr Hof waren dies der 4. Februar (kalt und klar) für kleine und der 13. Dezember (trüb und moderat) für große Südfensterflächen. Die jeweiligen Wetterperioden sind in Abb. 8 dargestellt.

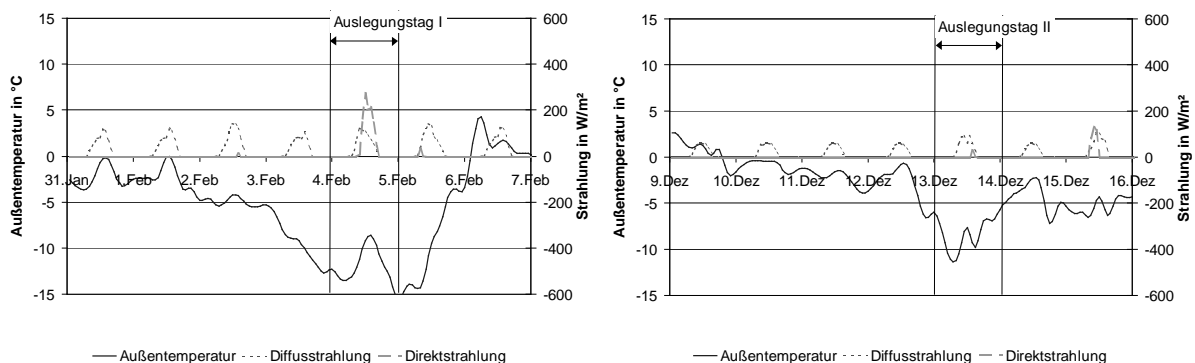


Abb. 8: Auslegungswetterperioden für kleine (<15 m²) und große Südfensterflächen (>15 m²)

In Abb. 9 sind die Heizleistungen für diese beiden Tage dargestellt. Durch den jeweiligen größeren Wert beider Kurven wird die Auslegungsheizlastkurve gebildet.

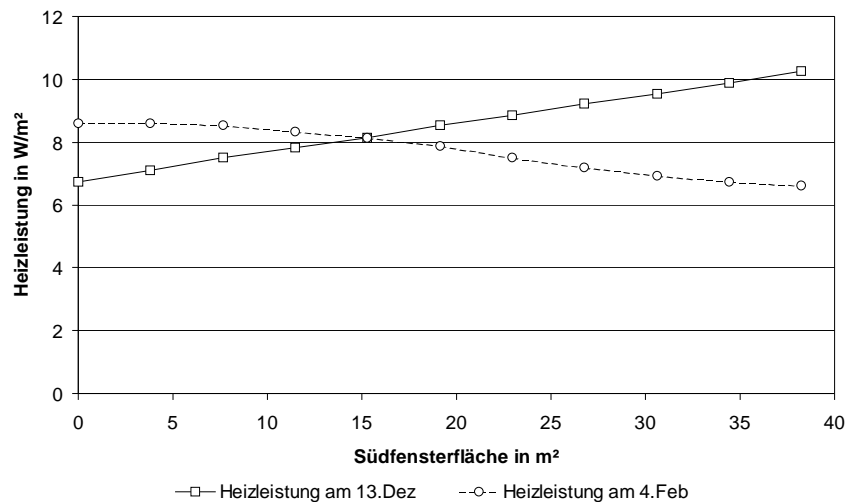


Abb. 9: Heizleistung an den zwei für die Auslegung relevanten Tagen

Für kleine Südfensterflächen überwiegen an dem kalten, relativ strahlungsreichen Tag (hier der 4. Februar) die (großen) Wärmeverluste die solaren Gewinne deutlich. Mit größer werdender Südfensterfläche steigen auch die solaren Gewinne, insgesamt sinkt dadurch die benötigte Heizleistung. Das bedeutet gleichzeitig, daß die Südfenster netto Gewinne aufweisen, die solaren Gewinne überwiegen deren Wärmeverluste.

Anders am trübem Auslegungstag: Da diesem Tag eine lange Wetterperiode ohne Direktstrahlung vorausgeht, ist der Einfluß der letzten eingestrahelten Solargewinne bereits abgeklungen. Der Wärmeschutz des Hauses wird mit größer werdenden Fensterflächen schlechter (da im Passivhaus die Wärmeverluste durch 1 m² Fensterfläche etwa acht mal so groß sind wie durch 1 m² Fassadenfläche). An trübem Tagen weisen die Fenster aufgrund unzureichender solarer Gewinne netto einen deutlichen Wärmeverluststrom auf. Die Differenz zwischen (verhältnismäßig geringeren) Wärmeverlusten des Gebäudes und (sehr kleinen) solaren Gewinnen führt zu einer steigenden Heizleistungskurve mit größer werdender Fensterfläche.

Festzuhalten bleibt, daß Häuser mit einem guten Dämmstandard und einer nennenswerten Südfensterfläche an sehr kalten, klaren Tagen ihre benötigte Heizleistung zu einem großen Teil durch die einfallende Sonneneinstrahlung decken. Ihre Heizlast tritt an kalten, trübem Tagen auf, die aber durch die Wolkendecke und den damit verstärkten Treibhauseffekt systematisch wärmer sind als klare Wintertage.

4 Vorschlag für eine stationäre Berechnung der Heizlast

Die Ergebnisse aus der Parametervariation lassen Zusammenhänge erkennen, die eine Bilanzierung der Wärmeverlustströme und -gewinnleistungen erlauben. Meist besteht zwischen den variierten Parametern und der Heizlast ein annähernd linearer Zusammenhang. Einzig die Heizlastkurve für die Südfensterflächenvariation weist einen gänzlich anderen Verlauf auf. Die Heizlast wird als Maximum aller Werte des Jahres ermittelt; dieses Maximum kann nach den durchgeführten Untersuchungen an zwei völlig unterschiedlichen Tagen vorliegen.

Ansatz für die Bestimmung der Heizlast:

Für die beiden auslegungsrelevanten Tage wird mit Hilfe der jeweiligen Wetterdaten die benötigte tagesmittlere Heizleistung bestimmt. Das Maximum dieser beiden Heizleistungen ist die Heizlast des Gebäudes. Die auslegungsrelevanten Tage werden dabei durch die Südfensterflächenvariation vorgegeben, da die Hauptfensterfläche von Passivhäusern normalerweise nach Süden (mit kleinen Abweichungen) orientiert ist.

Im folgenden werden Formeln und Wetterdaten für die Berechnung der Heizleistungen der beiden Auslegungstage bestimmt. Es wird darauf geachtet, daß die benötigten Gebäudedaten (Luftwechsel, Geometrie etc.) aus dem PHPP-Verfahren [8] übernommen werden können, dadurch wird die Datenerfassung bedeutend erleichtert. In Anlehnung an die DIN 4701 werden für unterschiedliche Wetterregionen Berechnungsaußentemperaturen benannt, da der Standort der Häuser einen erheblichen Einfluß auf die Größe der Heizlast hat. Die Auslegungstemperaturen sind fiktive, für die Berechnung der Heizlast relevante, Temperaturen. Sie weichen von den tagesmittleren Außentemperaturen an den Auslegungstagen nach oben hin ab. In ihnen spiegelt sich auch die thermische Speicherfähigkeit und der Dämmstandard des Gebäudes wieder. Sie werden im folgenden bestimmt.

Um die solaren Wärmegewinne berechnen zu können, werden weitere Untersuchungen zur Solarstrahlung an den unterschiedlichen Standorten durchgeführt.

Wärmeverlustströme

Die Wärmeverluste werden beeinflusst durch den Wärmeleitwert der opaken Außenhaut des Hauses, den Wärmeleitwert der Wärmebrücken, den Wärmeleitwert der Kellerdecke des Hauses, den k -Wert der Fenster, die Größe der Fensterflächen und den äquivalenten Luftwechsel.

Die Wärmeverlustströme lassen sich wie folgt aufsummieren:

$$P_{\text{Verlust}} = P_{\text{Transm. Außenoberflächen}} + P_{\text{Transm. Wärmebrücken}} + P_{\text{Transm. Keller}} + P_{\text{Transm. Fenster}} + P_{\text{Lüftung}} \quad (4)$$

Transmissionswärmeverluste der opaken Außenbauteile

$$P_{\text{Transmission, Außenoberflächen}} = \sum_{\text{Haus}} (k \cdot A) \cdot (\vartheta_{\text{innen}} - \vartheta_{\text{ausßen}}) \quad (5)$$

Transmissionswärmeverluste durch Wärmebrücken gegen Außenluft

$$P_{\text{Transmission, Wärmebrücken}} = \sum_{\text{Haus}} (\Psi \cdot l) \cdot (\vartheta_{\text{innen}} - \vartheta_{\text{ausßen}}) \quad (6)$$

Zur Ermittlung der Transmissionswärmeverluste durch Außenbauteile werden entweder

- die Innenmaße der an die Außenluft grenzenden Bauteile und innenmaßbezogene Wärmebrückenverlustkoeffizienten (Ψ_i), wie sie üblicherweise in den Wärmebrückennachschlagewerken angegeben sind [6],

oder

- die Außenmaße der Außenoberflächen mit auf die Außenoberfläche bezogenen Ψ_e -Werten (müssen meist umgerechnet werden, wobei unter Umständen geo-

metrisch bedingte Wärmebrücken mit negativen Ψ_e -Werten vernachlässigt werden können),

verwendet.

Transmissionswärmeverluste der Kellerdecke und erdreichberührender Bauteile

$$P_{\text{Transmission, Keller}} = \sum_{\text{Keller, Erdreich}} (k \cdot A) \cdot (\vartheta_{\text{innen}} - \vartheta_{\text{Keller}}) \quad \text{mit } \vartheta_{\text{Keller}} = 10^\circ\text{C} \quad (7)$$

Eine erhöhte Temperatur von 10°C darf außen für an Kellerräume oder Erdreich angrenzende Bauteile angenommen werden. Die Temperatur in Wintergärten oder unbeheizten Anbauten entspricht allerdings der Außentemperatur.

Transmissionswärmeverluste durch Fenster

$$P_{\text{Transmission, Fenster}} = \sum_{\text{Fenster}} (k \cdot A) \cdot (\vartheta_{\text{innen}} - \vartheta_{\text{ausen}}) \quad (8)$$

Hier sind in der Regel

- Fenster- k -Werte mit Rohbaumaßen [7] zu verwenden (k -Werte nach [8]).

Lüftungswärmeverluste

$$P_{\text{Lüftung}} = n_{\text{aq}} \cdot V_{\text{Haus}} \cdot \rho \cdot c \cdot (\vartheta_{\text{innen}} - \vartheta_{\text{ausen}}) \quad (9)$$

$$\text{mit } n_{\text{aq}} = (1 - \eta_{\text{WRG}}) \cdot n_{\text{Anlage}} + n_{\text{Restinfiltration}} \quad (10)$$

$$\text{und } n_{\text{Restinfiltration}} = \begin{cases} 0,2/h & \text{für Häuser mit gutem Luftdichtigkeitskonzept} \\ n_{50}/14 & \text{für Häuser mit durchgeführtem Drucktest} \end{cases} \quad (11)$$

Das anzusetzende Hausvolumen ist das Netto-Volumen (Luftvolumen), welches durch die thermische Hülle begrenzt wird (nicht beheizte Räume eingeschlossen).

Wärmegewinne (Wärmelasten)

Wärmegewinne entstehen durch

- Personenabwärme
 - Abwärme elektrischer Geräte
 - solare Gewinne (richtungsabhängig)
- } = interne Gewinne

Interne Gewinne

Die Personenabwärme und die Abwärme elektrischer Geräte werden zu internen Wärmequellen zusammengefaßt. Diese werden in der Literatur sehr unterschiedlich angegeben und schwanken für Einfamilienhäuser zwischen $2,9 \text{ W/m}^2$ [9], $2,5 \text{ W/m}^2$ [5], $1,5 \text{ W/m}^2$ [10] und $1,0 \text{ W/m}^2$ [11]. Für das hier vorgestellte Berechnungsverfahren wird der Wert von $1,6 \text{ W/m}^2$ nach [8] vorgeschlagen, auch, um bzgl. der freien Wärme auf der sicheren Seite zu bleiben.

Solare Gewinne und Wetterdaten

Zur Ermittlung der für die stationäre Heizlastberechnung benötigten Wetterdaten an den beiden auslegungsrelevanten Tagen galt der Ansatz, die Heizlast des Gebäudes wie folgt berechnen zu können:

$$P_{\text{Heizlast}} = P_{\text{Verluste}} - P_{\text{Gewinne}} \quad (\text{gilt für } P_{\text{Gewinne}} < P_{\text{Verluste}} / 4) \quad (12)$$

Die Verluste des Hauses sind bekannt und können über den Wärmeleitwert H (gebildet aus Transmissionswärme- und Lüftungsleitwert) und einer Auslegungstemperatur berechnet werden.

Die für die solaren Gewinne maßgebenden Strahlungsdaten wurden durch Zurückrechnen aus Simulationen ermittelt. Dazu wurde das Haus in die vier Himmelsrichtungen gedreht und jeweils eine Variation der Fensterfläche in der Hauptfassade von 0 – 38 m² durchgeführt.

Für die solaren Gewinne gilt

$$P_{\text{solare Gewinne}} = (r \cdot g \cdot A)_{\text{Verglasung}} \cdot S_{\text{Fensterebene}} \quad (13)$$

$S_{\text{Fensterebene}}$ kann hier als Strahlung in Fensterebene betrachtet werden. Physikalisch stimmt diese Überlegung nicht ganz, da das System „Passivhaus“ dynamisch auf das Wetter reagiert und Ein- und Ausspeichervorgänge in der Bilanz berücksichtigt werden müssten. Vereinfacht können diese jedoch vernachlässigt werden (sie sind teilweise schon durch die Wahl der Auslegungstemperatur berücksichtigt), da die Heizlast meist in einer trüben Periode auftritt, in der das Haus als quasi-stationär betrachtet werden kann.

Aus dem Fußpunkt der Heizleistungskurve bei 0 m² Fensterfläche konnten wir über den Wärmeleitwert des Hauses die Auslegungstemperatur bestimmen, da in diesem Fall keinerlei Gewinne (auch keine inneren Wärmequellen) angesetzt wurden.

$$P_{\text{trüber Tag, 0 m}^2} = H_{\text{Haus, 0 m}^2} \cdot (\vartheta_{\text{innen}} - \vartheta_{\text{trüber Tag}}) \quad (14)$$

$$\text{und } P_{\text{klarer Tag, 0 m}^2} = H_{\text{Haus, 0 m}^2} \cdot (\vartheta_{\text{innen}} - \vartheta_{\text{klarer Tag}}) \quad (15)$$

Die Steigung der Heizleistungskurve über dem Verglasungsanteil (aufgrund des quasi-stationären Verhaltens des Hauses ungefähr eine Gerade, vgl. Abb. 7) wird durch die Verluste des Hauses und die solaren Gewinne bestimmt. Mit den Auslegungstemperaturen und dieser Steigung konnten wir Werte für die in der Fensterebene ankommende tagesmittlere nutzbare Solarstrahlung an den jeweiligen Tagen berechnen:

$$P_{\text{solare Gewinne}} = P_{\text{trüber Tag}} - H \cdot (\vartheta_{\text{innen}} - \vartheta_{\text{trüber Tag}}) = (r \cdot g \cdot A)_{\text{Verglasung}} \cdot S_{\text{trüber Tag}} \quad (16)$$

$$\text{oder } S_{\text{trüber Tag}} = \frac{P_{\text{trüber Tag}} - H \cdot (\vartheta_{\text{innen}} - \vartheta_{\text{trüber Tag}})}{(r \cdot g \cdot A)_{\text{Verglasung}}} \quad (17)$$

Mit dem Wärmeleitwert $H = 63,0 \text{ W/K}$, der Raumtemperatur $\vartheta_{\text{innen}} = 20 \text{ °C}$ und der simulierten Heizleistung $P_{\text{trüber Tag, 0 m}^2} = 1468,5 \text{ W}$ ergab sich für die Auslegungstemperatur an dem trüben Tag:

$$\vartheta_{\text{trüber Tag}} = \vartheta_{\text{innen}} - \frac{P_{\text{trüber Tag}, 0 \text{ m}^2}}{H_{\text{Haus}, 0 \text{ m}^2}} = -3,3 \text{ °C} \quad (18)$$

Für den klaren Tag wurde ebenso verfahren, für die Auslegungstemperatur ergab sich hier:

$$\vartheta_{\text{klarer Tag}} = 20 \text{ °C} - \frac{1795,5 \text{ W}}{63,0 \text{ W/K}} = -8,5 \text{ °C}. \quad (19)$$

Die mit diesen Temperaturen und Formeln bestimmten Solarstrahlungswerte für die vier Haupthimmelsrichtungen finden sich abgerundet in Tabelle 1:

	$\vartheta_{\text{Auslegung}}$	S_{Norden}	S_{Osten}	$S_{\text{Süden}}$	S_{Westen}
klarer Tag	-9,0 °C	5 W/m ²	10 W/m ²	40 W/m ²	10 W/m ²
trüber Tag	-4,0 °C	5 W/m ²	5 W/m ²	5 W/m ²	5 W/m ²

Tabelle 1: Wetterdaten für die beiden Auslegungstage

Solche Berechnungen wurden für alle zwölf Wetterregionen (Testreferenzjahre) und vier Himmelsrichtungen durchgeführt (Tabelle 2). Damit lassen sich nun anhand der Fensterfläche, des g -Wertes der Verglasung und der Strahlungsdaten die solaren Heizbeiträge abschätzen.

Wetterregion			Temp. in °C	Strahlung in W/m ²			
TRY	Klimaregion	Repräsentanzstation	ϑ	N	O	S	W
01	Nord- und Ostseeküste, nördliches Schleswig-Holstein	Bremerhaven - Signalturm	-5.0	5	15	70	15
			-2.0	5	5	5	5
02	Nord- und westdeutsches Tiefland	Hannover - Langenhagen	-5.0	5	10	50	10
			-1.0	5	5	5	5
03	Ruhrgebiet und weitere Ballungsgebiete des Flachlandes	Essen - Mülheim	-4.0	5	15	60	15
			-2.0	5	5	15	5
04	Nördliche und westliche Mittelgebirge ohne Hochlagen	Trier - Petrisberg	-4.0	5	15	60	15
			-1.0	5	5	5	5
05	Franken und nördliches Baden-Württemberg	Würzburg - Stein	-8.0	5	15	60	15
			0.0	5	5	5	5
06	Nördlicher Oberrheingraben	Frankfurt - Flughafen	-6.0	5	15	50	15
			-1.0	5	5	5	5
07	Südlicher Oberrheingraben	Freiburg (Wetteramt)	-5.0	5	15	70	15
			-1.0	5	5	5	5
08	Donaubecken und Alpenvorland bis ca. 600 m Höhe	Augsburg - Kriegshaber	-9.0	5	15	60	15
			-3.0	5	5	5	5
09	Alpenvorland von ca. 600 - 1000 m	München - Riem	-8.0	5	15	60	15
			-4.0	5	5	5	5
10	Schwarzwald, Schwäbische und Fränkische Alb	Stötten	-7.0	5	15	60	15
			-4.0	5	5	5	5
11	Hochlagen der nördlichen und westlichen Mittelgebirge	Hof - Hohensaas	-9.0	5	10	40	10
			-4.0	5	5	5	5
12	Bodensee mit Umgebung	Friedrichshafen	-6.0	5	5	25	5
			-5.0	5	5	5	5

Tabelle 2: Wetterdaten an den beiden Auslegungstagen für die zwölf Wetterregionen

Wärmestrombilanz

Die Berechnungsformeln für Wärmelasten und Verlustströme, mit denen die Heizlast eines Gebäudes berechnet werden kann, werden hier nochmals zusammengefaßt:

Verlustströme

$$P_{\text{Verluste}} = H_{\text{Haus}} \cdot (20^\circ\text{C} - \vartheta_{\text{Auslegung}}) + H_{\text{Keller}} \cdot (20^\circ\text{C} - 10^\circ\text{C}) \quad (20)$$

$$\text{mit } H_{\text{Haus}} = \sum_{\text{Außenflächen}} (k \cdot A) + n_{\text{äq}} \cdot c \cdot V_{\text{Haus}} + \sum_{\text{Wärmebrücken}} (\Psi \cdot l), \quad (21)$$

$$n_{\text{äq}} = n_{\text{Anlage}} \cdot (1 - \eta_{\text{WRG}}) + n_{\text{Restinfiltration}} \quad (22)$$

$$\text{und } H_{\text{Keller}} = (k \cdot A)_{\text{Kellerdecke}} + \Psi_{\text{Kellerdecke}} \cdot l. \quad (23)$$

Wärmegewinne

$$P_{\text{Gewinne}} = P_{\text{int}} + P_{\text{solar}} \quad (24)$$

$$\text{mit } P_{\text{int}} = \begin{cases} 1,6 \text{ W/m}^2 \cdot A_{\text{Wfl}} & \text{für ein Einfamilienhaus} \\ 2,1 \text{ W/m}^2 \cdot A_{\text{Wfl}} & \text{für ein Reihenhaus oder Mehrfamilienhaus} \end{cases} \quad (25)$$

$$\text{und } P_{\text{solar}} = \sum_{\text{Himmelsrichtungen}} ((r \cdot g \cdot A)_{\text{Verglasung}} \cdot S_{\text{Himmelsrichtung}}) \quad (26)$$

Bilanz

$$P_{\text{Heizleistung } 1,2} = P_{\text{Verluste } 1,2} - P_{\text{Gewinne } 1,2} \quad (27)$$

$$P_{\text{Heizlast}} = \max(P_{\text{Heizleistung } 1}; P_{\text{Heizleistung } 2}) \quad (28)$$

Zur Vereinfachung der Berechnung wurde ein Excel-Blatt erstellt, in dem alle notwendigen Angaben abgefragt und verarbeitet werden, sämtliche Angaben zur Anlagentechnik und zur Bauphysik können dabei aus dem PHPP-Verfahren übernommen werden [8]. Für die solaren Gewinne werden Reduktionsfaktoren eingeführt, sie berücksichtigen die Verringerung der solaren Gewinne durch Verschattung, Vorhänge und Verschmutzung der Fenster [8]. Die Transmissionswärmeverluste durch die Außenbauteile des Bades werden hier mit um 2 K erhöhten Innentemperaturen (22 °C nach [12]) berechnet. Die Heizlast wird aus dem Maximalwert beider Wärmebilanzen (der für einen strahlungsreichen und der für einen strahlungsarmen Tag) gebildet.

Objekt	Passivhaus Kranichstein		Energiebezugsfläche AEB:		156.0 m ²		
Standort	Darmstadt						
Wetterregion	Nördlicher Oberrheingraben						
[06]							
Beuteile	Fläche m ²	k-Wert W/(m ² K)	Faktor immer 1.0	TempDiff 1 K	TempDiff2 K	P _T 1 W	P _T 2 W
1. Außenwand	135.0	* 0.138	*	26.0	bzw. 21.0	= 484.5	bzw. 391.4
2. Dach	54.1	* 0.094	*	26.0	bzw. 21.0	= 132.0	bzw. 106.6
3. Fenster	25.4	* 0.622	*	26.0	bzw. 21.0	= 411.4	bzw. 332.3
4. Kellerdecke	67.6	* 0.134	*	10.0	bzw. 10.0	= 90.7	bzw. 90.7
5. Trennwand	76.5	* 1.919	*	0.0	bzw. 0.0	= 0.0	bzw. 0.0
6. Außenwand Bad	11.7	* 0.138	*	28.0	bzw. 23.0	= 45.2	bzw. 37.2
7. Dach Bad	15.9	* 0.094	*	28.0	bzw. 23.0	= 41.8	bzw. 34.4
8. Wärmebrücken	1.0	* 18.308	*	26.0	bzw. 21.0	= 476.0	bzw. 384.5
Transmissionswärmelast P_T						Summe =	1681.7 bzw. 1376.9
Luftvolumen V _L			AEB m ²	lichte Raumhöhe m			m ³
			156.0	* 2.5			= 390.0
energ. wirks. Luftwechsel	n _L Anlage 1/h	(1.00	-	0.80) +	n _L Rest 1/h
	0.40	*					= 0.105
	V _L m ³	n _L 1/h	c _{Luft} Wh/(m ³ K)	TempDiff 1 K	TempDiff2 K	P _L 1 W	P _L 2 W
Lüftungswärmelast P_L	390.0	* 0.105	* 0.33	* 26.0	bzw. 21.0	= 351.4	bzw. 283.8
Summe Wärmelast P_V						P _T + P _L =	2033.1 bzw. 1660.7
Ausrichtung der Fläche	Fläche m ²	g-Wert (senkr. Einstrahlung)	Reduktionsfaktor	Strahlung 1 W/m ²	Strahlung 2 W/m ²	P _S 1 W	P _S 2 W
1. Nord	6.3	* 0.528	* 0.7	* 5	bzw. 5	= 11.6	bzw. 11.6
2. Nord-Ost		* 0.528	* 0.7	* 5	bzw. 5	= 0.0	bzw. 0.0
3. Ost		* 0.528	* 0.7	* 15	bzw. 5	= 0.0	bzw. 0.0
4. Süd-Ost		* 0.528	* 0.7	* 30	bzw. 5	= 0.0	bzw. 0.0
5. Süd	19.1	* 0.528	* 0.7	* 50	bzw. 5	= 353.0	bzw. 35.3
6. Süd-West		* 0.528	* 0.7	* 30	bzw. 5	= 0.0	bzw. 0.0
7. West		* 0.528	* 0.7	* 15	bzw. 5	= 0.0	bzw. 0.0
8. Nord-West		* 0.528	* 0.7	* 5	bzw. 5	= 0.0	bzw. 0.0
9. Horizontal		* 0.528	* 0.7	* 0	bzw. 0	= 0.0	bzw. 0.0
Wärmeangebot Solarlast P_S						Summe =	364.6 bzw. 46.9
Interne Wärmelast P _I			spez. Leistung W/m ²	AEB m ²			P _I 1 W
			1.6	* 156.0			= 249.6 bzw. 249.6
Wärmegewinne P _G						P _S + P _I =	614.2 bzw. 296.5
						P _V - P _G =	1418.8 bzw. 1364.2
Heizwärmelast P_H						=	1418.8 W
						=	9.1 W/m ²

Tabelle 3: Excel-Blatt zur Auslegung der Heizlast in Niedrigenergie- und Passivhäusern

Validierung

Um das in den vorherigen Abschnitten aufgestellte Berechnungsverfahren zu überprüfen, wurden Parametervariationen am Passivhaus durchgeführt. Dazu wurde die Breite des Hauses bei gleichbleibender Wohnfläche (156 m²) zwischen 4,3 m und 13,0 m variiert und der simulierte und berechnete Verlauf der Heizlastkurve für verschiedene Fensterflächenanteile der Südfassade (7 %, 34 % und 68 %) dargestellt

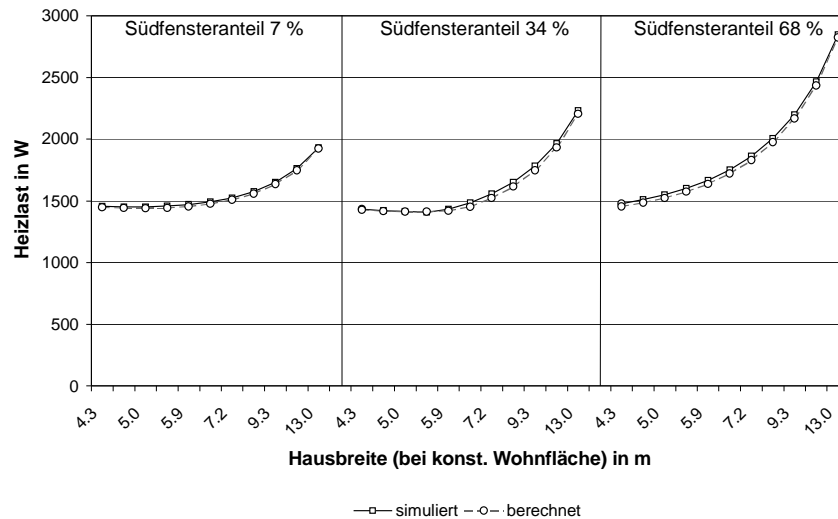


Abb. 10: Variation der Hausbreite für unterschiedliche Fensterflächenanteile der Südfassade am Basisfall Passivhaus

Im Basisfall Passivhaus beträgt die maximale Abweichung der errechneten von den simulierten Werten 34 W (oder 2,3 %) bei einer Hausbreite von 6,5 m und 34 % Südfensterflächenanteil. Die Übereinstimmung der simulierten und der berechneten Heizlasten ist damit sehr gut. Validierungsrechnungen mit einem Niedrigenergiehaus ergaben ebenfalls Abweichungen, die deutlich kleiner als 5% waren.

Dieselben Untersuchungen wurden für ein Gebäude mit 22 °C Raumlufttemperatur durchgeführt, hier ist die Übereinstimmung der berechneten und simulierten Heizlast sogar noch etwas besser.

5 Schlußbetrachtung

Mit Hilfe von Simulationsrechnungen ist es gelungen, ein genaueres Berechnungsverfahren zur Bestimmung der Auslegungsheizlast von Niedrigenergie- und Passivhäusern zu entwickeln. Es läßt sich auf ein Gebäude als ganzes oder raumweise zur Bestimmung der in den einzelnen Räumen benötigten Heizleistungen anwenden. Es unterscheidet sich von der DIN 4701 im wesentlichen durch

- die Berücksichtigung von Wärmegewinnen aus elektrischer Abwärme und Personenabwärme sowie solaren Gewinnen,
- die Berücksichtigung von Wärmerückzahlen einer Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung aus der Abluft,
- die Bilanzierung der Wärmeverlust- und -gewinnströme an zwei verschiedenen Auslegungstagen, einem mit tiefen Außentemperaturen und dafür hoher solarer Einstrahlung und einem mit moderaten Außentemperaturen und minimaler direkter Einstrahlung.
- die Aufteilung der Bundesrepublik in zwölf Wetterregionen (wie die des Testreferenzjahres des Deutschen Wetterdienstes) und
- eine korrigierte Außentemperatur, die die großen Zeitkonstanten der Häuser berücksichtigt.

Die Validierungsrechnungen ergaben eine gute Übereinstimmung der stationär berechneten mit der simulierten Heizlast beim Einfamilienhaus im Passivhaus- und Niedrigenergiehausstandard (mit Abweichungen kleiner 5 %). Eine Überprüfung des Berechnungsverfahrens für Gebäude mit anderem Baustandard (Null-Energiehäuser, sanierte Altbauten) oder anderer Nutzung (Mehrfamilienhäuser, Bürogebäude) steht noch aus.

6 Literatur

- [1] Werner, J.; Kirtschig, T., 1998: Zuluftnachheizung als Heizwärmeverteilsystem In: Tagungsband „2. Passivhaus-Tagung“ Passivhaus Institut, Darmstadt
- [2] Feist, W., 1997: Der Härte-test: Passivhäuser im strengen Winter 1996/97, In: GRE inform 12/1997
- [3] Feist, W., 1994: Thermische Gebäudesimulation. Kritische Prüfung unterschiedlicher Modellansätze, Verlag C.F. Müller, Heidelberg
- [4] Feist, W., 1996: 10 Thesen zum energiesparenden Bauen In: Tagungsband „1. Passivhaus-Tagung“ Passivhaus Institut, Darmstadt
- [5] Loga, T.; Imkeller-Benjes, U., 1997: Energie-Paß Heizung/Warmwasser, Energetische Qualität von Baukörper und Heizungssystem IWU, Darmstadt
- [6] Hauser, G.; Stiegel, H., 1996: Wärmebrückenatlas für den Mauerwerksbau Bauverlag GmbH, Wiesbaden und Berlin
- [7] DIN EN 10077, 1994 (Norm-Entwurf): Fenster, Türen und Abschlüsse; Wärmedurchgangskoeffizient; Berechnungsverfahren Dt. Fassung prEN 10077:1994/01 Beuth-Verlag, Berlin
- [8] Feist, W.; Baffia, E.; Schnieders, J., 1998: Passivhaus Projektierungs Paket (PHPP), Anforderungen an qualitätsgeprüfte Passivhäuser Fachinformation PHI-1998/1, Darmstadt
- [9] Wärmeschutzverordnung 1995
- [10] Institut Wohnen und Umwelt, 1996: Leitfaden energiebewußte Gebäudeplanung (LEG), Hessisches Ministerium für Umwelt, Energie und Bundesangelegenheiten Wiesbaden
- [11] Ebel, W., 1997: Interne Wärmequellen – Erfahrungen aus dem Passivhaus In: Protokollband Nr. 5 „Energiebilanz und Temperaturverhalten“ Passivhaus Institut, Darmstadt
- [12] DIN 4701, Teil 1,2 1995 (Norm-Entwurf): Regeln für die Berechnung der Heizlast von Gebäuden Beuth-Verlag, Berlin
- [12a] DIN 4701, 1983: Regeln zur Berechnung des Wärmebedarfs von Gebäuden Beuth-Verlag, Berlin
- [13] Bisanz, C., 1998: Heizlastauslegung im Niedrigenergie- und Passivhaus, Diplomarbeit ITW Universität Stuttgart
- [14] DIN EN 12831, 1997 (Norm-Entwurf): Heizungssysteme in Gebäuden – Verfahren zur Berechnung der Norm-Heizlast Deutsche Fassung prEN 12831:1997 Beuth Verlag, Berlin
- [15] Ebel, W.; Feist, W.; Loga, T., 1995: Nachweisverfahren für den Passivhausstandard auf der Basis von Energiekennwerten LEG/Ph IWU, Darmstadt
- [16] Feist, W., 1992: Passivhäuser in Mitteleuropa Dissertation Gesamthochschule Kassel
- [17] Feist, W., 1996: Grundlagen der Gestaltung von Passivhäusern Das Beispiel GmbH, Darmstadt