

# Heizlast in Passivhäusern – Validierung durch Messungen

Dr. Wolfgang Feist

# Heizlast in Passivhäusern – Validierung durch Messungen

Endbericht

**IEA SHC TASK 28 / ECBCS ANNEX 38**

**Forschungsvorhaben im Rahmen der nationalen  
Beteiligung an der Arbeitsgruppe 'Sustainable Solar  
Housing' der Internationalen Energie Agentur IEA**

**Subtask B: Design und Analyse**

<p><b>Autor:</b> Dr. Wolfgang Feist</p> <p><b>Herausgeber:</b> Passivhaus Institut Rheinstraße 44/46 D-64283 Darmstadt Tel: 06151 / 82699-0 Fax: 06151 / 82699-11 E-Mail: mail@passiv.de internet: www.passiv.de</p> <p><b>Darmstadt Juni 2005</b></p>	<p>Dieser Bericht entstand im Rahmen des Forschungsprojekts <b>IEA SHC TASK 28 / ECBCS ANNEX 38</b> als nationale Beteiligung an der Arbeitsgruppe <b>'Sustainable Solar Housing'</b> der Internationalen Energieagentur IEA</p> <p>Der vorliegende Bericht bezieht sich auf die Forschungsarbeiten im Subtask B: <b>Design und Analyse</b>, darin der Unterpunkt „Überprüfung und ggf. Erweiterung des Passivhaus- Projektierungs Pakets“</p> <p>Die nationalen Forschungsarbeiten wurden teilweise finanziert vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie BMWi vertreten durch den Projektträger Forschungszentrum Jülich GmbH (BEO).</p> <p><b>Danksagung:</b> In diesem Bericht wurden u.a. Messdaten aus dem Demonstrationsprojekt „CEPHEUS“ der EU und aus dem Forschungsprojekt „Ein nordorientiertes Passivhaus“ der Frankfurter Aufbau AG weitergehend ausgewertet.</p>
--	---

# Heizlast in Passivhäusern – Validierung durch Messungen

## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Aufgabenstellung und Stand der Forschung: Heizleistung in Passivhäusern .....</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>Validierung an Messergebnissen im kalten Winter 1996/97 (Passivhaus Darmstadt-Kranichstein).....</b>	<b>9</b>
2.1	Zu den klimatischen Randbedingungen der betrachteten Wetterperiode .....	9
2.2	Die gemessenen Innentemperaturen und Heizleistungen im Passivhaus Darmstadt-Kranichstein im betreffenden Zeitraum.....	11
2.3	Modellrechnung zum Verlauf der Heizleistungen .....	16
2.3.1	Basisüberlegungen zur Modellbildung .....	16
2.3.2	Definition des verwendeten Modells.....	17
2.3.3	Modellgleichungen.....	20
2.3.4	Vergleich Modell/Messung für den Winter 1996/97 .....	21
2.3.5	Randbedingungen der Auslegung nach den Klimadaten 1996/97 .....	22
<b>3</b>	<b>Validierung aus Messungen in der Passivhaussiedlung Hannover.....</b>	<b>26</b>
3.1	Die Passivhaus-Siedlung am Kronsberg.....	26
3.2	Messung von Heizleistungen in der Siedlung am Kronsberg.....	29
3.3	Analyse: reicht die Heizleistung aus?.....	32
3.3.1	Sehr sparsamer Heizer.....	36
3.3.2	Gleichmäßiges Heizen.....	37
3.3.3	Häuser mit Leistungsspitzen.....	38
3.3.4	Haus mit großzügiger Beheizung.....	40
3.4	DYNBIL-Modell des Reihenendhauses Hannover .....	44
3.5	Simulation im Basisfall: Reihenendhaus als Passivhaus, wie gebaut.....	47
3.6	Simulation Reihenendhaus reduziert auf EnEV-Standard .....	49
3.7	Heizungsunterbrechung für 14 Tage .....	51
3.8	Auswirkungen von fehlender Heizleistung (Auslegungsfehler oder Baumängel).....	58

3.9	Sondersituation: Kurzfristige Temperaturerhöhung.....	63
3.10	Nachtabenkung (-abschaltung).....	66
3.11	Vergessenes geöffnetes Fenster.....	71
3.12	Härtetest: Besonders strenge Frostperiode.....	72
3.12.1	Basisfall Passivhaus: Endhaus Kronsberg / Härtetest Frostperiode / ohne Leistungsbegrenzung.....	73
3.12.2	Basisfall Passivhaus: Endhaus Kronsberg / Härtetest Frostperiode mit Leistungsbegrenzung auf die ursprüngliche Maximalleistung .....	75
3.12.3	BasisfallEnEV: Endhaus Kronsberg / Härtetest Frostperiode .....	77
<b>4</b>	<b>Validierung aus weiteren Messergebnissen.....</b>	<b>79</b>
4.1	Passivhaussiedlung (22 WE) und Niedrigenergiehauszeile in Wiesbaden am Schloss Freudenberg.....	79
4.2	Sozialer Geschosswohnungsbau Kassel Marbachshöhe (23 WE).....	89
4.3	Mehrfamilienhaus in alpiner Lage: Egg, Vorarlberg (4 WE).....	94
4.4	Reihenhäuser am Bodensee: Hörbranz, Vorarlberg (3 WE).....	99
4.5	Wolfurt, Vorarlberg (10 WE).....	104
4.6	Dornbirn-Knie, Vorarlberg (Einfamilienhaus).....	109
4.7	Gnigl, Salzburg (6 WE) .....	114
4.8	Kuchl, Salzburg (25 WE).....	119
4.9	Horn, Niederösterreich (Einfamilienhaus).....	124
4.10	Steyr-Dietach, Oberösterreich (3 WE).....	129
4.11	Nordorientiertes Passivhaus bei St. Jakob, Frankfurt (8 WE) .....	134
<b>5</b>	<b>Zusammenfassung und Empfehlungen.....</b>	<b>143</b>
5.1	Zusammenfassung: Messergebnisse Heizleistungen.....	143
5.2	Zusammenfassung: Messergebnisse Innen/Außentemperaturkorrelation.....	144
5.3	Empfehlungen.....	145
<b>6</b>	<b>Literatur.....</b>	<b>147</b>



# 1 Aufgabenstellung und Stand der Forschung: Heizleistung in Passivhäusern

Historisch war die Auslegung von Heizanlagen, sprich die Bestimmung der erforderlichen Heizleistung einer zu installierenden Heizung die erste, lange Zeit einzige und auch heute immer noch wichtigste Aufgabe der vorausgreifenden Planung eines Gebäudes in Bezug auf die Anlagentechnik. In Deutschland beruhte diese Auslegungsrechnung auf der Norm DIN 4701. Noch bis zur Ausgabe vom März 1983 nannte sich die Norm „Regeln für die Berechnung des Wärmebedarfs von Gebäuden“, kurz "Wärmebedarfsberechnung", obwohl der bestimmte Wert immer die heute korrekt als Heizlast bezeichnete Größe war (maximal unter vorgegebenen Bedingungen auftretende Heizleistung).

Bis in die Mitte der neunziger Jahre war das Interesse am rechnerisch im Voraus projektierten Jahreseinsatz an Heizenergie, nämlich dem „Jahresheizwärmebedarf“, gering. Dessen Abschätzung wurde vielmehr stark vereinfacht mittels einer proportionalen Hochrechnung aus der Heizlast (nach DIN 4701) auf Basis einer VDI-Richtlinie durchgeführt [VDI 2067]. Die dabei verwendeten Ansätze waren extrem simpel – es wurde ein sogenannter Vollbenutzungsstundenfaktor verwendet und das Ergebnis, das sich regelmäßig als sehr viel höher als die gemessenen Verbrauchswerte erwiesen hat, mit Korrekturfaktoren  $f_1$ ,  $f_2$ ,  $f_3$ ... den Realitäten angepasst. Diese Abschätzung für den Jahresheizwärmebedarf war natürlich nur sehr grob.

Den entscheidenden Durchbruch für die Jahresheizwärmeberechnung brachten in den achtziger Jahren Gebäude-Bilanzverfahren; frühe Programme dafür waren z.B. „Statbil“ und „Enbil“ [Feist-Zolper 1985][Feist 1989]. Erstmals in Europa in ein Normwerk aufgenommen wurden Bilanzverfahren mit der Schweizer Norm SIA 380. Diese Verfahren haben sich sehr gut bewährt und wurden in der Folge in das europäische Normwerk aufgenommen und dabei noch weiter verbessert [DIN EN 832]. Mit diesen Bilanzverfahren sind recht zuverlässige Jahresheizwärmebedarfswerte aus dem Heizperioden- oder Monatsrechengang zu bestimmen. Diese immer noch sehr einfach anwendbaren und transparenten Verfahren sind bei Auswahl adäquater Randbedingungen und mit gewissen Modifizierungen auch noch für Passivhäuser anwendbar [Feist 1998][Schnieders 2001][PHPP 2004]. Eine kritische Prüfung der Anwendbarkeit der Verfahren wurde im europäischen CEPHEUS-Projekt durchgeführt und ist in [Feist 2001a] publiziert. Für die Gültigkeit der Berechnung des Jahresheizwärmebedarfs wurde dabei eine Grenze von  $\pm 3 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$  bestimmt, die sich fast nicht von jener einer dynamischen Gebäudesimulation unterscheidet.

Für die ökologische Bewertung von Gebäuden mit Heizungsanlagen (und evtl. weiterer Gebäudetechnik) entscheidend ist der nicht erneuerbare Jahresprimärenergieverbrauch. Dies ist ein Maß für den Gesamtaufwand an Ressourcen, der für ein Gebäude inkl. Haustechnik erforderlich ist (ohne Herstellungsaufwand). Der Jahresprimärenergiebedarf kann rechnerisch auf der Basis der o.a. Bilanzverfahren, insbesondere des PHPP, recht zuverlässig bestimmt werden. Hierzu sind bereits umfassende statistische Untersuchungen in gebauten Siedlungen mit Vergleich zu den tatsächlichen Verbrauchswerten durchgeführt worden (eine Übersicht findet sich z.B. in [AkkP-28]).

Mit der extrem hohen Energieeffizienz, welche beim Passivhaus erreicht wird, wird der Heizwärmebedarf mit um 10 bis 20 kWh/(m<sup>2</sup>a) eigentlich völlig unbedeutend in Bezug auf die davon ausgehende Ressourcen- und Umweltbelastung. In einem funktionierenden Passivhaus ist der Verbrauch für Heizung automatisch vernachlässigbar gering – er beträgt nur rund ein Zehntel des sonst üblichen Verbrauches. Das wurde auch wiederholt in Feldmessungen verifiziert: Nicht nur in der Berechnung, sondern in der praktischen Baunutzung wird diese 90%ige Einsparung tatsächlich erreicht. Dies ist bei Einhaltung der baulichen und technischen Qualitäten des Passivhausstandards statistisch gesichert der Fall [AkkP-28]. Entscheidend ist dabei ausschließlich, dass ein funktionierendes Passivhaus erreicht wird. Unter diesen Umständen ist es nicht mehr wichtig, wie hoch die Jahresbedarfswerte im Einzelnen sind, weil der Passivhausstandard schon von sich aus einen extrem niedrigen Verbrauch garantiert, der eine dauerhaft ökonomisch und ökologisch vertretbare Versorgung mit der Dienstleistung „behagliche Räume“ sicherstellt.

Für die Frage der Funktion der Passivhäuser ist somit wiederum die Heizlast die entscheidende Größe: Über die Zuluft des im Passivhaus eingesetzten Lüftungssystems kann eine gewisse Heizleistung mit sehr geringem Aufwand verteilt werden; dadurch lässt sich das Lüftungssystem in einer doppelten Funktion nutzen und somit die Höhe der erforderlichen Investitionen in die Heizwärmeverteilung begrenzen. Diese Kosteneinsparung finanziert die Maßnahmen zur effizienten Energienutzung mit, u.a. die höheren Investitionskosten einer Wohnungslüftungsanlage. Die ohne bedeutende zusätzliche Kosten durch das Zuluftsystem verteilbare Heizleistung ist aber begrenzt; eine Abschätzung ergibt für normal belegte Wohngebäude eine verfügbare Leistung von ca. 10 W/m<sup>2</sup> (klimaunabhängig, vgl. Kasten).

### ***Klimaunabhängige Passivhaus-Bedingung***

Nach DIN 1946 ist 30 m<sup>3</sup>/h der Mindest-Frischluft-Volumenstrom für eine Person (Hygiene-Bedingung). Luft hat eine Wärmekapazität bei Normdruck und etwa 21 °C von 0.33 Wh/(m<sup>3</sup>K). Erwärmt werden kann die Frischluft um maximal 30 K, weil sonst die Gefahr von Staubverschmelzung besteht. Es folgt für die Leistung:

$$P_{\text{pers}} = 30 \text{ m}^3/\text{h}/\text{Pers} * 0.33 \text{ Wh}/(\text{m}^3\text{K}) * 30 \text{ K} = 300 \text{ W}/\text{Pers}$$

Also: 300 Watt pro Person kann eine Frischluftheizung bereitstellen. Wenn z.B. 30 m<sup>2</sup> Wohnfläche je Person angenommen werden, ergeben sich 10 W/m<sup>2</sup> Wohnfläche und das unabhängig vom Klima. Hierbei handelt es sich um eine Leistungseinheit, d.h. die Werte beziehen sich auf den Tag mit der jeweils höchsten Heizleistung (Heizlastfall). Je nach Klimazone muss ein Passivhaus also unterschiedlich gut gedämmt werden: In Stockholm mehr, in Rom weniger.

Wenn es gelingt, ein Gebäude so zu realisieren, dass die maximale Heizlast diese aus dem Zuluftverteilsystem verfügbare Leistung nicht übersteigt, dann ist es (außer für das Badezimmer) nicht mehr erforderlich, zusätzlich zum Lüftungssystem weitere Heizwärmeverteilungen und Wärmeabgabesysteme vorzusehen. Dies führt wieder zu einer gewissen Vereinfachung der Technik, so dass die gesamten Investitionskosten für die Haustechnik im Passivhaus nicht bedeutend höher liegen müssen als in einem konventionellen Gebäude; höher sind sie i.A. dennoch, da effizientere Wärmeerzeuger, Lüftungswärmerückgewinnung und Solartechnik teurer sind als konventionelle Gebäudetechnik.

Ob die beschriebene funktionale Vereinfachung in einem konkreten Projekt wirklich realisiert werden kann, hängt entscheidend von den im betreffenden Fall tatsächlich auftretenden maximalen Heizleistungen (eben von der Heizlast) ab. Damit wird es für Passivhäuser heute wieder wichtig, die **Heizlasten zuverlässig im voraus zu bestimmen**. Mit Passivhäusern sind die Bauherren wieder in einer Situation wie vor den Ölkrisen, in der zwar eine korrekte Auslegung der Heiztechnik erforderlich, der resultierende Jahresverbrauch aber so gering ist und so niedrige Aufwendungen erfordert, dass er kaum noch interessiert.

Deshalb ist es wichtig, ein zuverlässiges Verfahren für die Bestimmung der Heizlast zur Verfügung zu haben. An dieses Verfahren werden folgende Anforderungen gestellt:

- Die ermittelten Heizlasten müssen "auf der sicheren Seite" liegen, d.h. die behagliche Beheizbarkeit der so projektierten Häuser **muss** gewährleistet sein.
- Die ermittelten Heizlasten sollten andererseits keine übermäßigen Sicherheitsreserven enthalten, weil sonst der bauliche und technische Aufwand unangemessen hoch wird und die spezifischen Vorteile der Gebäude mit sehr kleinen Heizlasten nicht zur Geltung kommen.
- Wenn möglich, sollte das Verfahren einfach handhabbar sein und
- die erforderlichen Randbedingungen für den Auslegungsfall sollten auf einfache Weise verfügbar gemacht werden können.

Naheliegender wäre es daher zunächst, die vorhandenen Normen zur Ermittlung der Raumheizlast [DIN EN 12831] einzusetzen. Es zeigte sich aber in der Praxis sehr schnell, dass das dort normierte Verfahren bei hocheffizienten Gebäuden wie dem Passivhaus zu extrem überdimensionierten Auslegungen führt. Die Ursachen dafür sind (neben im Grundsatz leicht änderbaren „Besonderheiten“, die nicht das Verfahren, aber seltsam gewählte Zusatzbedingungen betreffen, wie beispielsweise, dass U-Werte von Außenbauteilen  $\leq 0.3 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  immer mit „ $0.3 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ “ angesetzt werden müssen):

- Innere Wärmequellen und die gerade bei sehr tiefen Außentemperaturen bedeutenden solaren Energiebeiträge werden in der Norm nur unzureichend berücksichtigt. Gerade bei Gebäuden mit sehr geringer Heizlast spielen diese freien Wärmen jedoch auch im Auslegungsfall eine bedeutende Rolle. „Keine inneren Lasten“ gibt es nur, wenn auch keine Nutzer anwesend sind und damit auch nur geringere Anforderungen zu stellen sind. Sind Nutzer anwesend, die Komfortansprüche erheben, so gibt es regelmäßig auch innere Wärmequellen; möglicherweise in geringer Höhe, aber nicht mit dem Ansatz „Null“. Das bedingt gerade bei Gebäuden mit guter Dämmung einen entscheidenden Unterschied.
- Gebäude mit sehr kleinen Heizlasten haben regelmäßig sehr hohe Gebäudezeitkonstanten (mehr als 5 und bis über 30 Tage). Dadurch werden kurzzeitige extreme Wetterbedingungen für das Passivhaus unbedeutend (das Gebäude geht praktisch darüber hinweg) und die Auslegungsparameter beziehen sich eher auf längere Zeitperioden. Diese Tatsache war auch den Verfassern

älterem Normwerke (wie DIN 4701) bereits bekannt, wurde aber nicht auf Gebäude mit sehr langen Zeitkonstanten ausgedehnt und schließlich sogar in der neueren Normung gar nicht mehr berücksichtigt.

- Die raumweise Ermittlung der Heizlast ist schon bei konventionellen Gebäuden mit hohen Unsicherheiten behaftet, die daraus resultieren, dass schon bei relativ kleinen Temperaturdifferenzen zwischen den Räumen die inneren Wärmeströme bedeutender sein können als die Wärmeverluste nach außen. Dieser Effekt verstärkt sich im Passivhaus noch entscheidend. Aus diesem Grund macht die raumweise Ermittlung der Heizlast in Passivhäusern in der Regel keinen Sinn; eine wohnungs- oder gebäudeweise Berechnung ist zuverlässiger und in der Regel ausreichend. Genauere Untersuchungen dazu finden sich in [AkkP 25].
- Der in der Heizlastberechnung übliche Bezug auf das Innenmaß der Raumumfassungsflächen vernachlässigt Wärmebrückenwirkungen in unzulässiger Weise und liegt außerdem quer zur gesamten übrigen üblichen Verfahrensweise, in der sich inzwischen überall die Verwendung der Außenmaße durchgesetzt hat.

Die Praxis zeigte, dass die in wissenschaftlich begleiteten Projekten tatsächlich gemessenen Heizleistungen in sehr gut wärmegeprägten Gebäuden eine obere Leistungsbegrenzung aufweisen, die auch bei extrem niedrigen Außentemperaturen viel niedriger lag als die Auslegungsleistung nach der herkömmlichen Normung [DIN 4701]. Erstmals publiziert wurde dies in [Feist/Werner 1993] an Hand von gemessenen täglichen Heizwärmeverbrauchswerten im Passivhaus Damstadt-Kranichstein. Die gemessenen tagesmittleren Heizlasten "knicken" nach diesen Ergebnissen unterhalb von Tagesmitteltemperaturen von ca. 0 °C in einen waagrechteten Verlauf ab. Wir werden diesen Zusammenhang im hier vorgelegten Papier noch diskutieren, vgl. Abbildung 7. Der Zusammenhang wurde in [Feist/Werner 1993] bereits korrekt durch solare Energiebeiträge in den kälteren Wetterperioden erklärt. Damit stand fest, dass eine Vernachlässigung der Solarbeiträge bei der Heizlastberechnung insbesondere in sehr gut wärmegeprägten Gebäuden keine korrekten Ergebnisse mehr erbringen kann.

Es war daher erforderlich, einen gegenüber den eingeführten Verfahren verbesserten Algorithmus für die Heizlastbestimmung zu entwickeln. Methodisch einwandfrei ist dabei immer eine instationäre Simulation des thermischen Verhaltens des Gebäudes. Damit lassen sich nicht nur die Heizlasten, sondern auch die Jahresbedarfswerte zuverlässig ermitteln. In [Feist/Loga 1997] und [Kaufmann/Feist 2001] wurde die Validität solcher instationärer Modellrechnungen im Vergleich zu Messwerten überprüft – anhand des Zeitverlaufs von Raum-, Oberflächen- und Bauteiltemperaturen. Diese Untersuchungen zeigten, dass sich bei korrekter Modellbildung eine sehr gute Übereinstimmung von Mess- und Simulationswerten ergibt. Es ist daher zulässig, grundsätzliche Untersuchungen mit dem Instrumentarium der thermischen Gebäudesimulation durchzuführen. Selbstverständlich müssen die Ergebnisse aber vor allem dann, wenn sie von der herkömmlichen Auffassung abweichen, auch experimentell überprüft werden.

Der entscheidende Nachteil der Verwendung von instationärer thermischer Gebäudesimulation ist die hohe Komplexität der zugrunde liegenden Modelle. Abgesehen vom hohen Arbeitsaufwand für die Erstellung und Auswertung solcher

Simulationsrechnungen resultiert hieraus eine vergleichsweise große Fehleranfälligkeit: Die Zahl der in das Simulationsmodell eingehenden Parameter ist sehr groß und damit steigen auch die potentiellen Fehlerquellen bei der Erstellung der Modelle. Es war daher wünschenswert, auch für die Bestimmung der Heizlast wieder ein vergleichbar einfaches Verfahren verfügbar zu haben, wie es mit der DIN EN 832 bereits für die Ermittlung des Jahresheizwärmebedarfes vorliegt.

Diese Aufgabenstellung wurde vom Arbeitskreis kostengünstige Passivhäuser angegangen und in Kooperation mit der Universität Stuttgart (Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik) sowie dem Ingenieurbüro ebök gelöst. Die entscheidenden Ansätze sind in der Diplomarbeit von Carsten Bisanz mit dem instationären Modell DYNBIL untersucht worden [Bisanz 1999]. Das in dieser Kooperation entwickelte Verfahren beruht in den Grundzügen auf Energiebilanzen nach dem Schema der DIN EN 832, allerdings mit Randbedingungen, welche nicht Jahres- oder Monatsdaten, sondern die Auslegungszeiträume des betreffenden Klimas berücksichtigen. Als entscheidend hat sich herausgestellt, dass eine Auslegung **mit mindestens zwei unterschiedlichen Auslegungsdatensätzen** erfolgen muss, nämlich einer "kalten und strahlungsreichen Auslegungsperiode" und mit einer "mäßig kalten und strahlungsarmen Auslegungsperiode". A priori steht nämlich gerade bei Gebäuden mit sehr geringem Wärmebedarf nicht fest, ob das Maximum der Heizlast tatsächlich in den extrem kalten Perioden oder aber während eines stark bewölkten, jedoch nur mäßig kalten Zeitraumes vorliegt. Die betreffenden Auslegungsrandbedingungen müssen für jedes Klima funktional mit Hilfe von dynamischen Gebäudesimulationen an Hand von Testdatensätzen ermittelt werden. In [Bisanz 1999] ist dies für die deutschen Testreferenzjahre ausgeführt worden und es erfolgte eine erste theoretische Validierung des Verfahrens mit Hilfe von Simulationsrechnungen.

Das in [Bisanz 1999] entwickelte Verfahren erfüllt die Anforderungen nach Einfachheit und einfacher Verfügbarkeit der zugehörigen Randbedingungen. Daher wurde das Verfahren sowie ausgewählte Randbedingungen versuchsweise bereits 1999 in die zweite Auflage des Passivhaus Projektierungspaktes [PHPP 1999] übernommen. Das Verfahren stand zum damaligen Zeitpunkt noch unter dem Vorbehalt der Praxisbewährung, wurde jedoch ab 1999 in einigen tausend Passivhausprojekten angewendet.

In Objekten mit insgesamt weit über 200 Wohneinheiten mit Passivhausstandard wurden in der Zwischenzeit durch wissenschaftlich fundierte messtechnische Begleituntersuchungen detaillierte, zeitlich aufgelöste Daten zum Temperaturverhalten und Heizwärmeverbrauch erhoben. Diese Daten sind in unterschiedlichen Auswertestudien bereits unter verschiedenen Gesichtspunkten analysiert worden: Heizwärmeverbrauch, übrige Energieverbrauchswerte, thermischer Behaglichkeitsparameter und auch mittlerer und maximaler Heizleistungen. Ein Teil dieser Daten stand am Passivhaus Institut (PHI) für weitergehende Analysen zur Verfügung, für einen weiteren Teil hat das Institut die Überlassung von Daten von anderen Forschungseinrichtungen erbeten; für die Zustimmung zur Verwendung in der hier vorliegenden Analyse sei den Beteiligten dabei ausdrücklich gedankt.

Die zentrale Aufgabenstellung der hier vorgelegten Untersuchung ist die Überprüfung des Heizlast-Verfahrens aus [Bisanz 1999] an Hand dieser in den Feldprojekten gesammelten Messdaten und gegebenenfalls die Modifizierung des Verfahrens.



Wie sich zeigen wird, führen die Feldmessergebnisse zu einer einheitlichen Bewertung:

- Die mit Qualitätssicherung gebauten Passivhäuser weisen nicht nur tatsächlich die extrem geringen Jahresheizwärmeverbrauchswerte auf, die mittels Simulation und/oder Bilanzverfahren im Voraus bestimmt worden waren, sondern für ihre Beheizung reichen auch die extrem niedrigen Heizleistungen aus, die sich aus der funktionalen Auslegung ergeben.
- Die Tatsache, dass innere Wärmequellen und passiv solare Gewinne auch bei der Heizlastberechnung, insbesondere bei Objekten mit gutem Wärmeschutz, berücksichtigt werden müssen, kann auf Basis der Messwerte bestätigt werden.
- An Hand gemessener Temperatur- und Heizlastverläufe in ganz besonders gelagerten Einzelfällen (z.B. Winterabwesenheit mit Heizungsabschaltung in einer Wohnung) kann auch das Verhalten in zuvor theoretisch behandelte Sondersituationen nun messtechnisch validiert werden. Auch diese Untersuchungen bestätigen die Simulation.
- Aus den Fallstudien und der Simulation ergibt sich eine hohe Temperaturstabilität von Gebäuden mit sehr gutem Wärmeschutz, insbesondere von Passivhäusern. Dies erhöht die Fehlertoleranz sowohl gegenüber Extremereignissen („Jahrhundertwinter“) als auch gegenüber Auslegungsfehlern. Natürlich muss diese Erkenntnis sehr vorsichtig gehandhabt werden: Überschreiten die kumulierten Fehler eine bestimmte Schwelle, so geht neben dem Passivhaus-Standard auch die Gutmütigkeit dieses Standards verloren und die Fehler wirken sich dann um so massiver aus. Daher ist dazu zu raten, die Planungsaufgabe und Qualitätssicherung besonders ernst zu nehmen und die aus einem korrekt geplanten und gebauten Passivhaus resultierende Toleranz für die bessere Behaglichkeit und die Handlungsfreiheit der Bewohner zu nutzen.
- Die zentrale Fragestellung dieser Studie betreffend: Die Berechnungsansätze nach dem in [Bisanz 1999] publizierten Verfahren haben sich in allen untersuchten Objekten sehr gut bewährt. Das Verfahren ist damit einem besonderen Härtetest unterzogen worden, denn gerade in Passivhäusern mit ihren extrem geringen Heizlasten ist die Empfindlichkeit gegenüber Einflussgrößen wie der Solarstrahlung besonders groß. Nur in solchen Gebäuden kann man daher ein solches Verfahren überhaupt mit Aussicht auf Erfolg testen, weil bei Objekten mit hohen Heizlasten Einflüsse dieser Größenordnung von anderen Effekten meist zugedeckt werden.

Die vorliegende Untersuchung ist ein Beispiel dafür, wie sorgfältig durchgeführte Feldmessungen in Verbindung mit einer wissenschaftlich fundierten Auswertung für die Praxis hilfreiche Ergebnisse liefern. Solche Ergebnisse sind statistisch gesichert und gehen über die heute oft anzutreffenden Einschätzungen „aus dem Bauch heraus“ hinaus. Die Ergebnisse können dennoch in einfach vom Praktiker zu handhabende Verfahren übertragen werden und erleichtern so deren Arbeit.



## 2 Validierung an Messergebnissen im kalten Winter 1996/97 (Passivhaus Darmstadt-Kranichstein)

### 2.1 Zu den klimatischen Randbedingungen der betrachteten Wetterperiode

Wie Tabelle 1 zeigt, war der Winter 1996/97 messbar kälter als im langjährigen Mittel. Benutzt man monatliche Gradtagzahlen zum Vergleich, so ergeben sich für Damstadt im Winter 1996/97 Überschreitungen um +5% [Christoffer 1996]. Abbildung 1 zeigt, dass die subjektiv zum Eindruck „sehr kalter Winter“ führende Erscheinung eine Frostperiode mit bis zu  $-14^{\circ}$  Tagesmitteltemperaturen war, die von Weihnachten 1996 bis in den Januar 1997 anhielt. Diese gemessenen Klimadaten eignen sich sehr gut als "Härtetest" sowohl für das Passivhauskonzept als solches als auch für die nach [Bisanz 1999] vorgeschlagene neue Berechnungsmethode für die Heizlast. Dieser Test ist sogar mit gemessenen Verbrauchswerten durchführbar, weil das Passivhaus in Damstadt-Kranichstein im betreffenden Zeitraum bewohnt war und Messergebnisse aufgezeichnet wurden.

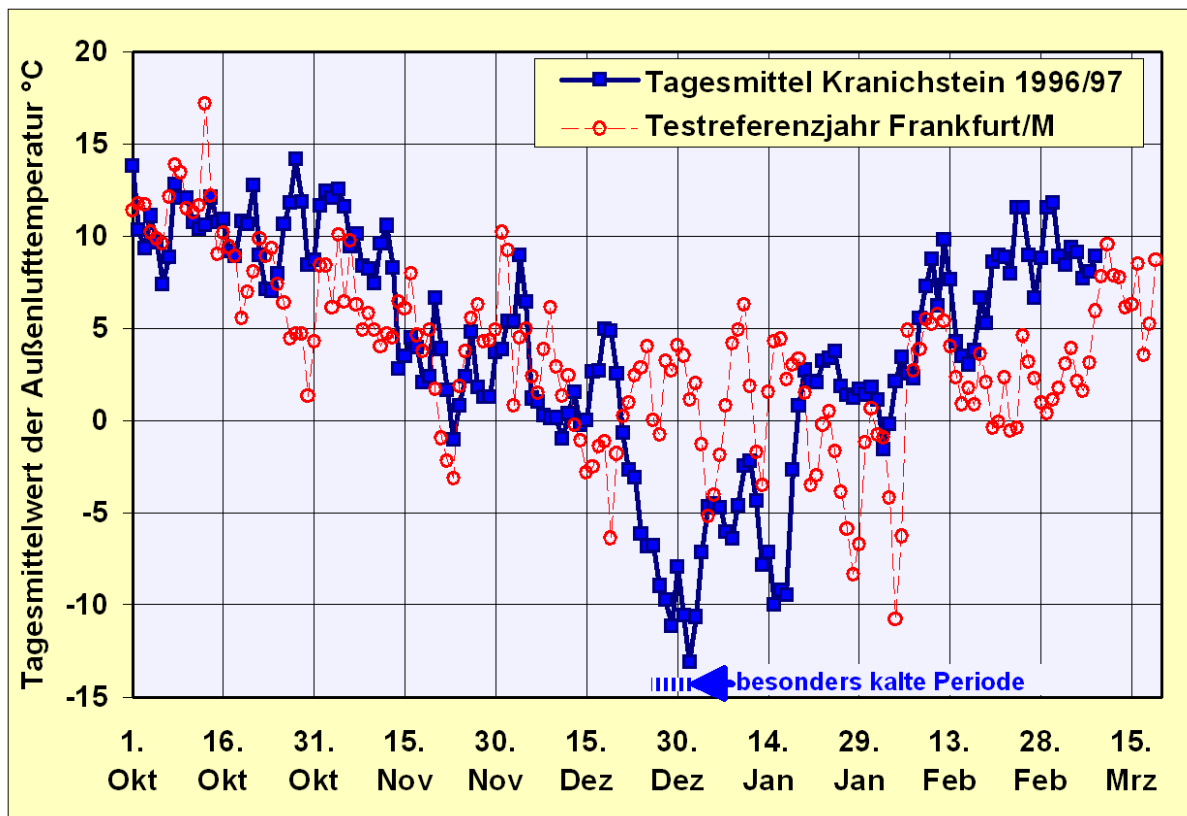


Abbildung 1: Gemessene Außenlufttemperaturen (Tagesmittelwerte, ausgefüllte Quadrate) im Winter 1996/97 im Vergleich zu Werten des Testreferenzjahres Frankfurt (Kreissymbol).

Um eine genauere Vorstellung von den herrschenden Klimabedingungen zu bekommen, sind in Abbildung 2 die Messwerte in der höchsten verfügbaren Auflösung (Halbstundenwerte) sowohl für die Außenlufttemperaturen als auch für die Solareinstrahlung auf eine senkrechte Südfläche dargestellt. Aus dieser Abbildung ist die Korrelation von extrem niedrigen Temperaturen und hohen Solarstrahlungs-

werten wenn nicht für jeden einzelnen Tag, aber für die gesamte Kälteperiode erkennbar. Es erweist sich daher auch auf der Basis dieser Extremdaten als korrekt, für besonders kalte Perioden mit einem entsprechend höherem Solarstrahlungsangebot zu rechnen.

Tabelle 1: Monatsmittel der Gradtagszahlen im Vergleich zum langjährigen Mittel.

Langjähriges Mittel, Testreferenzjahr Frankfurt/M und gemessene Heizzeiten am Standort Darmstadt-Kranichstein im Vergleich (nach [Feist 1997]).

Außenlufttemp. [°C]	1951-1996 [Christoffer 1996]	TRY Frankfurt/Main	Kranichstein 1993/94	Kranichstein 1994/95	Kranichstein 1995/96	Kranichstein 1996/97
Oktober		9.26	9.10	9.38	12.89	10.38
November		4.81	1.77	5.28	4.06	5.95
Dezember	1.80	1.80	4.74	2.01	0.34	-0.76
Januar	0.70	-0.31	4.34	6.19	-1.05	-2.90
Februar	1.80	1.34	1.95	4.94	0.49	5.83
März		3.08	8.61	10.46	3.68	
<b>Winter-GTZ [Kd]</b>	<b>1672</b>	<b>1716</b>	<b>1464</b>	<b>1407</b>	<b>1808</b>	<b>1750</b>
<b>Überschreitung</b>	<b>0%</b>	<b>3%</b>	<b>-12%</b>	<b>-16%</b>	<b>8%</b>	<b>5%</b>

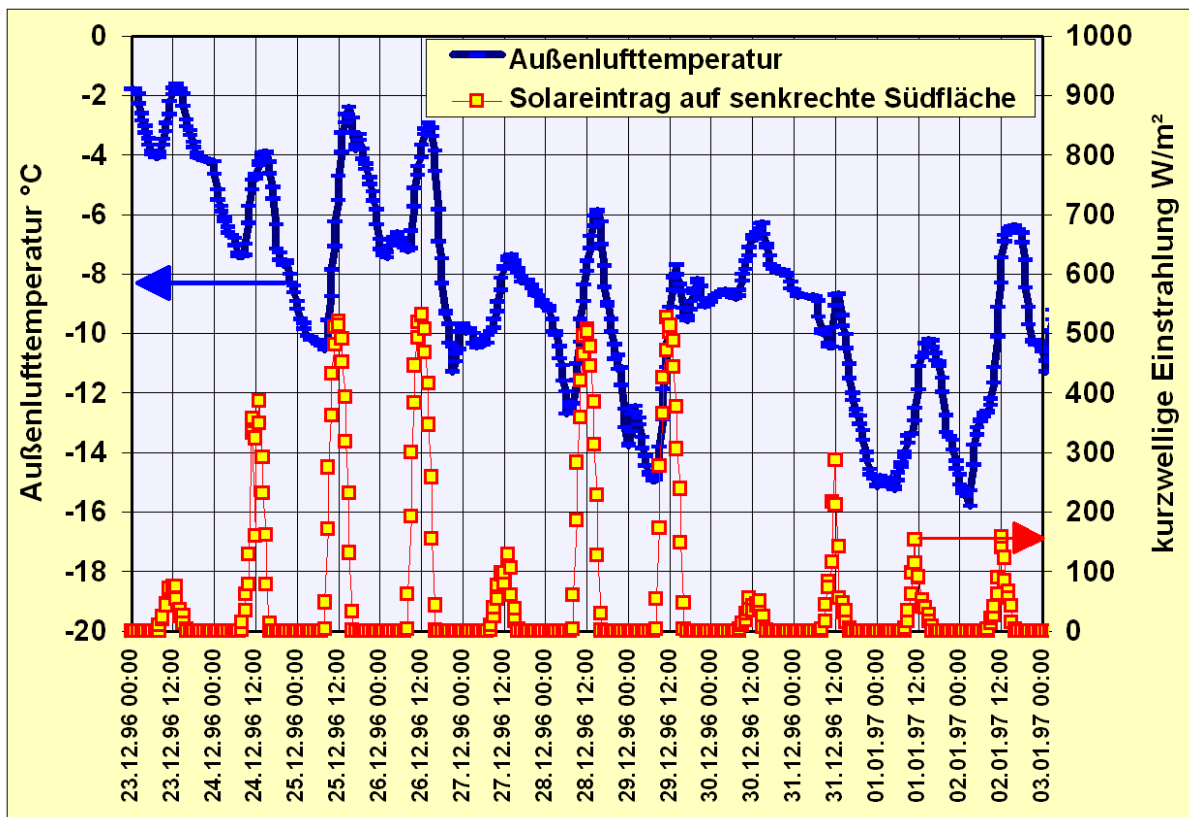


Abbildung 2: Gemessene Halbstundenwerte von Außenlufttemperatur und Solarstrahlung auf eine senkrecht orientierte Südfläche in der Kälteperiode 1996/97 (Darmstadt-Kranichstein).

## 2.2 Die gemessenen Innentemperaturen und Heizleistungen im Passivhaus Darmstadt-Kranichstein im betreffenden Zeitraum

Beim Passivhaus Darmstadt-Kranichstein handelt es sich um einen Massivbau mit vier weitgehend baugleichen Reiheneinheiten, dessen bauliche und technischen Daten vollständig in der Literatur offengelegt sind [Feist 1992]. Ein Datensatz der für den hier vorliegenden Bericht maßgeblichen Daten ist in Anhang I dokumentiert. Alle vier Reihenhäuser waren in der oben dargestellten Zeitperiode bewohnt. Die Messdatenerfassung lieferte über den gesamten Zeitraum Daten. Diese Daten wurden für die vorliegende Untersuchung in Hinblick auf die Heizlastdiskussion nachträglich detailliert ausgewertet.

Abbildung 3 zeigt den Verlauf der gemessenen Innentemperaturen im Durchschnitt aller vier Reihenhäuser (24-h-Mittel über alle Räume, die in der Messdatenerfassung enthalten sind; mindestens 5 Messstellen je Haus). Das Diagramm lässt erkennen, dass zu jedem Zeitpunkt behagliche Bedingungen vorliegen. Auch an sehr kalten Tagen lässt sich die Innentemperatur anheben (12.-14. Januar). Eine zuverlässige Einschätzung der Verfügbarkeit von ausreichend Heizleistung ist durch eine Korrelationsanalyse zwischen gemessenen Außenluft- und Raumtemperaturen möglich. Diese ist in Abbildung 4 dargestellt: Die Steigung der Korrelationsgeraden beträgt  $0.0045 \text{ }^\circ\text{C}/^\circ\text{C}$  (Korrelationskoeffizient 6%, nicht signifikant). Es zeigt sich somit, dass die Außenlufttemperatur praktisch keinen Einfluss auf die Innentemperaturen hat. Damit ist zunächst empirisch geklärt, dass die installierten Leistungen im Passivhaus Darmstadt-Kranichstein zu jedem Zeitpunkt problemlos ausgereicht haben, auch innerhalb der hier aufgetretenen untypisch kalten Periode jenseits der Auslegungsrandbedingungen.

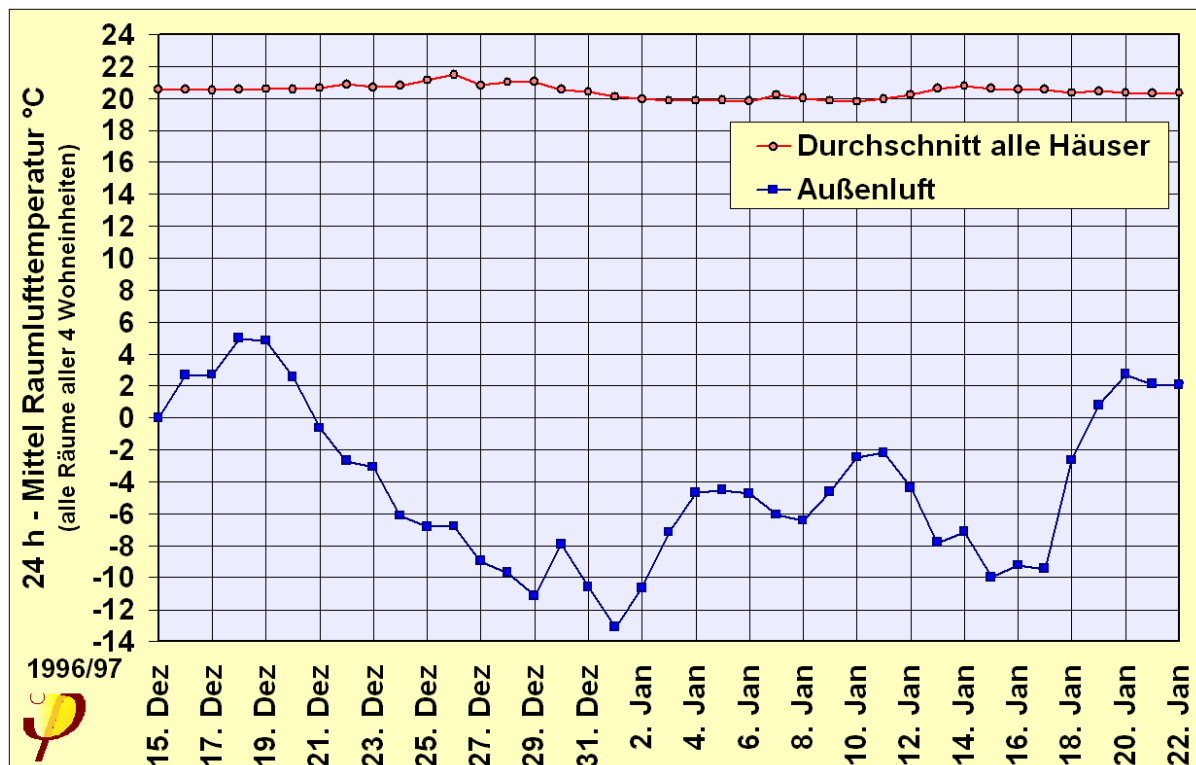


Abbildung 3: Verlauf der mittleren Innentemperatur (Durchschnitt aller Räume aller vier Häuser des Passivhauses Darmstadt-Kranichstein) im betroffenen Zeitraum; zum Vergleich ist auch der Außentemperaturverlauf mit dargestellt.

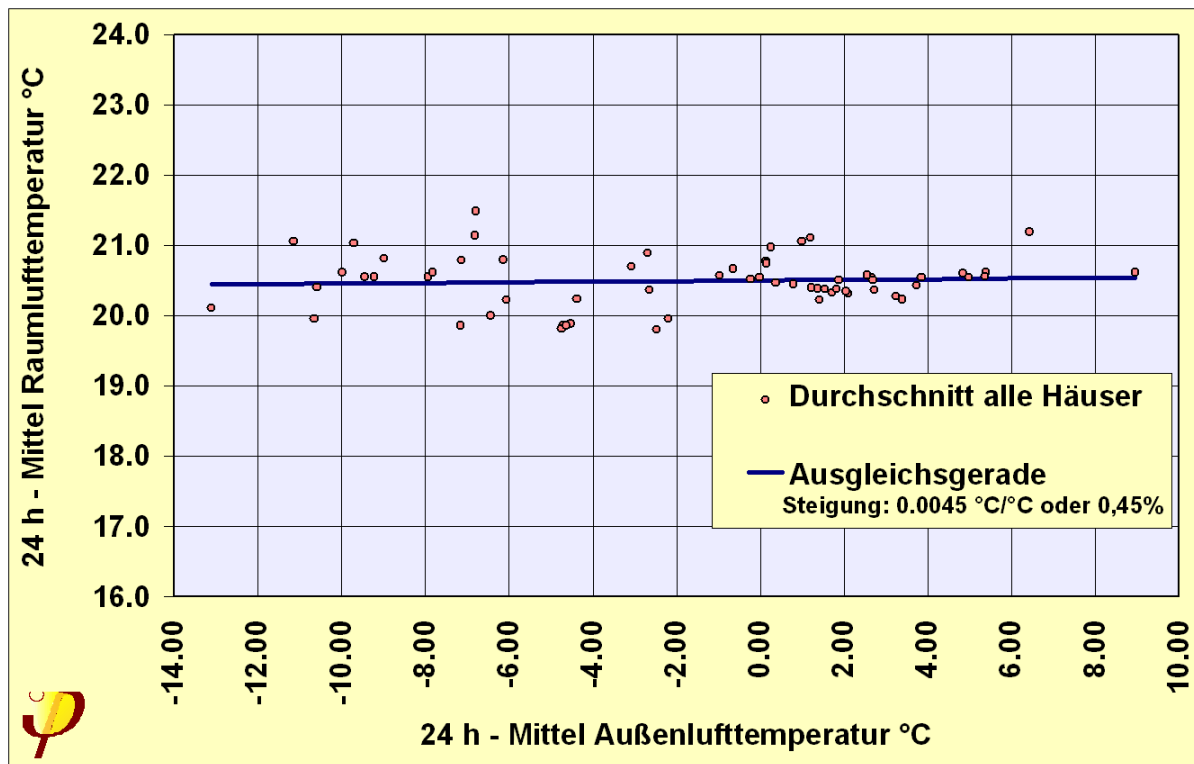


Abbildung 4: Korrelationsanalyse von Innentemperatur über der Außenlufttemperatur; die Steigung der Korrelationsgerade beträgt 0,45%. Ein Blick auf das Diagramm genügt, um festzustellen, dass die Innentemperatur von der Außentemperatur praktisch unabhängig ist (Passivhaus Darmstadt Kranichstein, 1. Dez. 1996 bis 31. Januar 1997). Die eingesetzte Heizleistung war somit immer ausreichend, installiert ist eine weit höhere Leistung.

Das Gebäude ist mit einer Pumpenwamwasserheizung mit zentralem Brennwertkessel (etwa 12 kW verfügbare Wärmeleistung) und Niedertemperaturheizkörpern mit elektronisch geregelten Thermostatventilen in allen Räumen ausgestattet. Die installierte Leistung für die Wärmeabgabe beträgt mehr als 12 kW. Diese verfügbare Leistung wurde allerdings im hier betrachteten Zeitraum nicht abgefragt (und auch sonst nie). Die *tatsächlich gemessenen zentralen Heizleistungen* am Brennwertkessel für alle vier Wohnungen zusammen liegen vielmehr an allen Tagen *unter 4.63 kW*, das entspricht einer maximalen spezifischen Heizleistung von 7.4 W/m<sup>2</sup>. Abbildung 5 zeigt den Verlauf der gemessenen spezifischen Heizleistungen im Winter 1996/97 (Tagesmittelwerte). Aus dem Verlauf ist erkennbar, dass die höchsten Leistungen nicht an den kältesten Tagen, sondern an eher mäßig kalten Tagen mit geringer Solareinstrahlung auftreten. Deutlich erkennbar ist in diesem Diagramm auch der späte Beginn der Heizperiode für dieses Gebäude (vor dem 18. November wird nicht geheizt) und das frühe Ende des Heizbetriebes am 1. März 1997. Für Passivhäuser ist damit nur der Kernwinter für die Heizung relevant; dies ist auch der ausschließlich relevante Zeitraum für den Betrieb der Wärmerückgewinnung. Es muss noch einmal betont werden, dass die außerordentlich geringen gemessenen Heizleistungen auch an sehr kalten Tagen nicht etwa die Folge einer begrenzten verfügbaren Leistung sind: Wie oben aufgeführt, ist die verfügbare Leistung fast dreimal so hoch und die Temperaturen im Gebäude sind stabil.

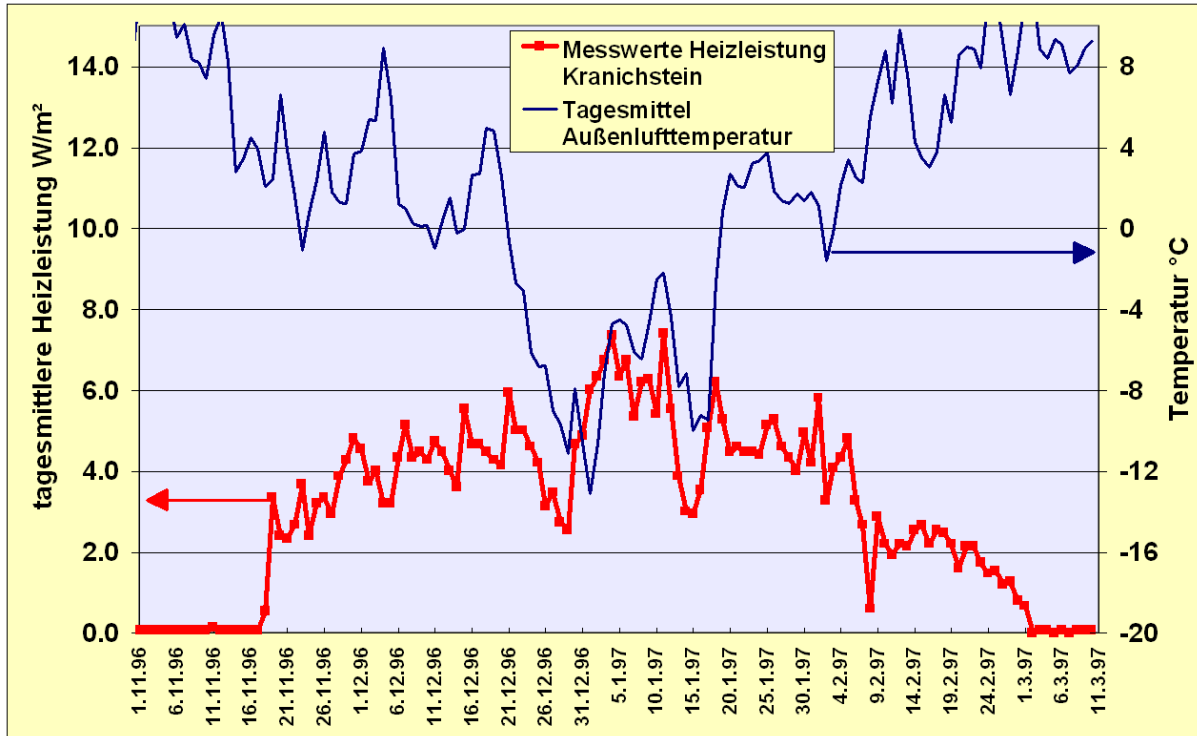


Abbildung 5: Tagesmittelwerte der gemessenen Heizleistungen im Passivhaus Darmstadt-Kranichstein im Winter 1996/97. Die Außenlufttemperatur ist zur besseren Orientierung mit eingezeichnet (rechte Achse). Der Maximalwert betrug am 11. Januar 7.4 W/m²; dies entspricht in der Heizzentrale für vier Reihenhäuser einer Spitzenlast von 4.6 kW.

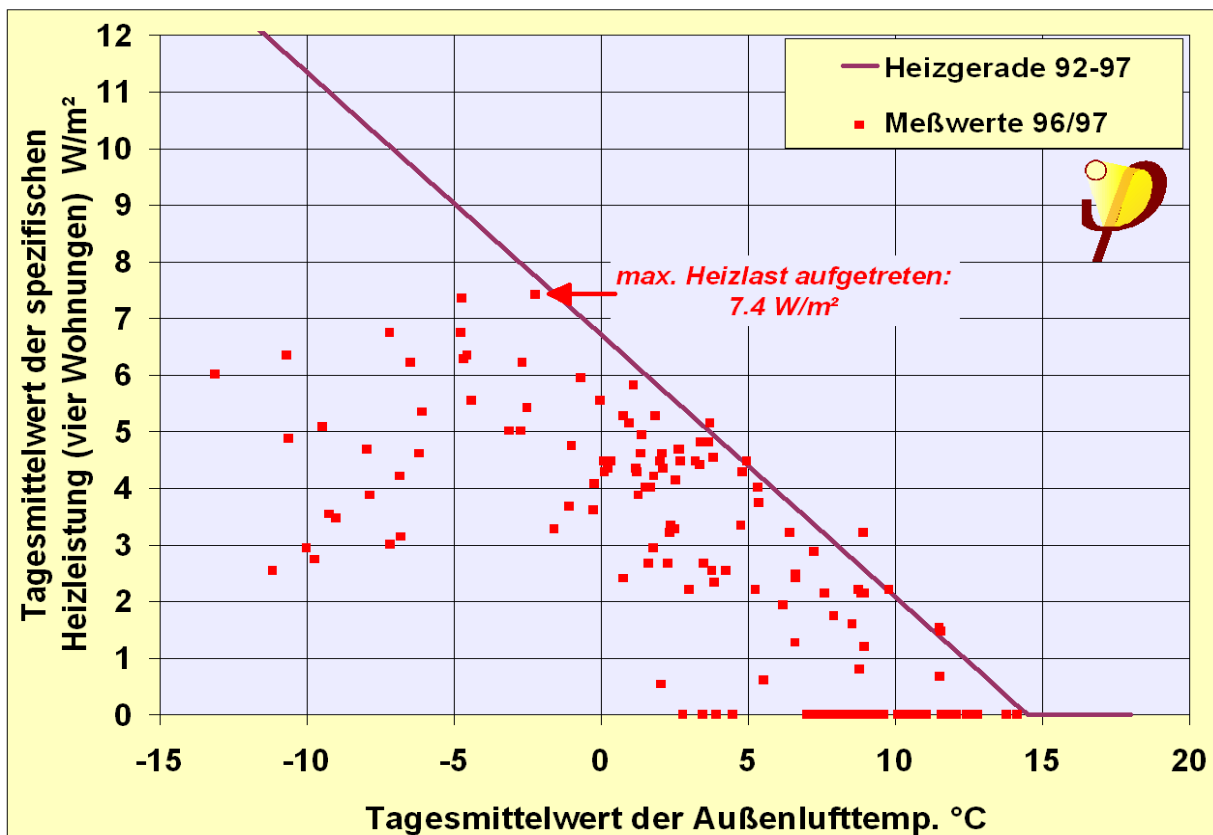


Abbildung 6: Sortierung der gemessenen Heizleistungen über der tagesmittleren Außenlufttemperatur. Eingezeichnet ist zudem die theoretische "Heizgerade", das ist der um die inneren Wärmequellen verringerte Wärmeverlust des Gebäudes  $(H \Delta\theta - P_{int}) / A_{Wff}$ .

Die Zusammenhänge werden deutlicher, wenn die tagesmittleren Heizleistungen nicht über der Zeit, sondern über dem Tagesmittel der Außenlufttemperatur abgetragen werden (Abbildung 6). In stationärer Näherung mit konstanten internen Wärmequellen  $P_{int}$  und ohne solare Einstrahlung ergibt sich theoretisch unter stationären Bedingungen an einem Tag mit der mittleren Außenlufttemperatur  $\vartheta_a$  und mittlerer Raumlufthtemperatur  $\vartheta_f$  ( $=20\text{ °C}$ ) ein Heizleistungsbedarf von

$$\dot{Q} = \begin{cases} (H \cdot (\vartheta_f - \vartheta_a) - P_{int}) & \text{falls } > 0 \\ 0 & \text{falls } \leq 0 \end{cases} \quad [\text{F1}]$$

wo  $H$  der spezifische Wärmeverlust des Hauses mit

$$H = \sum_{\text{Hülle}} U_j \cdot A_j + \sum_{\text{Wärmebr}} \Psi_j \cdot l_j + c_{p, \text{Luft}} \cdot \rho_{\text{Luft}} \cdot n_{\text{äqui}} \cdot V_{\text{Luft}} \quad [\text{F2}]$$

ist. Dabei stehen wie üblich  $U_j$  für die Wärmedurchgangskoeffizienten der Hüllflächen  $A_j$ ,  $\Psi_j$  für die Wärmebrückenverlustkoeffizienten der linear ausgedehnten Wärmebrücken der Länge  $l_j$ ,  $c_{p, \text{Luft}} \cdot \rho_{\text{Luft}}$  für spezifische Wärmekapazität mal Dichte der Luft,  $n_{\text{äqui}}$  für den energieäquivalenten Luftwechsel und  $V_{\text{Luft}}$  für das gesamte Raumluftvolumen.

In die Gleichungen [F1] und [F2] können die Datensätze von zwei unterschiedlichen baulichen Zuständen des Passivhauses eingesetzt werden:

- I. Die Daten des Bauzustandes in der ersten Heizperiode 1991/92. In dieser Zeit waren die Dämmschalen auf den Fensterrahmen noch nicht angebracht. Mit der gemessenen Luftwechselrate bestimmt sich  $H_I = 92\text{ W/K}$ .
- II. Die Daten des Bauzustandes seit der zweiten Heizperiode. Im März 1992 waren die Rahmendämmschalen an den Fenstern angebracht worden. Sie verringern durch die Dämmung des Rahmens und die Abdeckung der Wärmebrücke am Scheibenrandverbund den temperaturbezogenen Wärmeverlust auf  $H_{II} = 70\text{ W/K}$ .

Mit  $H_{II}$  ergab sich die fett in Abbildung 6 dargestellte Heizgerade. Die tatsächlich gemessenen Heizleistungen sind für den Zeitraum 1996/97 als ausgefüllte Quadrate dargestellt:

- Nun zeigt sich, dass die maximal auftretenden Heizleistungen auch dann nach oben begrenzt bleiben, wenn die tagesmittleren Außenlufttemperaturen unter  $-3\text{ °C}$  absinken. Die maximalen Leistungen treten nicht bei den niedrigsten Außentemperaturen, sondern bei Temperaturen zwischen  $-2$  und  $-5\text{ °C}$  auf.
- Bis auf wenige und unbedeutende Ausnahmen liegen die Messpunkte jeweils unterhalb der Heizgeraden. Dies beweist, dass die Wärmeverluste für das Gesamtsystem bei normalen Betriebsbedingungen nicht höher sind, als theoretisch erwartet. **Damit ist mit dem Feldversuch in diesem bewohnten Haus belegt, dass die angewendeten Energiesparmaßnahmen mit der hier gewählten hochwertigen Ausführungsqualität wirksam sind.**



- Nur wenige Messpunkte liegen oberhalb der Heizgeraden. Solche "Ausreißer" entstehen, wenn an einem Tag gegenüber der Theorie erhöhte Wärmeverluste vorliegen. Dies kann nutzungsbedingt der Fall sein, wenn z.B. Türen oder Fenster längere Zeit offen stehen oder zeitweilig eine höhere Raumtemperatur gewünscht wird. Das Diagramm zeigt, dass solche Einflüsse bei diesem Projekt offensichtlich von geringer Bedeutung sind.
- Warum fallen die Messwerte systematisch und beträchtlich von der Heizgeraden herunter? Die Differenz zwischen dem Wert auf der Heizgeraden und dem Messwert ist der am betreffenden Tag nutzbar gewordene **solare Energiegewinn** (dabei ist zu beachten, dass dieser auch aus Solarangeboten vorausgehender Tage stammen kann). Die heuristische "Heizkurve" biegt von der Heizgeraden bei kälteren Außentemperaturen immer mehr nach unten ab. Die Ursache dafür ist, dass in Mitteleuropa besonders kalte Wintertage in der Regel bei klarer Hochdruckwetterlage vorkommen und dann die Solareinstrahlung entsprechend hoch ist. Mit diesen Messungen ist damit auch der Beweis dafür erbracht, dass im Passivhaus ein beträchtlicher Anteil Solarenergie passiv genutzt wird. Der resultierende extrem geringe Heizwärmebedarf des Passivhauses wäre ohne diese passive Solarenergienutzung nicht möglich.

Die hier dargestellten Zusammenhänge gelten selbstverständlich auch für die übrigen im Passivhaus Damstadt-Kranichstein gemessenen winterlichen Verbrauchswerte. Durch die Daten der weiteren Messjahre (1992-1997) rundet sich das Bild ab (vgl. Abbildung 7). In keinem Jahr traten höhere Heizleistungen auf als die bereits diskutierten  $7.4 \text{ W/m}^2$  am 11. Januar 1997.

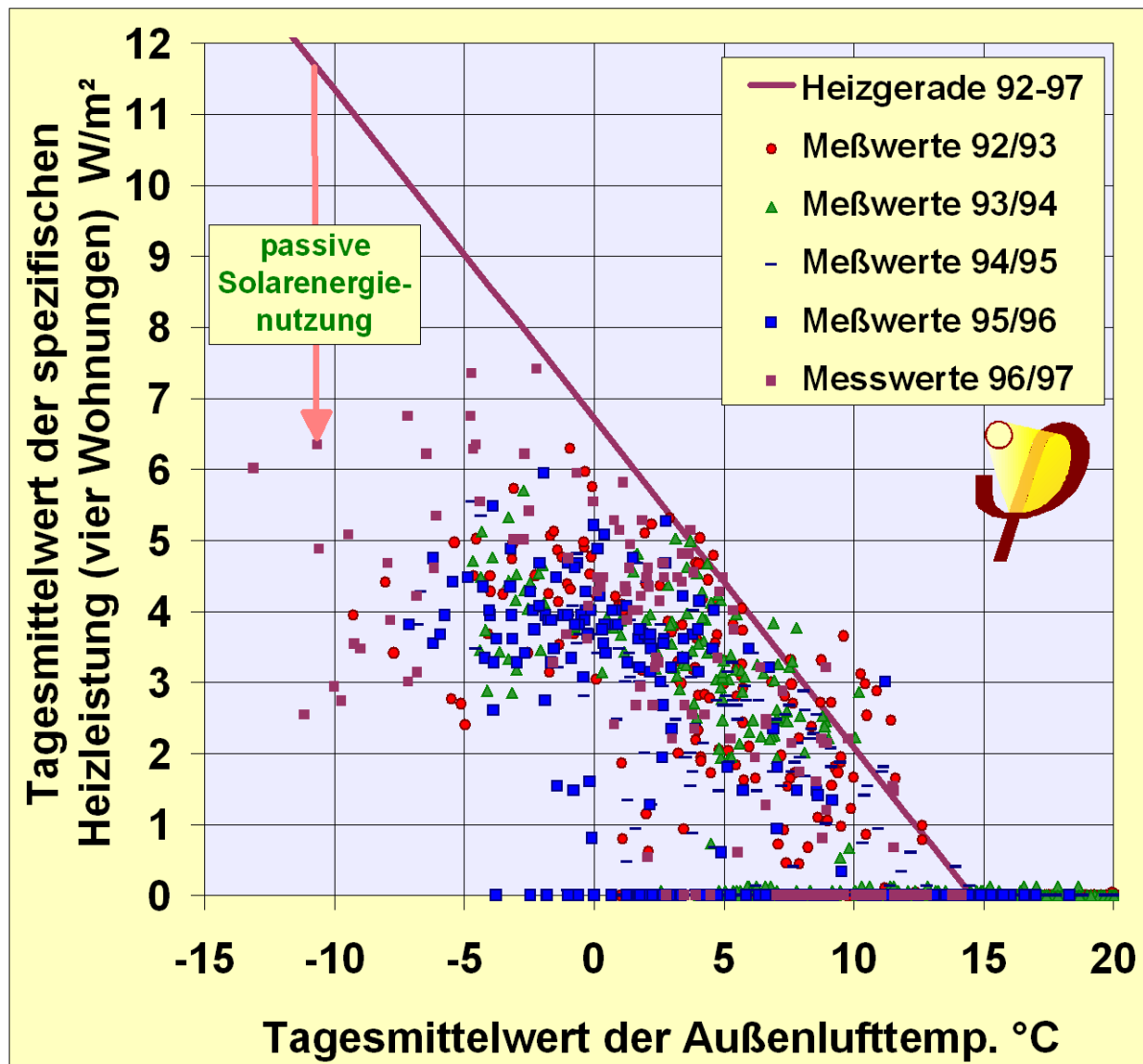


Abbildung 7: Gemessene Heizleistungen und Heizkurve für fünf Heizperioden im Passivhaus Darmstadt-Kranichstein. Die Extremsituation des Winters 1996/97 ist in dieser Darstellung klar erkennbar.

## 2.3 Modellrechnung zum Verlauf der Heizleistungen

### 2.3.1 Basisüberlegungen zur Modellbildung

Eine gute Übereinstimmung zwischen den berechneten thermischen Größen und ausgeführten Messungen sind mit zeitlich und räumlich aufgelösten Modellen und unter Berücksichtigung der physikalischen Wärmetransportgleichungen inkl. deren Temperaturabhängigkeit möglich. Solche Untersuchungen wurden in [Feist/Loga 1997] und [Kaufmann/Feist 2001] durchgeführt. Die zugehörigen Modelle haben sich dabei sehr gut bewährt.

Für die hier zu behandelnden Fragestellungen ist eine detailgenaue Wiedergabe von Innentemperaturverläufen weder erforderlich noch möglich, da beispielsweise der Zeitverlauf der inneren Wärmequellen gar nicht mit der erforderlichen Genauigkeit erhoben wurde. Vielmehr reicht es aus, wenn das verwendete Modell die für den

Heizleistungsverlauf charakteristischen physikalischen Eigenschaften qualitativ korrekt wiedergibt. Für diesen Zweck ist es weder erforderlich, die Bauteile in Einzelschichten aufzulösen, noch die Details des Strahlungsdurchgangs zeitaufgelöst zu behandeln. Auch die Aufteilung in Einzelräume ist für die grundsätzlichen Fragen zur Heizlastbestimmung nicht relevant. Wie vorausgehende Untersuchungen gezeigt haben, ist es für ein Modell für die hier aufgeworfenen Fragestellungen entscheidend, dass die Trennung zwischen dem inneren Strahlungswärmeaustausch und dem konvektiven Wärmetransport zum Raumlufknoten erhalten bleibt.

Es wurde daher das in Abbildung 8 dargestellte Zweistem-Modell für ein typisches Passivhaus erstellt, mit welchem sich mit Stundenschrittweite die Temperaturentwicklung und die auftretenden Heizleistungen ermitteln lassen. Das Modell enthält alle wesentlichen Bestandteile einer detaillierten instationären Simulation, ist jedoch auf die Kerngrößen für eine Gebäudezone reduziert. Ein solches Modell stellt einen Zwischenschritt zwischen der detaillierten instationären Simulation mit einem DYNBIL-Modell und der quasistationären Modelllösung gemäß einem Energiebilanzmodell (z.B. nach DIN EN 832) dar.

### 2.3.2 Definition des verwendeten Modells

Für das Modellhaus wird ein Einkapazitätenmodell mit einem Strahlungsknoten  $\vartheta_C$  ("Raumoberfläche", zugleich Knoten für die effektive Wärmekapazität) und einem Raumlufknoten  $\vartheta_{air}$  verwendet. Es weist folgende charakterisierende Bestandteile auf (vgl. Abbildung 8):

Leitwert von der Kapazität zur Außenluft	$H_{e,1}$
Leitwert vom Lufttemperaturknoten zur Außenluft	$H_{e,2}$
Leitwert zum Erdreich	$H_g$
Kopplungsleitwert (Luft- an Strahlungsknoten)	$H_{cop}$
effektive Wärmekapazität des Hauses	$C_{eff}$
Innere Wärmequelle des Hauses	$P_{int}$
Solarapertur nach „Süden“	$A_S$
Solarapertur nach „Osten“	$A_E$
Solarapertur nach „Norden“	$A_N$
Solarapertur nach „Westen“	$A_W$
Solarapertur „horizontal“	$A_{hor}$

Alle trägheitsbehafteten Außenbauteile werden zu einem Leitwert  $H_{e,1}$  vom Strahlungsknoten (Kapazität) zur Außenluft zusammengefasst, alle trägheitslosen in einem direkten Leitwert  $H_{e,2}$  zwischen Raumlufknoten und Außenluft. Danach zählen Außenwände, Decken und Dachkonstruktionen eindeutig zu  $H_1$  und ebenso eindeutig der Luftaustausch zu  $H_2$ . Eine Sonderrolle spielen die Fenster: Die flächenspezifischen Wärmekapazitäten der Verglasungen sind so gering, dass sie nicht bedeutend zur thermischen Trägheit  $C_{eff}$  beitragen. In guter Näherung können die Fenster als trägheitslose Bauteile behandelt werden. Allerdings erfolgt die Ankopplung der Fenster raumseitig einerseits über den konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten  $h_{kon}$  an die Raumlufknoten (mit  $H_{w,kon} = A_W h_{kon}$ ), andererseits über den Strahlungswärmeübergang  $h_{rad}$  an die übrigen Oberflächen im Raum - in der Modellnäherung also an den Strahlungsknoten (mit  $H_{w,rad} = A_W h_{kon}$ ).

Bezeichnen wir mit  $H_{w,e}$  den Wärmedurchlassleitwert von der Fensterinnenoberfläche an die Außenluft ( $H_{w,e} = A_w U_w$  mit  $U_w = 1/(1/\Lambda_{w,e} + 1/(h_{kon}+h_{rad}))$ ), so wird der Wärmeverlust durch ein Fenster durch das Modell in Abbildung 9 (links) beschrieben. Der in diesem Sternmodell zusätzlich auftauchende Knoten der Fensteroberfläche lässt sich durch Umrechnung auf Dreiecksschaltung eliminieren (vgl. Abbildung 9 rechts); die Leitwerte im Dreieck bestimmen sich zu:

$$H_{1,w} = H_{w,e} H_{w,rad} / (H_{w,e} + H_{w,kon} + H_{w,rad})$$

$$H_{2,w} = H_{w,e} H_{w,kon} / (H_{w,e} + H_{w,kon} + H_{w,rad})$$

$$H_{cop,w} = H_{w,rad} H_{w,kon} / (H_{w,e} + H_{w,kon} + H_{w,rad})$$

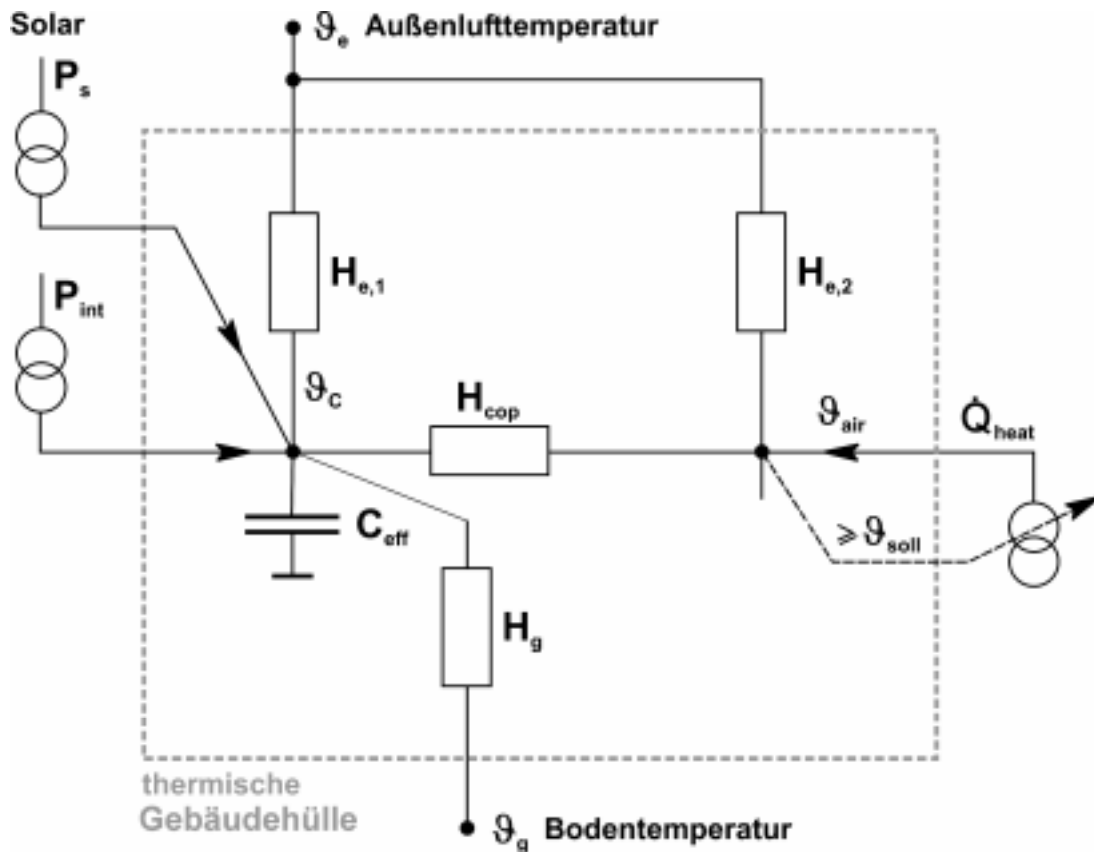


Abbildung 8: Thermisches Modell

Diese Größen sind wie folgt definiert:

$$H_{e,1} = \sum_{e,träge} A_j U_j + H_{w,1} + \sum_{e,träge} \ell_e \Psi_e$$

$$H_{e,2} = H_{w,2} + V_{Luft} n_{äqui} c_p \rho_{Luft}$$

$$H_g = \sum_{Grund} A_{g,j} U_{g,j} + \sum_{Grund} I_{g,j} \Psi_{g,j}$$

$$H_{cop} = \sum_{e,träge} A_j h_{kon,j} + \sum_{Grund} A_{g,j} h_{kon,j} + H_{w,cop}$$

$$C_{eff} = \sum A_j C_{eff,j}$$

$$P_{int} = Z_{Pers} P_{Pers} + \zeta P_{elektr}$$

$$P_{sol} = \sum_X A_X Q_X$$

$$A_X = A_{w,X} F_X \quad (\text{für die Richtung "X"})$$

Dabei bezeichnen

$A$	Fläche
$H$	thermischer Leitwert
$F$	Strahlungsreduktionsfaktor (Verschattung, Verschmutzung, Einfallswinkelkorrektur, Verglasungsanteil)
$U$	Wärmedurchgangskoeffizient
$\Psi$	Längenspezifischer Wärmeverlustkoeffizient
$C_{eff}$	effektive innere Speicherkapazität
$V$	Volumen
$l$	Länge
$n$	Luftwechsel
$c_p$	spezifische Wärmekapazität Luft
$\rho_{Luft}$	Dichte der Luft
$Z_{Pers}$	Zahl der durchschnittlich anwesenden Personen
$P_{elektr}$	abgenommene elektrische Leistung
$\zeta$	Verfügbarkeit der Wärmeabgabe aus elektrischen Geräten

Die Indizes bedeuten:

e	außen (external)
1	an den Trägheitsknoten gekoppelt (träge)
2	an den Luftknoten gekoppelt (trägheitslos)
w	Fenster (window)
S,E,N,W,hor	Süd, Ost, Nord, West, horizontal (für die Richtungen X)
g	Grund

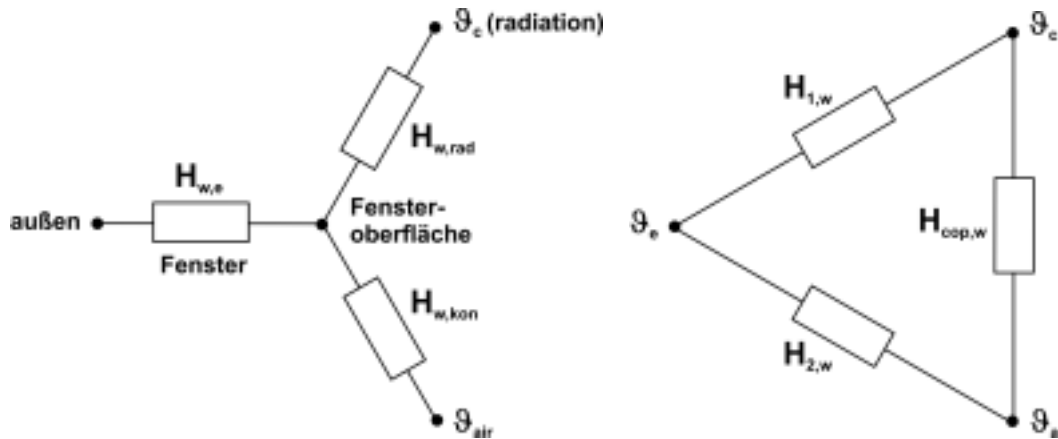


Abbildung 9: Zur Umrechnung des Fenster-Stern-Modells in ein Dreiecksmodell

Für die Werte der charakterisierende Bestandteile ergibt sich aus den PHPP-Berechnungen für das charakteristische Passivhaus (ein Viertel des Gesamtobjektes aus zwei End- und zwei Mittelhäusern) in Darmstadt-Kranichstein:

Tabelle 2: Die Modelldaten für das durchschnittliche Reihenhaus zum Passivhaus Darmstadt-Kranichstein (1/4 des Gesamtgebäudes aus zwei Reihenend- und zwei Reihenmittelhäusern)

			<b>Modell</b> Darmstadt Kranichstein (charakteristisches Haus)
Bezugsfläche (Wohnfläche)	$A_{WFL}$	$m^2$	<b>156.0</b>
Leitwert außen, träge	$H_1$	W/K	<b>48.43</b>
Leitwert außen, flink	$H_2$	W/K	<b>15.87</b>
Leitwert Erdreich	$H_g$	W/K	<b>10.73</b>
Konvektiver Kopplungsleitwert	$H_{kon}$	W/K	<b>1096.2</b>
Apertur Süd	$A_S$	$m^2$	<b>6.935</b>
Apertur Ost	$A_O$	$m^2$	<b>0.0</b>
Apertur Nord	$A_N$	$m^2$	<b>2.469</b>
Apertur West	$A_W$	$m^2$	<b>0.406</b>
Apertur horizontal	$A_{hor}$	$m^2$	<b>0.0</b>
Wärmekapazität	$C_{eff}$	kWh/K	<b>56.0</b>
mittlere innere Leistung	$P_{int}$	W	<b>327.6</b>

### 2.3.3 Modellgleichungen

Das Haus wird mit Hilfe eines instationären Modells behandelt. Dabei entsteht durch die Regelbedingung am Raumluftknoten mit

$$\vartheta_{air} \geq \vartheta_{soll}$$



eine Nichtlinearität im Modell. Es müssen daher zwei Berechnungsfälle unterschieden werden: Ist die Regelbedingung erfüllt, so liegt ein freies Modell vor und  $\vartheta_{air}$  bestimmt sich aus der Knotengleichung für den Raumlufknoten mit  $Q_{heat} = 0$ :

$$\vartheta_{air} = (H_{e,2} \vartheta_e + H_{cop} \vartheta_C) / (H_{e,2} + H_{cop}) .$$

Resultiert aus dieser freien Gleichung dagegen eine Raumlufttemperatur, die den Sollwert unterschreitet, so wird  $\vartheta_{air} = \vartheta_{Soll}$  gesetzt und die Heizleistung  $Q_{heat}$  als Bilanzrest bestimmt:

$$Q_{heat} = H_{e,2} (\vartheta_{Soll} - \vartheta_e) + H_{cop} (\vartheta_{Soll} - \vartheta_C) .$$

Für jeden Fall ist die das System bestimmende Differentialgleichung:

$$C_{eff} \dot{\vartheta}_C = H_{e,1} (\vartheta_e - \vartheta_C) + H_g (\vartheta_g - \vartheta_C) + H_{cop} (\vartheta_{air} - \vartheta_C) + P_{int} + P_{sol} .$$

Die Integration dieser Differentialgleichung kann z.B. durch ein Vorwärtsdifferenzverfahren erfolgen (vgl. [Feist 1992]), wobei zu jedem Zeitpunkt zu entscheiden ist, ob der freie oder der beheizte Fall vorliegt.

### 2.3.4 Vergleich Modell/Messung für den Winter 1996/97

Von den Randbedingungen zur Lösung der Modellgleichungen liegen für das Passivhaus Damstadt-Kranichstein im Winter 1996/97 in kontinuierlicher Messung vor:

- Der Verlauf von Außenluft- und Erdreichtemperatur und
- der Verlauf der Solarstrahlungsdaten (vgl. Abbildung 2).

Auch der Verlauf der Innentemperatur wurde gemessen, dieser wird aber hier nicht verwendet: Vielmehr wird ein ideal auf Solltemperatur 20 °C beheiztes Gebäude angenommen. Keine zeitaufgelösten Messwerte liegen dagegen in diesem Zeitraum für die inneren Wärmequellen vor. Es werden daher konstant 327.6 W angesetzt, wie es sich aus dem mittleren Stromverbrauch und der von früheren Messungen bekannten Anwesenheitsquote ergibt (wegen der unbekanntem Zeitverläufe ist eine genauere Simulation zum Vergleich mit den Messungen nicht sinnvoll).

Mit diesen (artifiziellen) Randbedingungen bestimmt das Modell die tagesmittleren Heizlasten in Höhe der in Abbildung 10 ausgezogen dargestellten Kurve; im Vergleich dazu sind die Messwerte mit Quadratsymbolen wiedergegeben. Die qualitative Übereinstimmung zwischen dem Modell und den Messungen ist für den hier gegebenen Zweck ausreichend. Insbesondere werden die Zeitpunkte der Grenzen der Heizperiode, die Maximalwerte und die Verlaufsform gut getroffen. Einzelne Leistungstäler (z.B. an Weihnachten, vermutlich wegen der zu diesem Zeitpunkt höheren internen Wärmequellen) treten im Modell nicht auf, das war aber auf Grund der fehlenden zeitaufgelösten Daten zur Innentemperatur und zu den inneren Wärmequellen auch nicht zu erwarten.

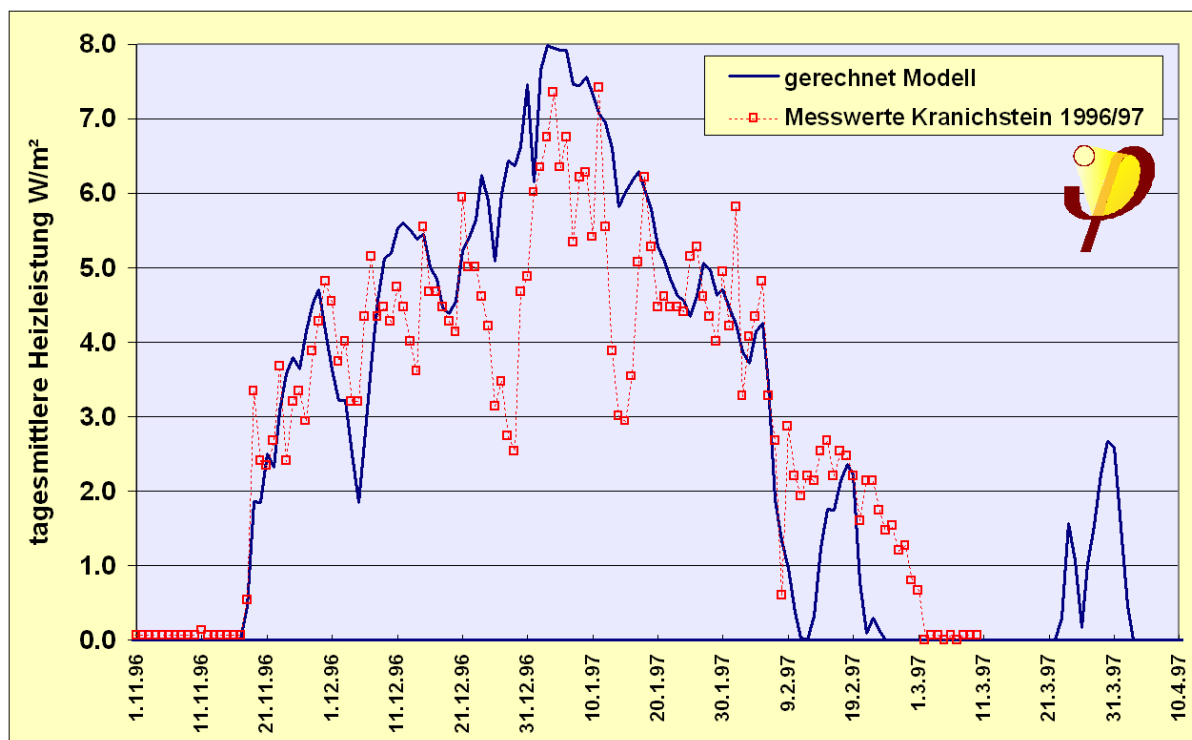


Abbildung 10: Vergleich der tagesmittleren Heizleistungen ( $\text{W/m}^2$ ) aus der Modellrechnung (ausgezogene Kurve) und nach Feldmessungen (Winter 1996/97; Quadratsymbole). Für die Berechnung lagen keine zeitaufgelösten Daten der inneren Wärmequellen vor, nur deren Mittelwert.

### 2.3.5 Randbedingungen der Auslegung nach den Klimadaten 1996/97

Das in 2.3.2 beschriebene Modell erlaubt die Berechnung des Heizlastfalls auch für gegenüber dem tatsächlich realisierten Haus veränderten Gebäudedaten. Besonders aufschlussreich ist dabei die Variation der Fensterfläche, da diese sowohl die solaren Gewinne, als auch die Wärmeverluste maßgeblich beeinflusst.

Auch für das extrem kalte Jahr 1996/97 lässt sich die Heizlast damit nach dem hier behandelten Auslegungsverfahren mit zwei Auslegungsrandbedingungen bestimmen: Dabei ergibt sich die Heizlast bei Gebäuden mit wenig Solarapertur in der sehr kalten, strahlungsreichen Periode; für Gebäude mit großer Solarapertur jedoch unter mäßig kalten, aber strahlungsarmen Bedingungen. Die im Winter 1996/97 aufgetretenen Extrembedingungen führten definitiv zu höheren Heizlasten als die Standardauslegung (in Abbildung 11 gestrichelt eingezeichnet). Hätte man das Wärmeabgabesystem im Passivhaus Darmstadt-Kranichstein tatsächlich streng nach den Auslegungsparametern gemäß dem Testreferenzjahr ausgelegt, so hätte die maximal verfügbare Leistung nur 1078 W betragen (anstelle der 1997 tatsächlich aufgetretenen 1245 W ein Fehlbetrag von 13%).

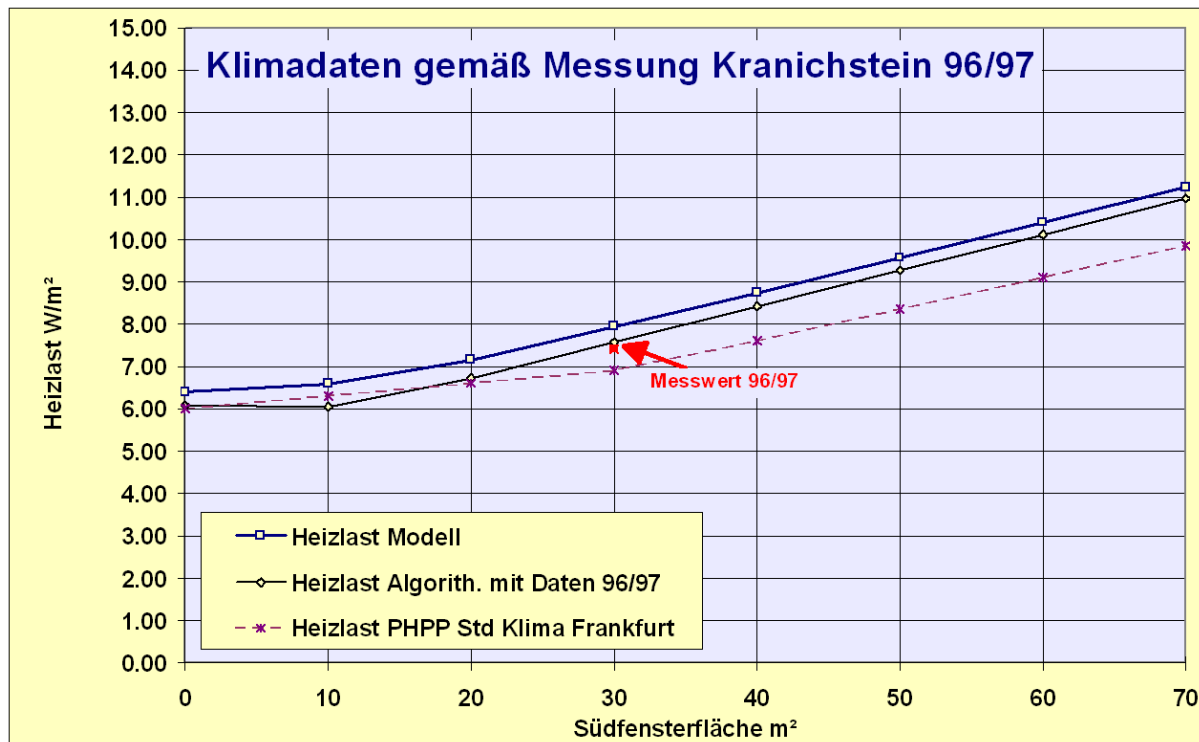
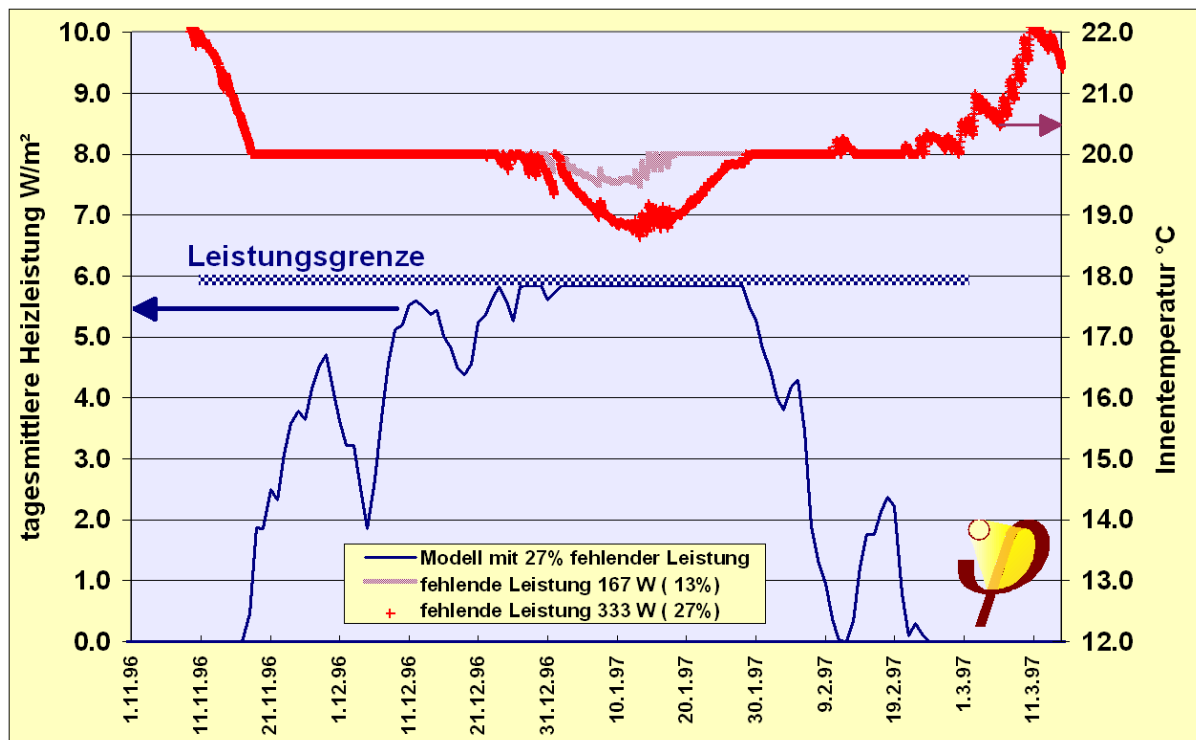


Abbildung 11: Mit dem beschriebenen Modell berechnete maximale Heizleistung (Heizlast) für die Klimadaten des kalten Winters 1996/97. Eingezeichnet ist auch der gemessene Wert für das betreffende Jahr. Die berechnete Heizlast nach den Standardauslegungsrandbedingungen, die auf Basis des Testreferenzjahres Frankfurt/Main bestimmt wurden, sind bei Fensterflächen über 20 m<sup>2</sup> etwas kleiner.

Bei Auslegungsaußentemperaturen von -9 °C im relevanten Zeitraum könnte man stationär berechnet ein Temperaturdefizit im Innenraum von  $13\% \cdot (20 - (-9)) \text{ K} = 3.8 \text{ K}$  vermuten. Unter diesen Umständen würde es in solchen Häusern mit Unterauslegung Heizanlage der über einen bedeutenden Zeitraum empfindlich kalt werden. Tatsächlich ist der zu befürchtende Temperaturrückgang aber auch bei mangelnder verfügbarer Leistung erheblich geringer. Abbildung 12 zeigt, dass der Temperaturrückgang bei 167 W fehlender Leistung (13%) maximal 0.5 K gegenüber dem Sollwert betragen würde. Die Ursache für dieses gutmütige Verhalten ist, dass in der Gebäudestruktur ausreichend Wärme gespeichert ist, die auch bei extremem Wetter wegen der langen Zeitkonstante (hier: 31 Tage) die Temperatur auf komfortablem Niveau stabilisiert.

Selbst bei einer sehr weitgehenden Unterdimensionierung von 333 W (entspr. 27% der maximalen Leistung) würde die Temperatur nach der Simulation maximal um 1.4 K abnehmen: Dies wäre nun bereits eine spürbarer Temperaturabnahme. Allerdings sollte man bedenken, dass sich Fehlleistungen der hier behandelten Größenordnung (weniger als ein halbes Kilowatt) problemlos spontan ergänzen lassen: Schon der zusätzliche Betrieb von einigen Glühlampen (je 100 W) würde ausreichen; deren Stromverbrauch würde sich im hier behandelten Fall (333 W Fehlleistung) auf insgesamt 53 kWh summieren, die Kosten würden dafür ca. 6.- € betragen. Man erkennt aus diesen Werten, dass die Auslegungsleistungen in Passivhäusern in der Praxis als ziemlich unkritisch anzusehen sind, solange die Gebäudehülle keine schwerwiegenden Qualitätsmängel aufweist, so dass der Passivhausstandard nicht mehr entfernt eingehalten wird und dadurch erheblich höhere Leistungen erforderlich werden.



**Abbildung 12:** Zu erwartender Innentemperaturverlauf, wenn die installierte Heizleistung im Extremwinter 1996/97 um 13% (Standardauslegung nach Testreferenzjahr) bzw. 27% (hypothetisch) geringer gewesen wäre, als die tatsächlich aufgetretene Maximalleistung. Die Innentemperaturen gehen wegen der Wärmespeicherung in der Gebäudestruktur erheblich weniger zurück, als vermutet wird. Man bedenke weiter, dass sich Fehlleistungen der hier behandelten Größenordnung (bis 333 W) problemlos spontan ergänzen lassen: schon der zusätzliche Betrieb von drei bis vier Glühlampen (je 100 W) würde ausreichen.

Soll empirisch überprüft werden, ob eine vorliegende Heizwärmeversorgung in einem Passivhaus ein Leistungsdefizit aufweist, so ist dafür ein Kriterium allein anhand von Messdaten interessant. Wir haben in der Diskussion von Abbildung 4 festgestellt, dass die empirisch bestimmte Abhängigkeit der Innentemperatur von der Außenlufttemperatur mit  $0.0045 \text{ } ^\circ\text{C}/^\circ\text{C}$  bei diesem ausreichend dimensionierten System praktisch nicht feststellbar ist.

In Abbildung 13 wird die Korrelation nun noch einmal für den hypothetischen Fall des eben behandelten Leistungsdefizits von 27% dargestellt. Nun ist eine Abhängigkeit leicht erkennbar; die Steigung der Ausgleichsgeraden beträgt  $0.036 \text{ } ^\circ\text{C}/^\circ\text{C}$  und der Korrelationskoeffizient ist mit 74% signifikant. Fehlende Leistungen im Wärmebereitstellungssystem lassen sich somit in Passivhäusern empirisch durch eine Korrelationsanalyse der Raumlufttemperaturen über der Außenlufttemperatur feststellen. Dabei dürfen jedoch nur Messungen im Kernwinter herangezogen werden (Dezember/Januar/Februar), in denen die Wärmeverteilung dauerhaft in Betrieb war. Als Kriterium kann gelten, dass die Temperatur nicht mehr als insgesamt 0.5 K absinken sollte (zu  $\Delta\vartheta_e=20 \text{ K}$ ), so dass Steigungen von mehr als  $0.025 \text{ } ^\circ\text{C}/^\circ\text{C}$  als zu hoch anzusehen sind.

Das hier abgeleitete Kriterium wird in den folgenden Kapiteln zur Auswertung von Projekten eingesetzt, bei denen die Datenlage nicht so umfassend ist, wie im Passivhaus Darmstadt-Kranichstein.

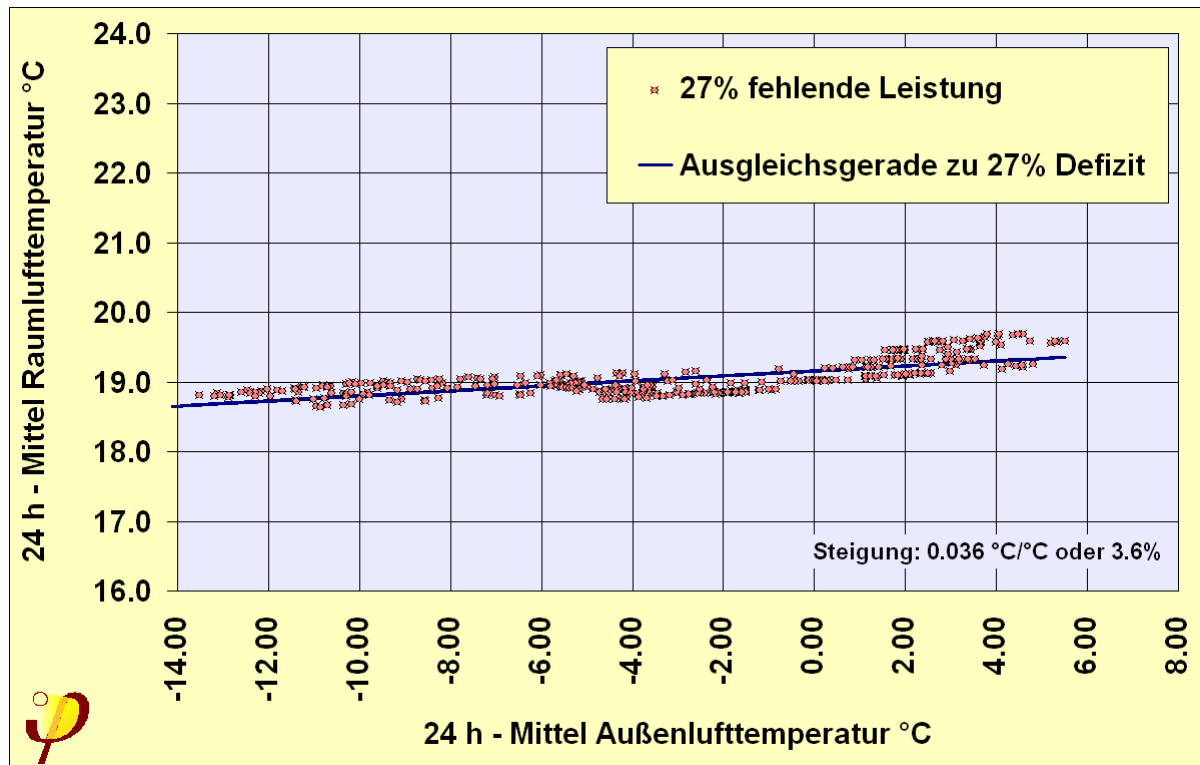


Abbildung 13: Raumluft-/Außenluft-Korrelation bei bestehendem Leistungsdefizit. Die Abhängigkeit wird erkennbar ( $0.036 \text{ °C/°C}$ ) und es besteht eine signifikante Korrelation (74%).

Zusammengefasst ergeben sich aus den Messungen im besonders kalten Winter 1996/97 im Passivhaus-Kranichstein:

- Trotz vorhandener sehr viel höherer verfügbarer Heizleistung blieb die angeforderte Leistung auf unter  $7.4 \text{ W/m}^2$  begrenzt;
- die gemessenen Leistungen stehen in guter Übereinstimmung mit den Berechnungen nach dem Zweipunktverfahren in [Bisanz 1999];
- die thermische Reaktion des Passivhauses auf extreme Kälteperioden erweist sich als sehr gutmütig und
- diese Gutmütigkeit bleibt nach der weitergehenden Simulation mit unterstellten Leistungsdefiziten bestehen.

### 3 Validierung aus Messungen in der Passivhaussiedlung Hannover

#### 3.1 Die Passivhaus-Siedlung am Kronsberg<sup>1</sup>

Die Passivhaussiedlung Hannover-Kronsberg besteht aus 32 Passivhäusern, welche in vier Hauszeilen zu je acht Häuser angeordnet sind (Abbildung 14). Es gibt drei unterschiedliche Hausgrößen mit den jeweiligen Energiebezugsflächen (beheizten Wohnflächen) 119.5, 96.8 und 75.1 m<sup>2</sup>). Die Siedlung wurde 1998 vom Bauträger Rasch & Partner errichtet. Planverfasser sind F. Rasch und P. Grenz (Architektur) sowie N. Stärz (InPlan, Gebäudetechnik). Die Häuser sind in Mischbauweise realisiert worden (tragende Betonfertigteile mit hochwärmegedämmten Holzleichtbauelementen für Dach und Außenwände). Es handelt sich um die erste Passivhaussiedlung mit einer Wärmeversorgung über reine Zuluftnachheizung. Im Badezimmer befindet sich ein kleiner Heizkörper um dort kurzzeitig auch außerhalb der Heizperiode höhere Raumlufttemperaturen (24 °C) erreichen zu können. Die Wärmeversorgung der Siedlung erfolgt über zwei Fernwärmeübergabestationen, welche sich in zwei separaten Technikhäusern befinden. Zusätzlich verfügt jedes Einzelhaus noch über eine Solaranlage zur Unterstützung der Warmwasserbereitung. Jedes einzelne Passivhaus ist mit einem Lüftungsgerät mit Luft/Luft-Gegenstrom-Wärmeübertrager ausgestattet.

	<p><b>Konstruktion: Mischbau</b> tragende Struktur aus Betonfertigteilen Außenwand und Dach als Holzleichtbauelement</p> <p><b>Heizsystem: reine Zuluft-nacherwärmung</b> Versorgung durch Fernwärme</p> <p><b>Lüftung:</b> <b>Wohnungslüftung</b> Mechanische Lüftung mit WRG 78%</p> <p><b>Energiekennwert:</b> q<sub>H</sub>: ca. 12 kWh/m<sup>2</sup>a, Berechnung mit PHPP</p> <p><b>spezif. Bauwerkskosten:</b> ca. 872 €/m<sup>2</sup> (Wohnfläche) ohne MwSt.</p>
<p><b>32 Reihenhäuser in Hannover-Kronsberg</b> Rasch &amp; Partner Baujahr 1998 Wohnfläche je 75-120 m<sup>2</sup></p>	

Abbildung 14: Passivhaussiedlung Hannover-Kronsberg (vgl. auch die folgenden beiden Seiten für eine kurze Charakterisierung).

<sup>1</sup> Dieser Abschnitt wurde zur Übersicht aus [Peper 2001] übernommen. Eine detaillierte Beschreibung ist in [Feist 2001] enthalten.



**Projektbeschreibung**

- **Satteldach-Reihenhauszeile** mit jeweils 8 Wohneinheiten, insgesamt 32 Wohneinheiten, Hannover-Kronsberg, Deutschland (9°44' O, 52°22'N), Südausrichtung (Abw. 15° nach West).
- **Energiekonzept:** Einsatz von
  - sehr guter Wärmedämmung und wärmebrückenfreien Details,
  - hoher Gebäudeluftdichtheit,
  - hoch-effizienter Wärmerückgewinnung,
  - passiver Solarenergienutzung,
  - 3-Scheiben-Wärmeschutzverglasung und
  - supergedämmten Fensterrahmen.
- **PHPP-Berechnung:**  
 Heizwärmebedarf (Mittelwert der Siedlung):  
 $Q_H = 11,8 \text{ kWh}/(\text{m}^2_{\text{WNFA}})$   
 Heizwärmelast  $P_H = 7,1 \text{ W}/\text{m}^2$
- **Kosten:** ca. 827 €/m<sup>2</sup> Wohnfläche)

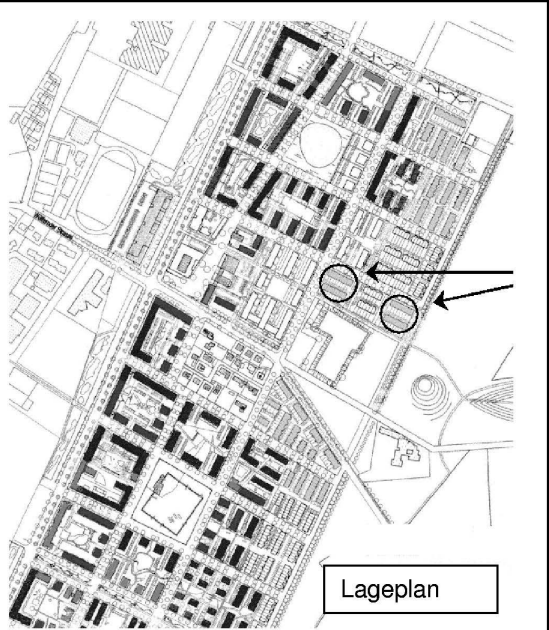
**Konstruktion**

- **Konstruktionsart:** tragende Struktur aus Betonfertigteilen, Außenwand und Dach als Holzleichtbauelement
- **Fenster und Verglasung:** 3-Scheiben-Wärmeschutzverglasung (g-Wert 60%), supergedämmte Fensterrahmen ( $U_f = 0,57 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ )
- **U-Werte:**

Außenwand	
Holzleichtbauelement	0,126 W/(m <sup>2</sup> K)
massive Giebelwand	0,097 W/(m <sup>2</sup> K)
EG-Bodenplatte	
(Endhaus)	0,096 W/(m <sup>2</sup> K)
(Mittelhaus)	0,125 W/(m <sup>2</sup> K)
Dach	0,095 W/(m <sup>2</sup> K)
Verglasung	0,75 W/(m <sup>2</sup> K)
Fenster ges.	0,83 W/(m <sup>2</sup> K)

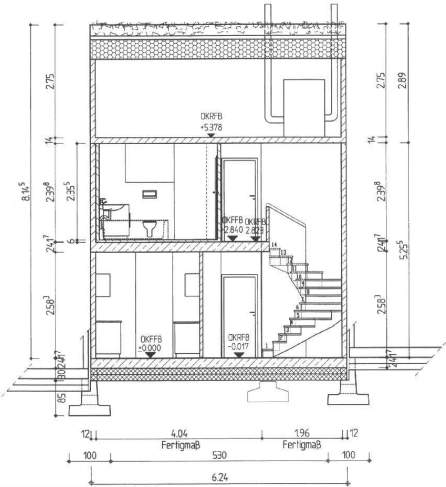
**Haustechnik**

- **Heizung und Lüftung:**
  - Zuluftnacherwärmung und Badheizkörper
  - Versorgung durch Fernwärme
  - eine autarke Lüftungsanlage je Wohneinheit
  - Gegenstrom-Wärmeübertrager (78%)
- **Warmwasser, Solaranlage:** solare Warmwasserbereitung über Flachkollektoranlage (3,8 m<sup>2</sup> Absorberfläche) mit einem Warmwasserspeicher von 300 l Inhalt (solarer Deckungsgrad ca. 50%).
- **Elektr. Geräte:** Beratung zu elektrischen Haushaltsgeräten und Förderung von hocheffizienten Energiespargeräten. Ausstattung aller Wohneinheiten mit einem an die Abluftanlage gekoppelten, energiesparenden Trockenschrank.

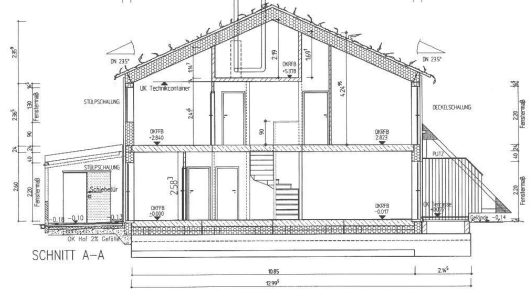


Lageplan

**Querschnitt**



**Längsschnitt**



<p><b>Grundrisse</b></p> <p><b>Erdgeschoss</b></p> <p><b>Obergeschoss</b></p> <p><b>Dachgeschoss</b></p>	<p><b>Passivhaussiedlung Kronsberg</b></p>
<p><b>Ansicht von Südost</b></p>	<p><b>ADRESSE:</b> Sticksfeld 30 – 124 30539 Hannover, Niedersachsen</p> <p><b>BAUTRÄGER:</b> Rasch &amp; Partner GmbH, Dipl. Ing. F. Rasch, Darmstadt</p> <p><b>BAUHERR:</b> Rasch &amp; Partner GmbH, Dipl. Ing. F. Rasch, Darmstadt</p> <p><b>ARCHITEKT:</b> Rasch &amp; Partner GmbH, Dipl.-Ing. Arch. P. Grenz, Dipl. Ing. F. Rasch, Darmstadt</p> <p><b>FACHINGENIEURE:</b> Haustechnik: inPlan GmbH, Dipl.-Ing. N. Stärz, Pfungstadt</p> <p><b>FERTIGSTELLUNG:</b> 12/1998</p> <p><b>VERÖFFENTLICHUNGEN:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Feist, Wolfgang; Peper, Søren; Görg, Manfred; von Oesen, Matthias: Klimaneutrale Passivhaussiedlung Hannover-Kronsberg, CEPHEUS-Projektinformation Nr. 18, Fachinformation PHI-2001/5, Darmstadt, Passivhaus Institut, Juni 2001.</li> <li>• Peper, Søren; Feist, Wolfgang: Thermographische Untersuchung der Passivhaussiedlung Hannover-Kronsberg CEPHEUS-Projektinformation Nr. 20, Fachinformation PHI-2001/7, Darmstadt, Passivhaus Institut, Juni 2001.</li> <li>• Kaufmann, Berthold; Feist, Wolfgang: Vergleich von Messung und Simulation am Beispiel eines Passivhauses in Hannover-Kronsberg; CEPHEUS-Projektinformation Nr. 21, Fachinformation PHI-2001/8, Darmstadt, Passivhaus Institut, Juni 2001.</li> <li>• Enikö Baffia: Wärmebrückenfreie Reihenhäuser der Passivhaus-Siedlung Hannover Kronsberg in Mischbauweise; in Protokollband Nr. 16 des Arbeitskreises kostengünstige Passivhäuser "Wärmebrückenfreies Konstruieren", Darmstadt, Passivhaus Institut, 1999.</li> <li>• Peper, Søren: Untersuchung der Luftdichtheit in der Passivhaussiedlung Hannover-Kronsberg, Fachinformation PHI-1999/4, Darmstadt, Passivhaus Institut, 1999</li> <li>• Stärz, Norbert; Kreuz, Witbold: Vorbereitende Untersuchung zur Haustechnik in den Passivhäusern Hannover Kronsberg, Pfungstadt, Ing.-Büro inPlan, April 1998</li> </ul>
<p><b>Technikraum im Dachgeschoss</b></p>	<p><b>Ansicht von Südost</b></p>

### 3.2 Messung von Heizleistungen in der Siedlung am Kronsberg

Im Auftrag der Stadtwerke Hannover hat das PHI in drei aufeinanderfolgenden Messjahren die in der Siedlung tatsächlich aufgetretenen Heizleistungen gemessen. Diese Messergebnisse sind in zwei Berichten enthalten, aus denen wir in diesem Abschnitt zitieren [Peper 2001][Peper 2002].

Zunächst werden die gemessenen Durchschnittswerte aller dauerhaft bewohnten Passivhäuser in der Zeit vom 8.11.1999 bis zum 18.4.2000 diskutiert. In diesen Häusern lag die **mittlere Innentemperatur** bei **21.1 °C**. Die Messungen in Hannover zeigen, dass bereits in der ersten Heizperiode die Passivhausgrenze von 10 W/m<sup>2</sup> mit dem gemessenen Tagesmittelwert von 8.8 W/m<sup>2</sup> unterschritten wurde. Der Maximalwert ist allerdings als Ausreißer erkennbar (vgl. Abbildung 15). Ohne diesen Ausreißer lag die maximale Heizlast schon im ersten Betriebsjahr bei 6.9 W/m<sup>2</sup>.

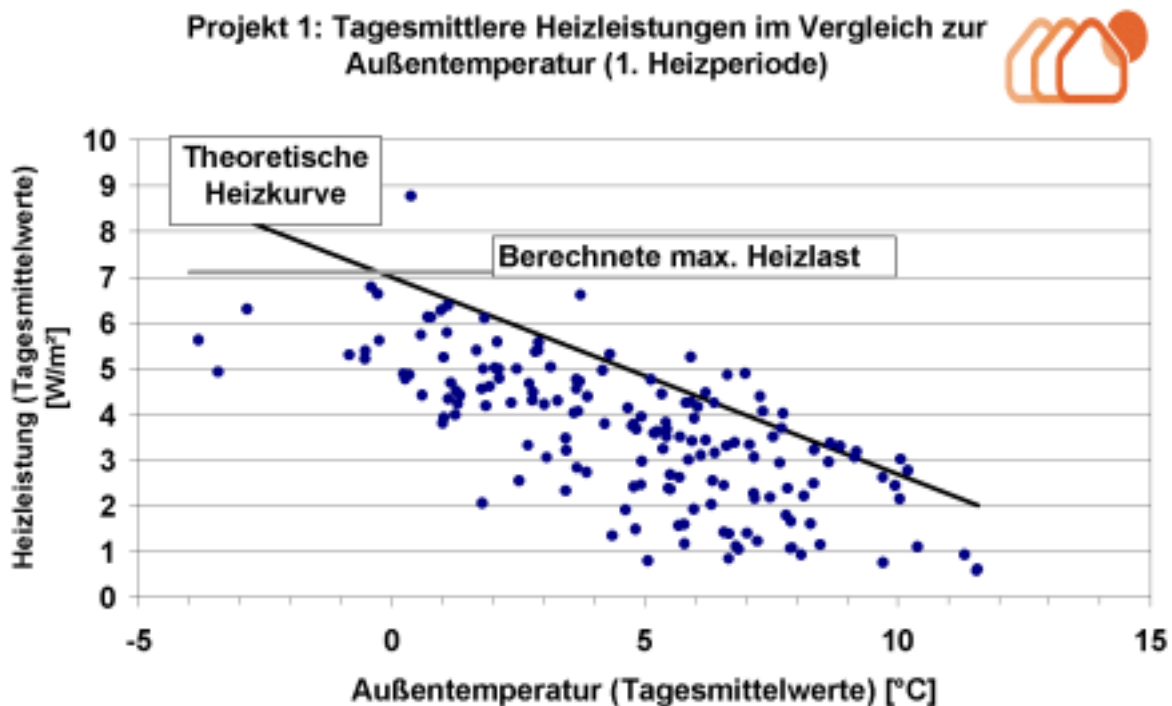


Abbildung 15: Theoretische Heizgerade und tagesmittlere Heizleistungen über der tagesmittleren Außentemperatur (bewohnte Häuser) in der Heizzeit (08.11.1999 bis 18.04.2000). Die nach PHPP berechnete Heizlast für das repräsentative Haus liegt bei 7.1 W/m<sup>2</sup> (aus [Peper 2001]).

Bei den mittleren Heizleistungen im betrachteten Untersuchungszeitraum ergeben sich einige Werte, die oberhalb der Heizkurve liegen. Im Bericht [Peper 2002] wird die These aufgestellt, dass es sich hierbei überwiegend um Aufheizvorgänge handelt. Diese These werden wir in einem der folgenden Abschnitte noch untersuchen.

In der ersten Heizperiode waren die Nachheizregister noch nicht wärmegeämmt. Auch deren Wärmeverlust sowie die Abstrahlungsleistung der Vor- und Rücklaufleitung ab dem Wärmehähler zum Nachheizregister und Badheizkörper werden mitgemessen. Auch hierdurch erhöhen sich die gemessenen Leistungen.



In der zweiten ausgewerteten Heizperiode 2000/01 wird die rechnerische Heizlastobergrenze von  $7.1 \text{ W/m}^2$  von den gemessenen tagesmittlere Heizlasten in keinem Fall überschritten (Abbildung 16). Es liegen auch nur noch weniger Messwerte über der theoretischen Heizkurve.

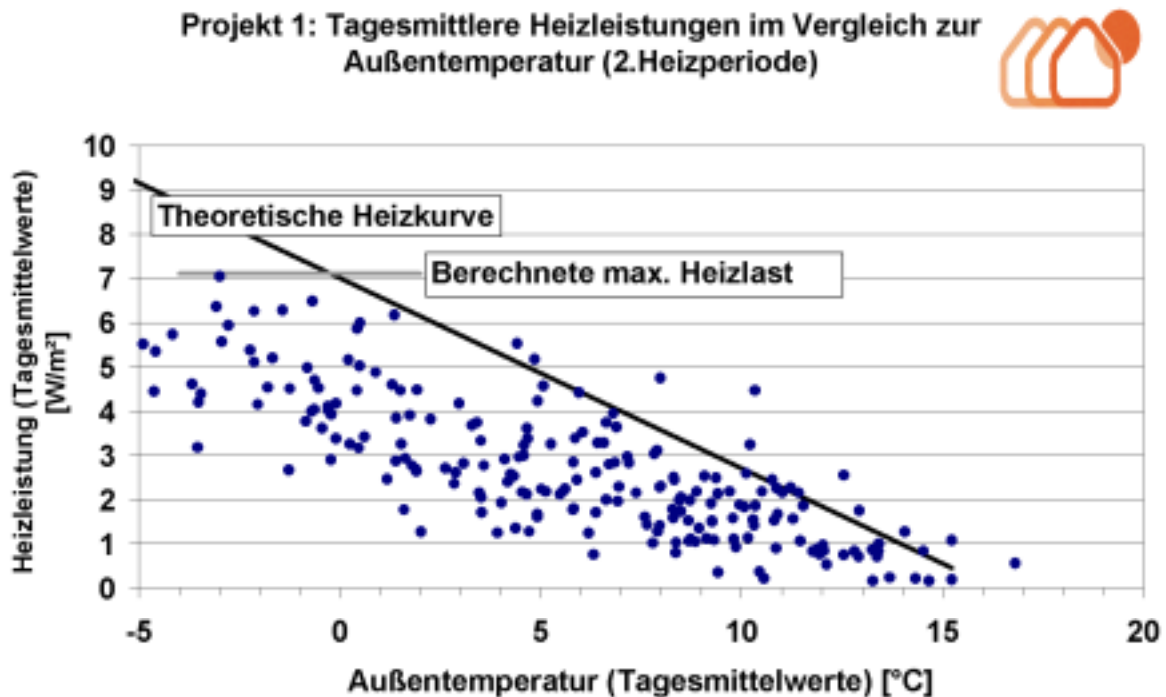


Abbildung 16: Theoretische Heizgerade und tagesmittlere Heizleistungen im Vergleich zur tagesmittleren Außentemperatur (ausschließlich bewohnte Häuser) in der zweiten Heizperiode (01.10.2000 bis 30.04.2001) (aus [Peper 2001]).

Die theoretische Heizgerade der Passivhäuser bestimmt sich aus den Eigenschaften der Gebäudehülle (Dämmstandard), dem Ansatz für die internen Wärmequellen sowie der Innentemperatur. Die mittlere flächengewichtete Innentemperatur der 30 dauerbewohnten Häuser lag in der 3. Heizperiode bei  $22.0 \text{ °C}$ . Die Heizkurve dient der Einordnung der mittleren Tagesleistungen der Passivhäuser. Ohne Solareinstrahlung müssten theoretisch alle tagesmittleren Heizleistungen genau auf der Geraden liegen (stationäre Betrachtung). Durch den Einfluss der Solarstrahlung „fallen“ die gemessenen Heizleistungen mehr oder weniger von der Geraden herunter.

An der Heizgeraden für die dritte Heizperiode in Abbildung 17 lässt sich ablesen, dass die Heizgrenztemperatur (Schnittpunkt der Geraden mit der Abszisse) bei etwa  $17 \text{ °C}$  lag. Die Messdaten zeigen allerdings nennenswerte Heizleistungen nur unterhalb von ca.  $12.7 \text{ °C}$ . Nur eine der tagesmittleren Heizleistungen liegt nun nennenswert über der Heizgeraden. Im Vergleich zu den Werten aus den vorangegangenen Jahren spricht dies für das Erreichen des projektierten Zustandes. Nach drei Jahren Betriebszeit sind die massiven Bauteile weitgehend getrocknet und alle Systeme gemäß der Vorgaben eingestellt. Die gemessene maximale Heizleistung liegt mit  $7.2 \text{ W/m}^2$  fast exakt auf der Grenzgeraden der theoretischen maximalen Heizlast für die Gebäude ( $7.1 \text{ W/m}^2$ ).

Die theoretische Heizgerade geht von gleichmäßigen Temperaturen in den Häusern aus, d.h. sie enthält keine Anheizvorgänge (z.B. nach nichtempfohlener Abschaltung der Heizung während eines Winterurlaubs) und keine erhöhten Heizleistungen (z.B. wegen geöffneter Fenster). Die Messwerte aus der 3. Heizperiode zeigen, dass diese Vorgänge in der Regel keinen bedeutenden Einfluss haben.

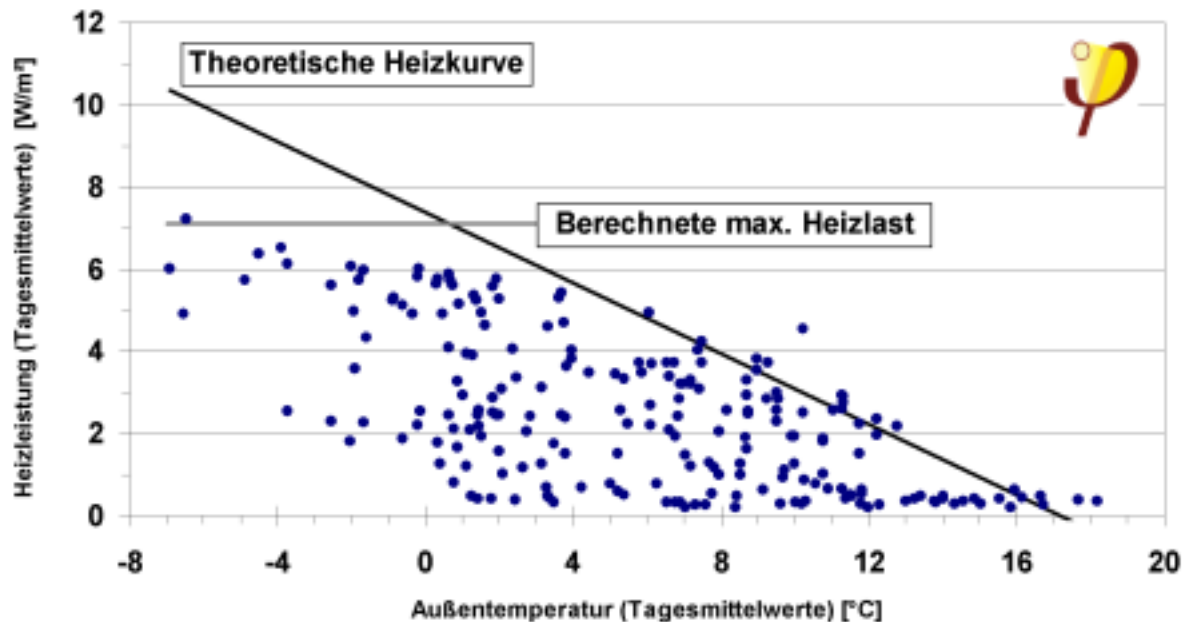


Abbildung 17: Theoretische Heizgerade und tagesmittlere Heizleistungen der dauerbewohnten 30 Passivhäuser über der mittleren Außentemperatur in der dritten Heizperiode (01.10.2001 bis 30.4.2002).

In Abbildung 18 sind die tagesmittleren Heizleistungen aller drei Heizperioden der kontinuierlichen Messung über den jeweiligen Tagesmittelwerten der Außenlufttemperatur abgetragen. Es ist gut erkennbar, dass bis auf einen Ausreißer und im Rahmen der Messgenauigkeit liegende Abweichungen alle Messdaten in dem durch die Diagrammachsen, die theoretische Heizgerade und die mit PHPP berechnete maximale Heizlast von  $7.1 \text{ W/m}^2$  begrenzten Trapez liegen. Insbesondere liegen keine Werte in dem verbotenen Bereich (Heizlast über  $7.1 \text{ W/m}^2$ , Außentemperatur unter  $-1 \text{ °C}$ ). Wegen der zunehmenden Abweichung der Heizleistungen von der theoretischen Heizgeraden nach unten ist die Steigung der Ausgleichsgeraden mit  $-0.25 \text{ K/K}$  deutlich flacher als die der Heizgeraden ( $-0.43 \text{ K/K}$ ). Die Daten belegen damit die theoretische Herleitung der Zwei-Auslegungspunkte-Heizlastberechnung empirisch.

Der Passivhaus-Richtwert von  $10 \text{ W/m}^2$  für über die Zuluft beheizte Gebäude wird in der Passivhaussiedlung Hannover in allen drei Messjahren deutlich unterschritten. Die Reduktion der Anlagentechnik mit den kleinen Heizregistern mit Leistungen von ca.  $1.1 \text{ kW}$  je Haus und einem zusätzlichen Badheizkörper (vgl. [Feist 2001a]) hat sich damit bewährt.

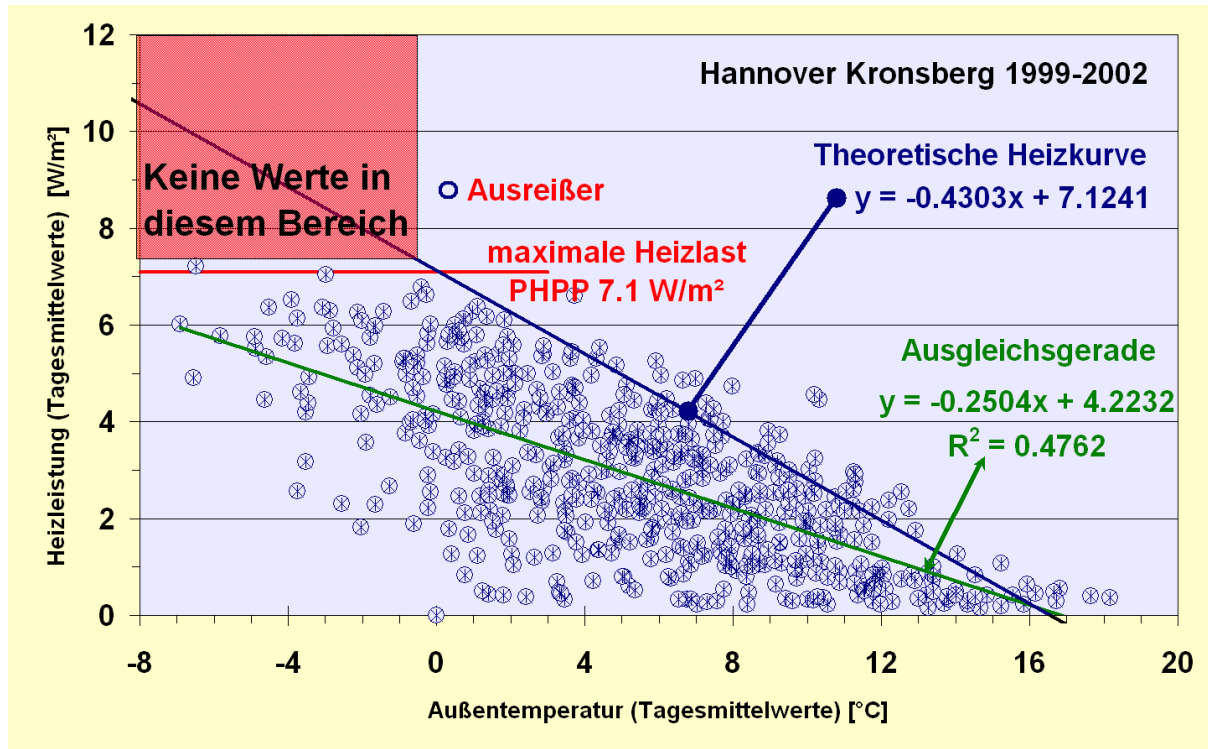


Abbildung 18: Auswertung aller Heizleistungsdaten 1999-2002 aus der Passivhaussiedlung Hannover-Kronsberg.

### 3.3 Analyse: reicht die Heizleistung aus?

Abbildung 19 zeigt die gemessenen mittleren Innentemperaturen über der tagesmittleren Außentemperatur. Die Ausgleichsgerade im Bereich von Außentemperaturen bis +10 °C verläuft fast waagrecht (0.02 K je Kelvin Temperaturänderung bei der Außenlufttemperatur). Für niedrige Außentemperaturen besteht damit nur ein extrem geringer Einfluss auf das Innentemperaturniveau. Die festgestellte Abhängigkeit liegt unterhalb des geforderten Kriteriums für die Nichtrückwirkung des Außenklimas. Auch diese Analyse zeigt, dass die Heizleistungen in der Siedlung immer ausgereicht haben, um ein komfortables Temperaturniveau aufrecht zu erhalten.

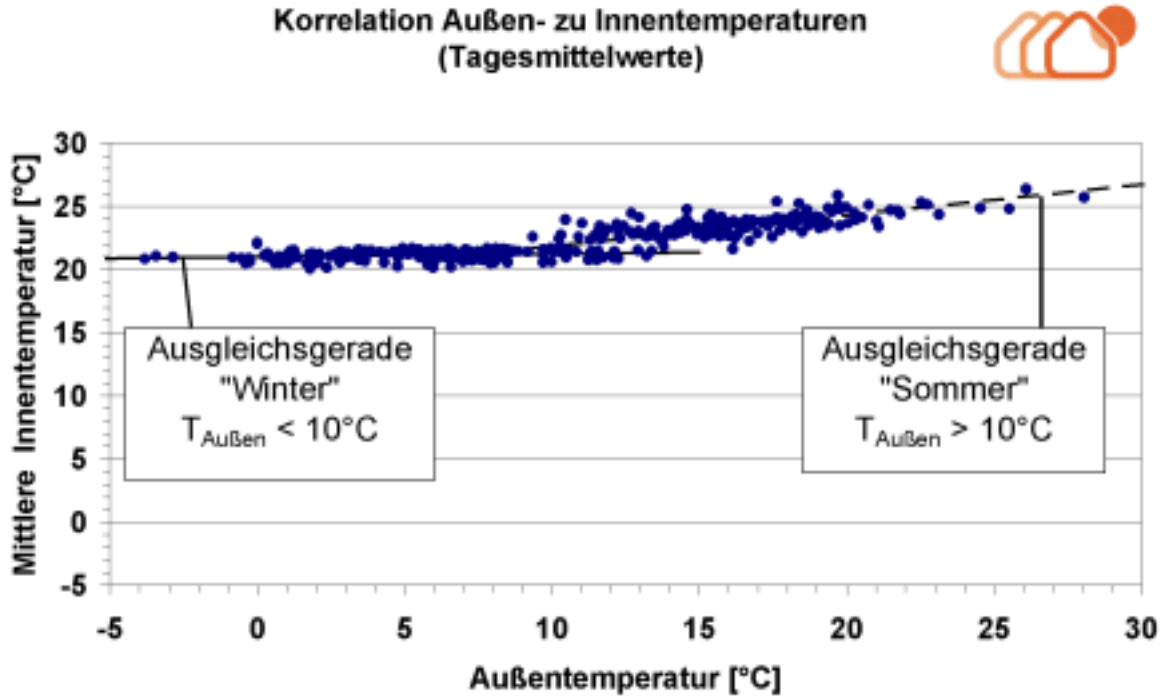


Abbildung 19: Korrelation zwischen Außentemperatur und Raumlufttemperatur (Tagesmittelwerte) im ersten Messjahr (nach [Peper 2001]).

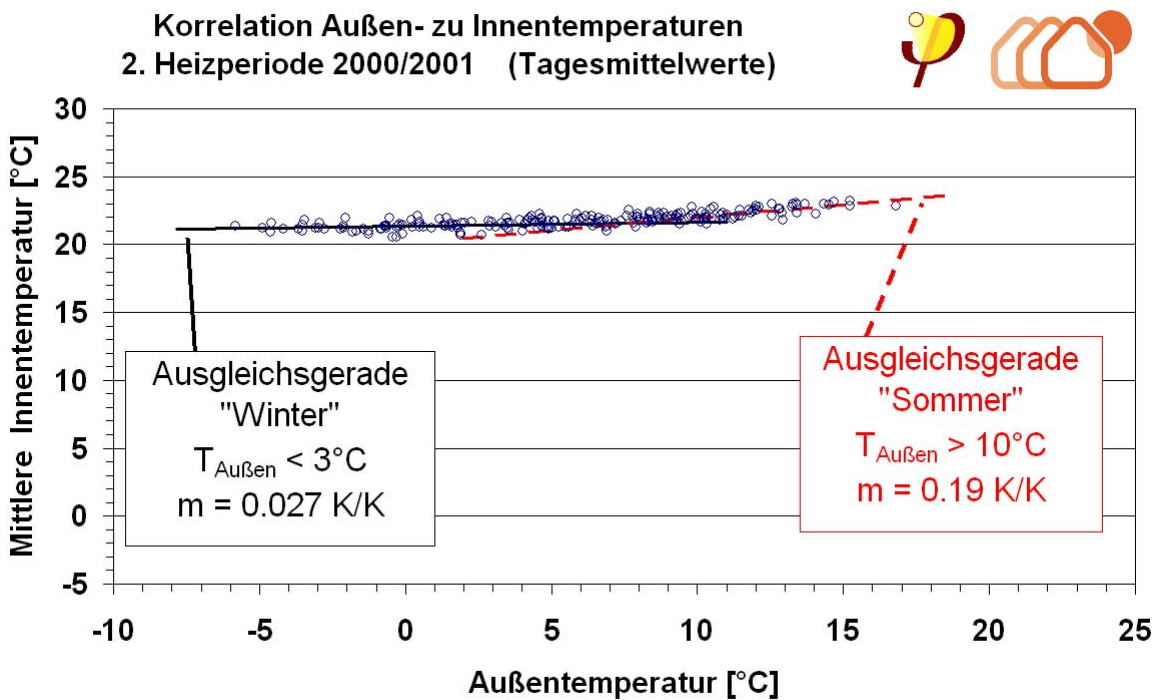


Abbildung 20: Korrelation zwischen Außentemperatur und Raumlufttemperatur (Tagesmittelwerte) im zweiten Messjahr (nach Messdaten aus CEPHEUS neu erstellt).



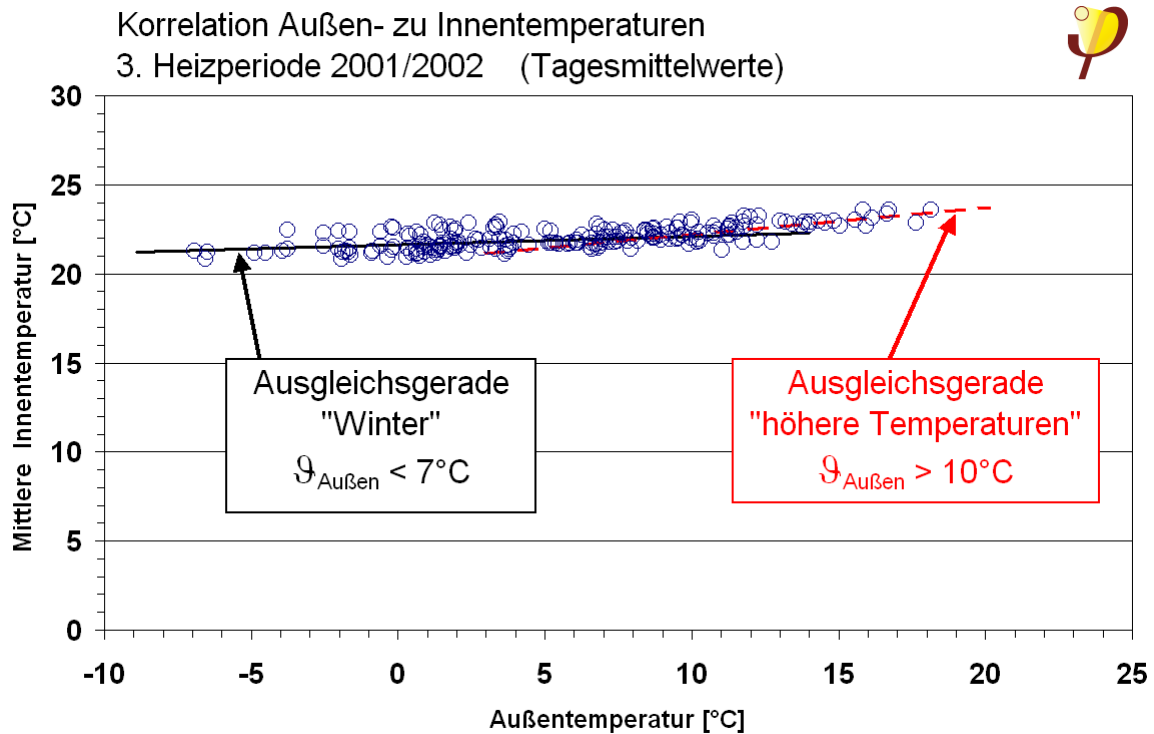


Abbildung 21: Korrelation zwischen Außentemperatur und Raumlufttemperatur (Tagesmittelwerte) der 30 dauerhaft bewohnten Häuser in der 3. Heizperiode (01.10.2001 bis 30.04.2002). Dargestellt sind die Ausgleichsgeraden für Außentemperaturen unter 7 °C und über 10 °C.

Bei der Untersuchung der Korrelation zwischen Raumlufttemperaturen der bewohnten Passivhäuser und den Außenlufttemperaturen zeigt sich im dritten Jahr (Abbildung 21) eine nur sehr schwache Abhängigkeit für Temperaturen unter +7 °C. Der Temperaturanstieg pro Kelvin Temperaturerhöhung der Außenluft beträgt 0.04 K. Im Winter 1999/2000 lag er mit 0.02 K deutlich niedriger [Peper 2001]. Die Ursache für die stärkere Abhängigkeit liegt allerdings nicht in niedrigeren Temperaturen im Lastfall (drei Tage mit tagesmittleren Außentemperaturen um – 7 °C), bei dem die Innentemperaturen immer noch bei 21 °C liegen, sondern in höheren Temperaturen in den wärmeren Zeiträumen.

Abbildung 22 zeigt den Verlauf von Außen- und Innentemperatur sowie der mittleren täglichen Heizleistung aller bewohnten Häuser in der dritten Heizperiode. Einen Eindruck von der sehr großen Streuung der Einzelwerte für die 30 individuellen Häuser vermittelt Abbildung 23. Zu nahezu allen Zeiten gibt es Häuser, in denen nicht geheizt wird. Dementsprechend sind die individuellen Heizleistungen im Maximum oft höher als der Mittelwert. Werte bis zu 13.6 W/m<sup>2</sup> werden zu verschiedenen Zeitpunkten von verschiedenen Häusern erreicht. Dies ist eine Folge von sehr individuell unterschiedlichen Bedienung der Heizung. Einige Fälle mit verschiedener Charakteristik werden wir im Folgenden behandeln.

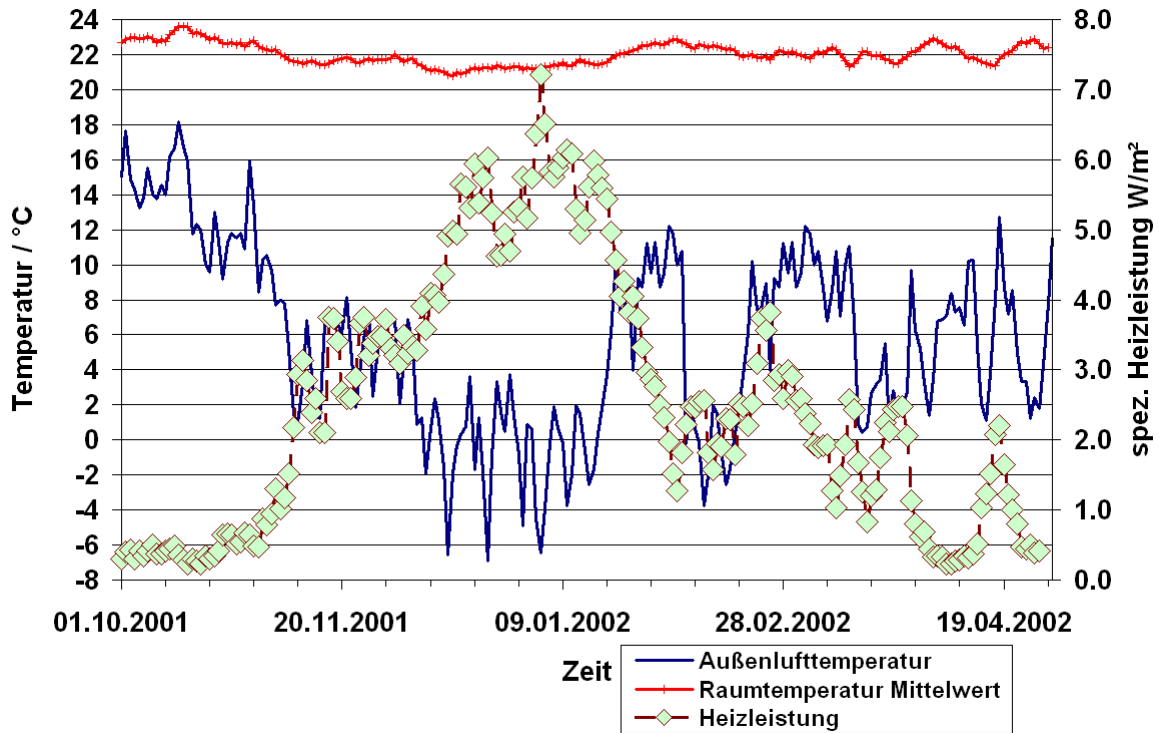


Abbildung 22: Zeitverlauf von Außen- und Innentemperatur sowie der mittleren Heizleistung in allen bewohnten Häusern in der 3. Heizperiode Hannover-Kronsberg.

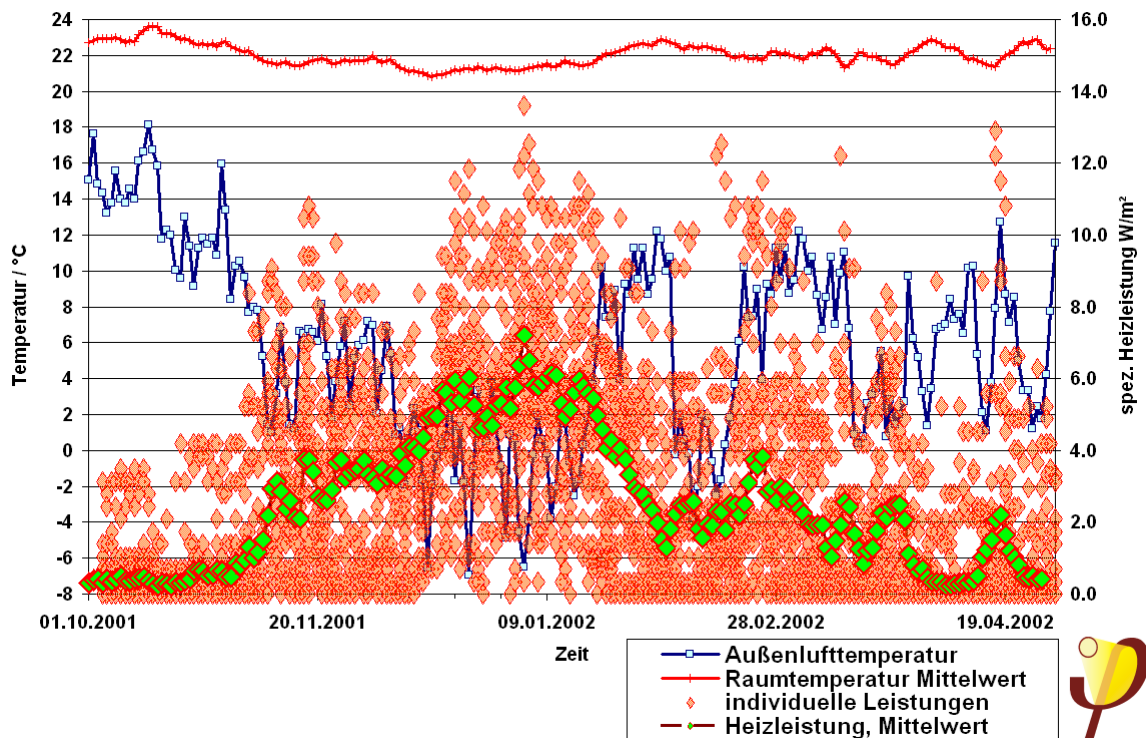


Abbildung 23: wie Abbildung 22, jedoch zusätzlich mit individuellen Heizleistungen in bewohnten Häusern (3. Heizperiode Hannover-Kronsberg); die Einzelwerte streuen in großem Umfang. Eine Maximalleistung von im Tagesmittel 13.6 W/m² tritt in einzelnen Häusern auf (die Leistung wird an der rechten Ordinatenkala abgelesen).

### 3.3.1 Sehr sparsamer Heizer

Abbildung 24 zeigt den Innentemperaturverlauf und die Heizleistungen für ein (bewohntes) Haus, das nur ausgesprochen sparsam beheizt wird. Die Bewohner tolerieren offenbar Innentemperaturen knapp oberhalb von 18°C; die dazu eingesetzten Heizleistungen liegen durchgängig um 2 W/m<sup>2</sup>, die Spitzenwerte von nur 3.5 W/m<sup>2</sup> werden an zwei einzelnen Tagen zu Beginn und am Ende der Heizperiode angenommen. Abbildung 25 zeigt, dass die in diesem Individualhaus vorkommenden Leistungen weit unter den rechnerischen Werten der Heizgerade liegen. Dieses Beispiel zeigt, dass Passivhäuser auch krisensicher immer noch erträglich warm gehalten werden können.

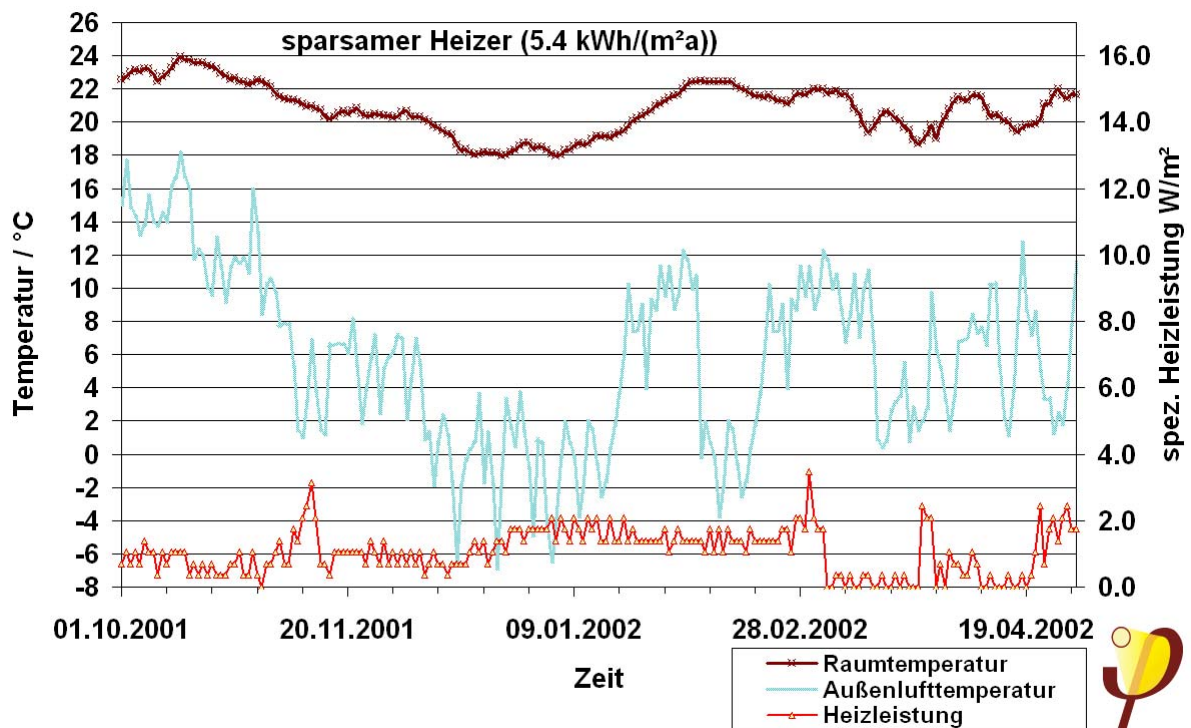


Abbildung 24: Ein sehr sparsam beheiztes Haus: Mit einer maximalen Heizleistung von 3.5 W/m<sup>2</sup> und einem Gesamtverbrauch von 5.4 kWh/(m<sup>2</sup>a) wird die Raumtemperatur von diesen Bewohnern immer über 18 °C, im Durchschnitt bei 20.3 °C gehalten.

Kronsberg:Tagesmittlere Heizleistung über der Außentemperatur (3.Heizperiode: 2001/2002)  
Haus mit sehr sparsamer Heizung

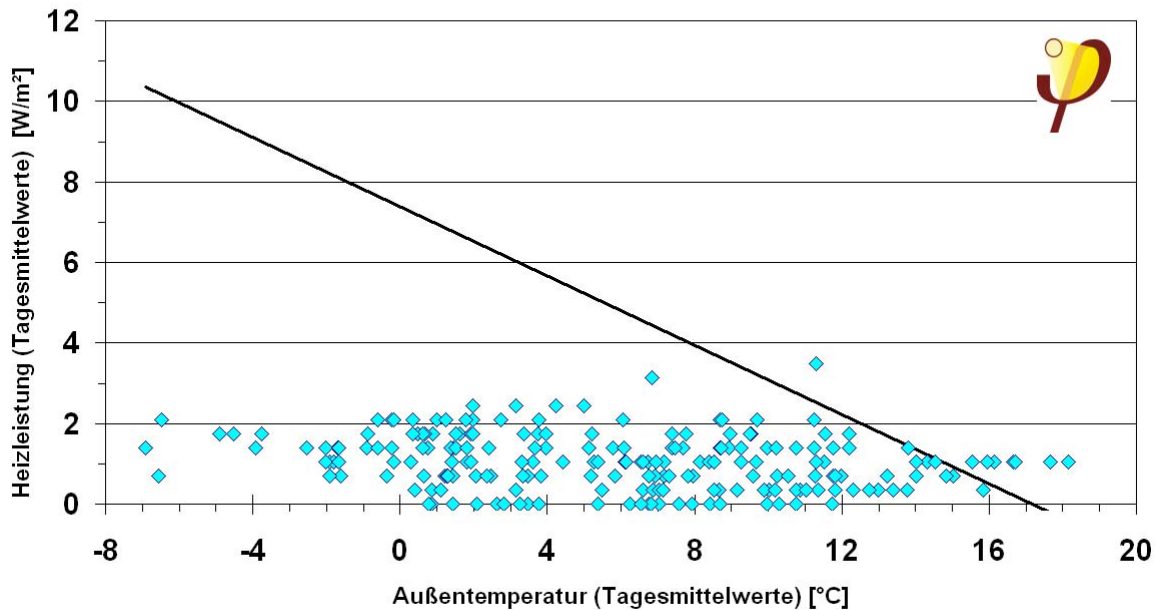


Abbildung 25: Einordnen der Werte für die Heizleistung beim sehr sparsam beheizten Haus in die Heizkurve: Trotz hoher verfügbarer Leistung wird diese nicht eingesetzt. Die beiden höchsten Leistungsdurchschnittswerte treten am Anfang und am Ende der Heizperiode auf und sind vermutlich durch die Bedienung bedingt.

### 3.3.2 Gleichmäßiges Heizleistung

In dem in Abbildung 26 dargestellten Fall wird das individuelle Haus bis Mitte Januar sehr gleichmäßig mit einer nahezu konstanten Leistung von um  $6 \text{ W/m}^2$  beheizt. Dadurch ergeben sich schwankende Innenraumtemperaturen auf einem Niveau über  $23 \text{ °C}$ , es herrschen also bereits relative hohe Ansprüche an das Temperaturniveau. Die maximale Heizlast liegt hier um etwa  $6.4 \text{ W/m}^2$ , auch diese Wert ist wesentlich geringer als die rechnerisch ermittelte maximale Auslegungsheizlast. Die Temperatur geht nicht unter  $21.5 \text{ °C}$  zurück, letzteres offenbar an einem Tag zu Beginn der Heizperiode, als das Zuluftheizregister noch nicht freigegeben war. Am Tag mit der niedrigsten Außentemperatur liegt die Raumtemperatur bei  $22.6 \text{ °C}$ .

Ein solcher Betrieb der Heizung ohne durch die Temperaturabweichung geregelte Wärmezufuhr ist eigentlich nicht zu empfehlen. In „normalen“ Gebäuden würden hierbei relative häufig ziemlich hohe Abweichungen zwischen Soll- und Istwert resultieren. Auf Grund der hohen thermischen Trägheit von Passivhäusern ist eine solche ungünstige Betriebsweise allerdings nicht mit empfindlichen Komforteinbußen verbunden.

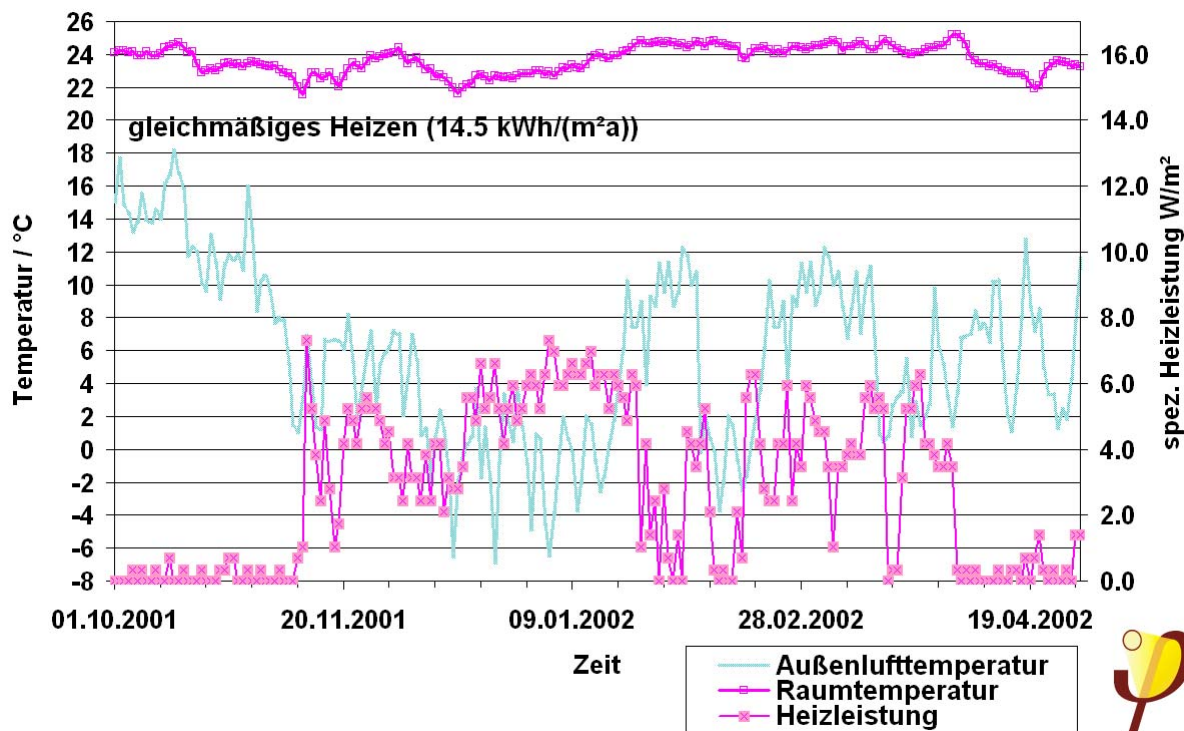


Abbildung 26: Ein gleichmäßig mit Heizleistung beaufschlagtes Haus: Mit einer maximalen Heizleistung von 6.4 W/m<sup>2</sup> und einem Gesamtverbrauch von 14.5 kWh/(m<sup>2</sup>a) wird die Raumtemperatur immer über 21.5 °C, im Durchschnitt bei 23.5 °C gehalten.

### 3.3.3 Häuser mit Leistungsspitzen

Für die folgende Diskussion haben wir die beiden Häuser mit den höchsten gemessenen Leistungsspitzen herausgesucht.

In Abbildung 27 sind zwei derartige Leistungsspitzen erkennbar, die bis an 13.5 W/m<sup>2</sup> herankommen. Letzterer Wert ist mit der Anlage gerade noch erreichbar, wenn die Lüftungsanlage auf maximalen Volumenstrom (140 m<sup>3</sup>/h) gestellt wird und das Heizregister auf 55 °C nachheizt. Gerade in der ersten Phase mit hoher Leistung ist die Ursache gut erkennbar: Das Haus wird bei etwa gleichbleibenden Außentemperaturen (bei 7 °C) von 22 °C auf 23 °C aufgeheizt. In der zweiten Phase, in welcher die höheren Leistungen länger anhalten, wird sogar ein Endtemperaturniveau von 24 °C erreicht. Außerhalb dieser Leistungsspitzen sind die Heizleistungen bei diesem Haus eher durchschnittlich. Auch während der Aufheizvorgänge wird die verfügbare Maximalleistung nicht dauerhaft, sondern nur an einem Tag benötigt. Dies zeigt, dass das System offenbar über ausreichende Leistungsreserven verfügt.

Auch in Abbildung 28 sind ausgesprochene Aufheizphasen zu erkennen, welche bis auf die erste zu ganz anderen Zeiten stattfinden als im vorausgehend behandelten Fall. In der letzten dieser Aufheizphasen (schon nach dem Ende der eigentlichen Heizperiode) wird eine Temperaturerhöhung von 21.6 auf 24 °C erreicht, während in den zwei Wochen davor überhaupt nicht geheizt worden war; offenbar hatten die Nutzer das System bereits abgestellt, wollten dann aber in einem auftretenden bewölkten Zeitraum die allmählich absinkenden Temperaturen wieder anheben.



Auch ein solches Vorgehen funktioniert im Passivhaus; es führt auf nahezu die gleichen Heizwärmeverbrauchswerte wie ein gleichmäßiges Beheizen, allerdings treten zeitweise höhere Heizleistungen auf.

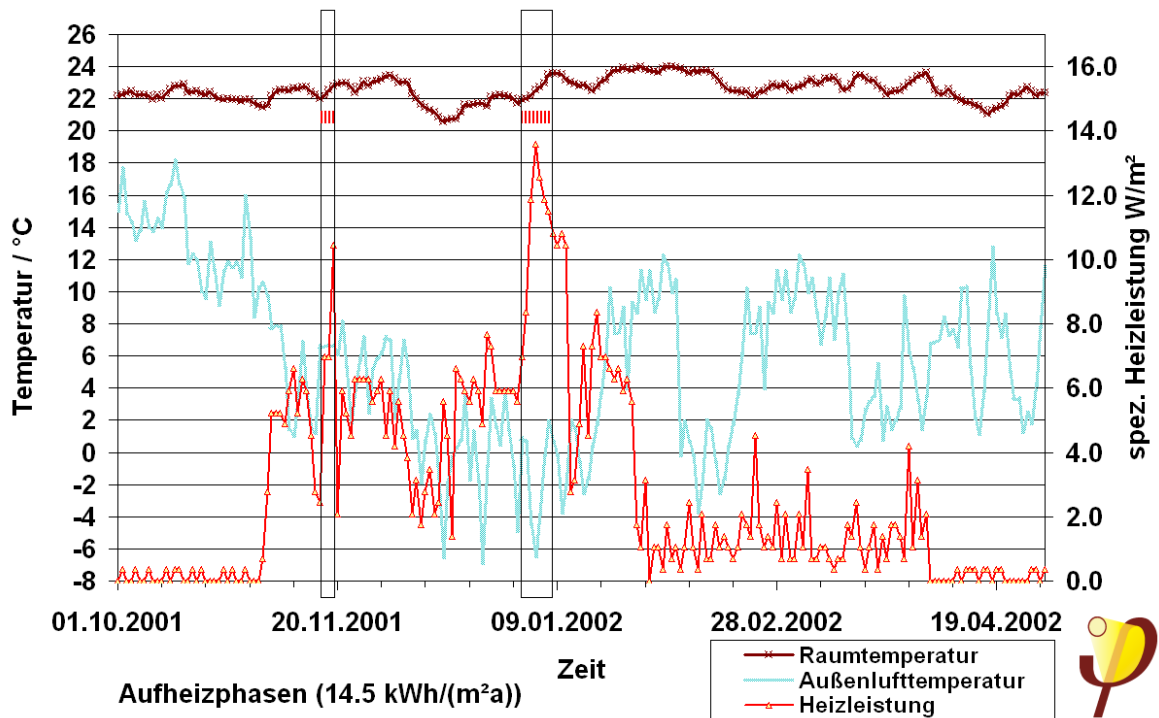


Abbildung 27: Haus mit zwei ausgeprägten Aufheizphasen: In zwei Phasen mit maximalen Heizleistungen von bis zu  $13.5 \text{ W/m}^2$  wird die Temperatur im Haus um jeweils 1 bzw. 2 K erhöht. Der Gesamtverbrauch liegt mit  $14.5 \text{ kWh/(m}^2\text{a)}$  im Mittelfeld.

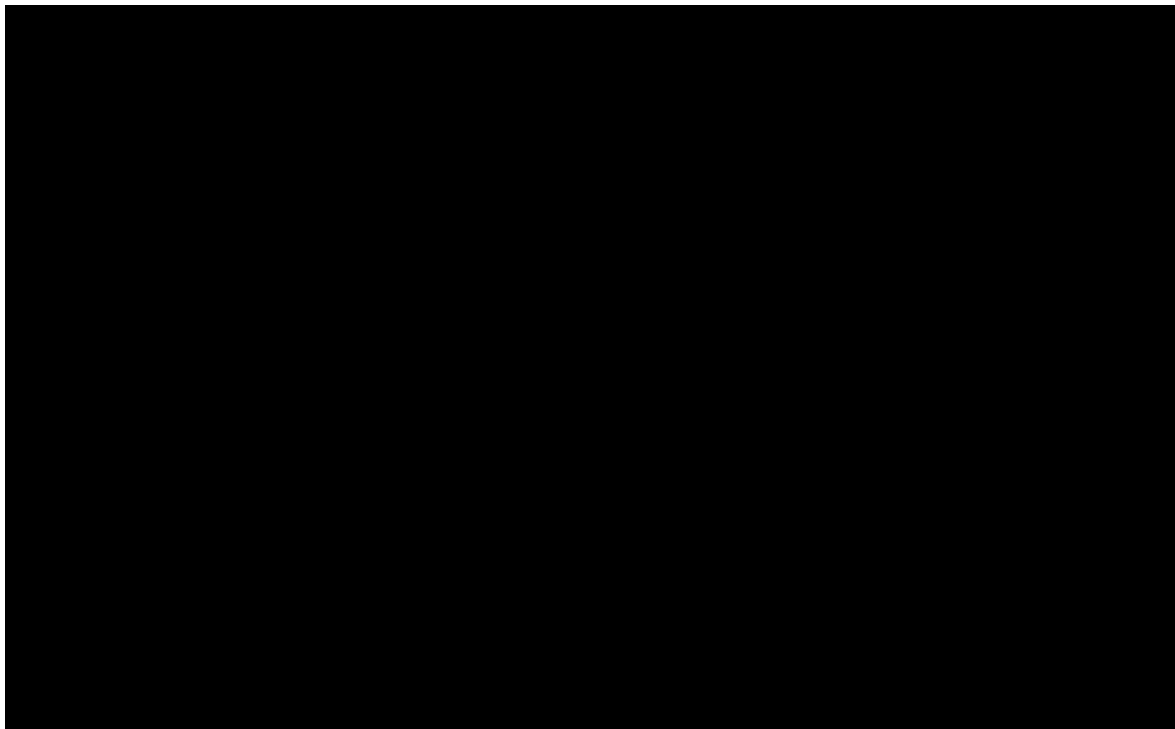


Abbildung 28: Haus mit vier ausgeprägten Aufheizphasen: In den Heizschüben maximale Heizleistungen von bis zu  $13 \text{ W/m}^2$  erreicht.



### 3.3.4 Haus mit großzügiger Beheizung

Abbildung 29 zeigt den Zeitverlauf bei einem durchschnittlich auf nahe 24 °C beheizten Haus; diese Temperatur war auch am kältesten Tag zu halten; ein Temperaturrückgang vom 11. bis zum 16.12.2001 ist nicht auf den Rückgang der Außentemperaturen, sondern auf nicht angeforderte Heizleistung in diesem Zeitraum zurückzuführen (nur um 4 W/m<sup>2</sup>). Ein ähnlicher Vorgang wiederholt sich zwischen 12.02.2002 und 19.02.2002. Wie beim zuletzt behandelten Fall läuft das System in den jeweils folgenden Tagen mit höherer Leistung (hier maximal um 12 W/m<sup>2</sup>).

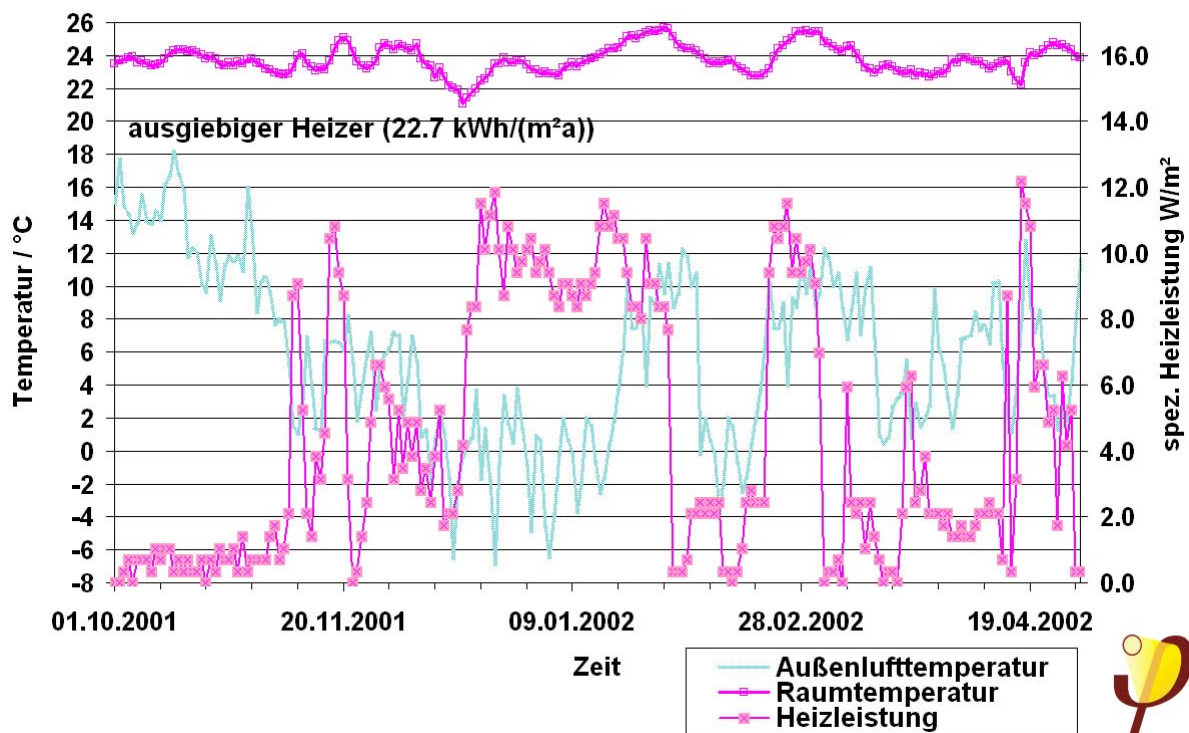


Abbildung 29: Großzügig beheiztes Haus mit hohen Raumtemperaturen (im Durchschnitt 1.11. bis 31.3.2002 bei 23.7 °C).

Abbildung 30 zeigt, dass das Heizverhalten in diesem Fall mit der Heizkurve nicht mehr viel Gemeinsamkeit hat. Höchstleistungen von um 12 W/m<sup>2</sup> treten bei Außentemperaturen von -7, -1, 2, 4, 8 und 13 °C auf. Im vorliegenden Fall wird dabei die verfügbare Leistung des Systems aber noch nicht vollständig genutzt; die insgesamt sehr hohen Innentemperaturen führen erwartungsgemäß zu einem relativ hohen Jahreheizwärmeverbrauch von 22.7 kWh/(m<sup>2</sup>a), der aber im Vergleich zu herkömmlichen Gebäuden und selbst zu Niedrigenergiehäusern immer noch extrem gering ist.

Die zuletzt behandelten Fälle machen deutlich, dass eine Analyse von Heizkurven in individuellen Wohnungen manchmal keine zuverlässige Aussage über die thermische Qualität des Gebäudes erlauben, da die Ergebnisse außer vom Gebäude sehr stark vom speziellen Nutzerverhalten abhängig sein können. Erst nach einer Mittelwertbildung über eine statistisch ausreichend große Zahl von Nutzern fallen die

zufälligen nutzungsabhängigen Schwankungen heraus. Erst damit wird auf empirischer Basis eine Überprüfung der Aussagen zum Gebäude- und Anlagenverhalten möglich. Die individuellen Messwerte sind aber geeignet, den Einflussbereich nutzerbedingter instationärer Heizvorgänge einzuschätzen.

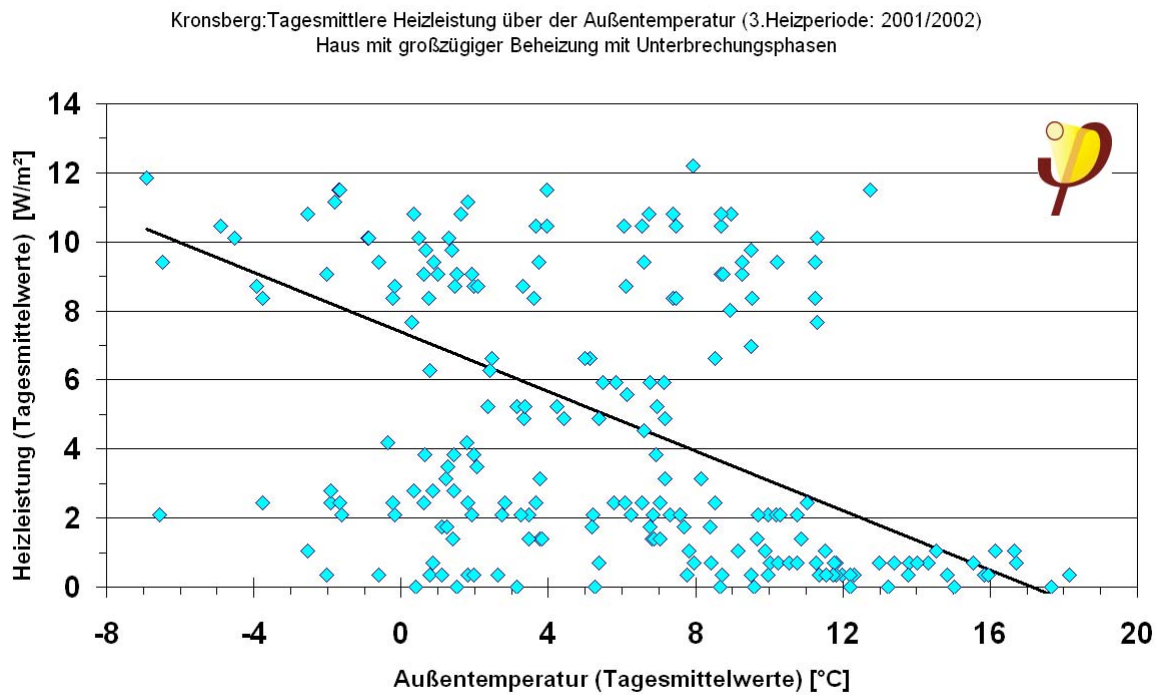


Abbildung 30: Einordnung in die Heizkurve für das großzügig beheizte Haus.

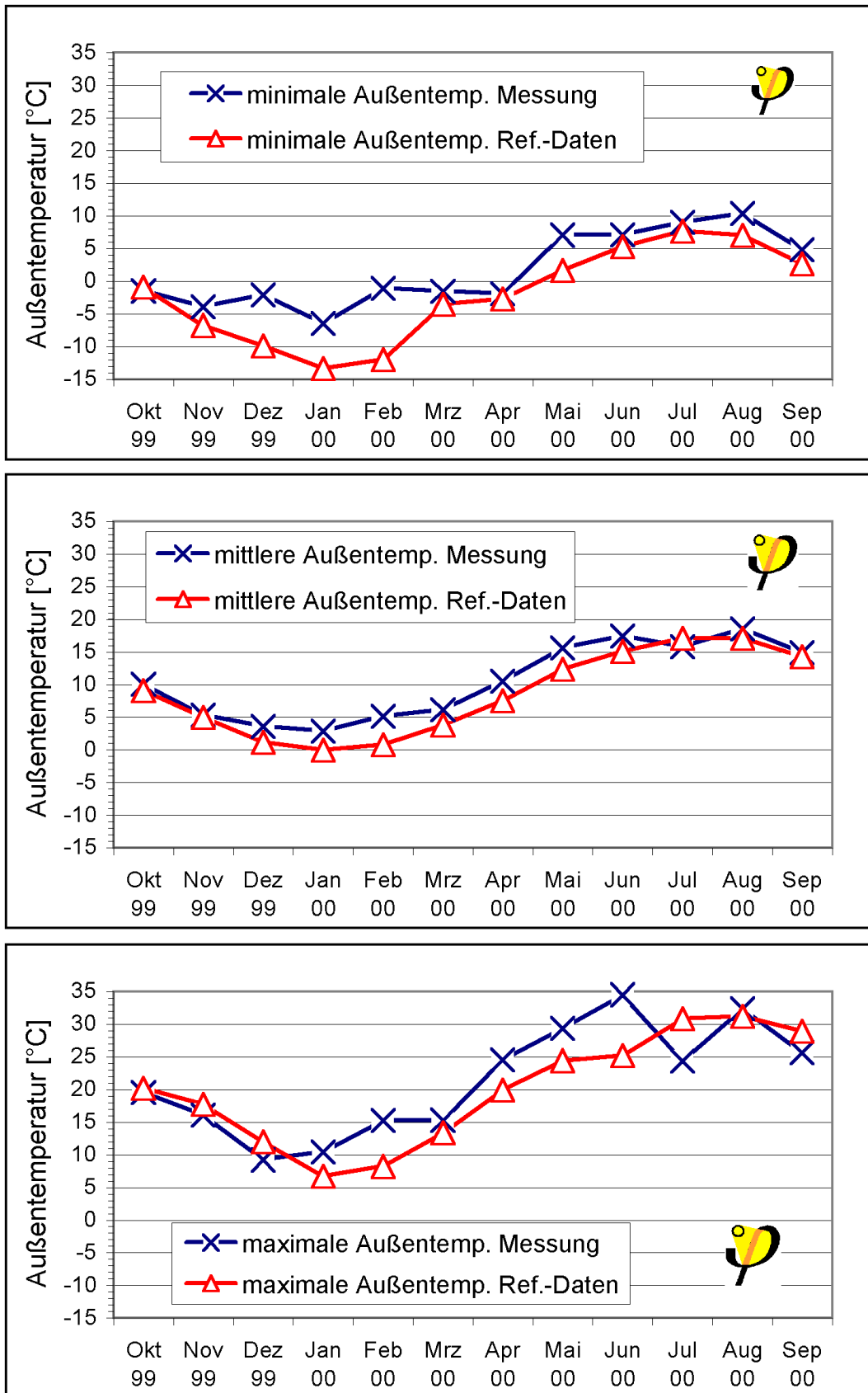


Abbildung 31: Vergleich der Wetterdaten des ersten Messjahres (minimale, mittlere und maximale Temperaturen als Monatswerte aus Stundendaten) zwischen den Messwerten und dem Klimadatensatz, welche der Simulation [Schnieders 98] bei der Projektierung zugrunde lag (aus [Peper 2001]).

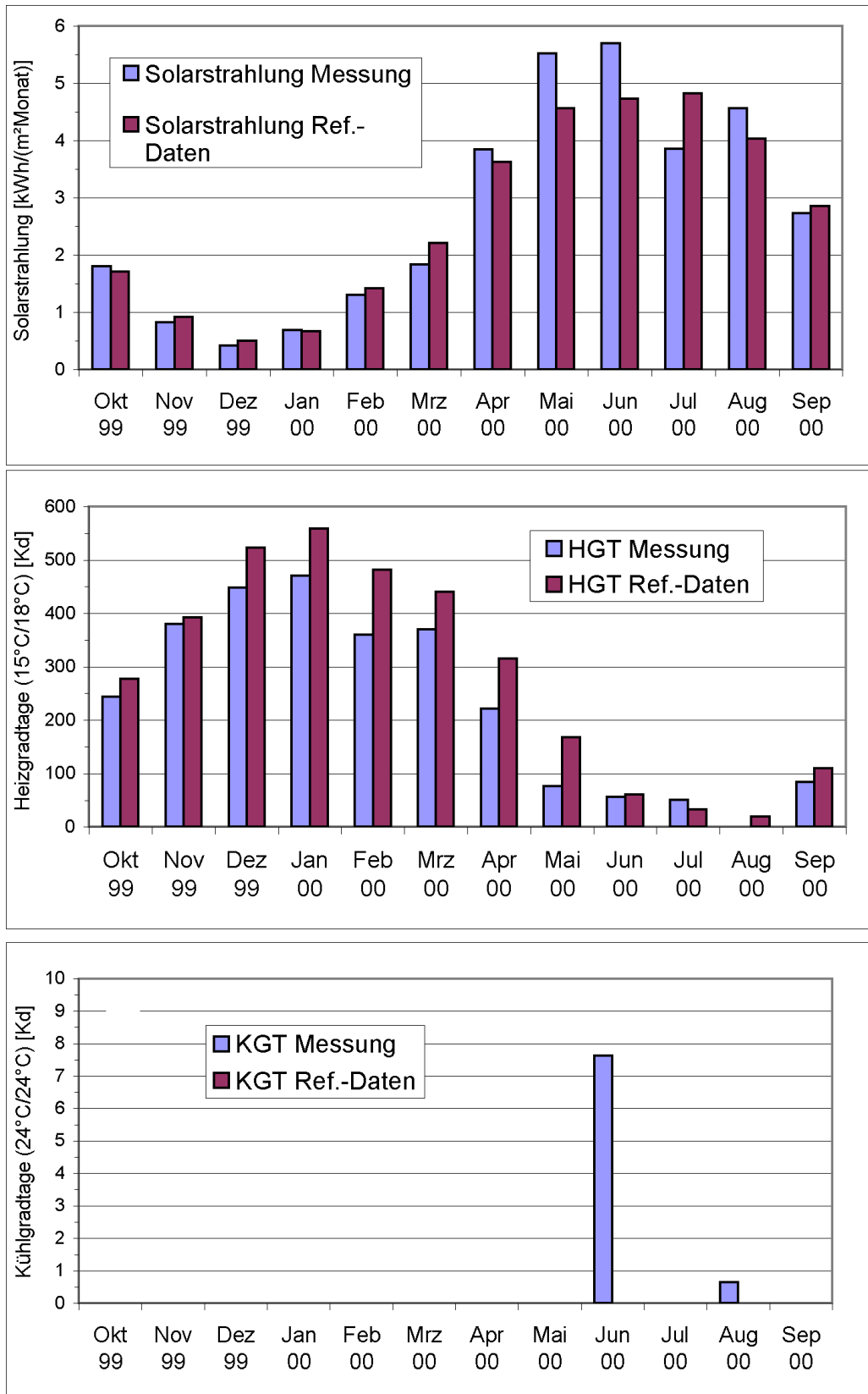


Abbildung 32: Vergleich der Solarstrahlung sowie der Heiz- (HGT) und Kühlgradtage (KGT) (HGT: Heizgrenztemperatur 15 °C, Innentemperatur 18 °C, KGT: Kühlgrenztemperatur 24 °C, Innentemperatur 24 °C) (Monatswerte aus Tagesmittelwerten) zwischen Messungen im ersten Betriebsjahr und dem bei der Simulation verwendeten Referenzklima (aus [Peper 2001]).

### 3.4 DYNBIL-Modell des Reihenendhauses Hannover

Für die Validierung der Heizlastfälle wurde ein 7-Zonen-Modell eines Reihenhauses der Passivhaussiedlung Hannover-Kronsberg zur Untersuchung der hier gestellten Fragen erweitert. Abbildung 33 zeigt die Zonenaufteilung: Der gesamte im offenen Luftverbund stehende Bereich des Erdgeschosses bildet Zone 1, das (kleine) eingeschlossene Gäste-WC mit Abluft im EG Zone 2, Flure in EG, OG und das Treppenhaus Zone 3, die südliche gelegenen Kinderzimmer im OG (nur optional geteilt) Zone 4, das Schlafzimmer im OG (nur optional geteilt) Zone 5 und das Bad (Abluft, innenliegend im OG) Zone 6. Der nichtausgebaute Dachraum wird als Zone 7 implementiert.



Abbildung 33: Grundriss des Reihenendhauses - Zonenaufteilung für das dynamische Simulationsmodell (ergänzt auf Basis von [Schnieders 1998]).

Für den Basisfall verwenden wir das *Reihenendhaus der Bauart "Jangster de Lux"*, da für diesen Fall die größte Heizleistung erforderlich wird. Verwendet wurden Modelle der Bauteile, wie sie im realisierten Gebäude vorhanden sind.

Die Lüftung wird durch eine Lüftungsmatrix abgebildet (Tabelle 3). Dabei wird für den Wärmeübertrager ein weiterer Modellknoten (als Z8 bezeichnet) verwendet. In den Räume besteht außerdem ein Infiltrationsluftwechsel durch verbleibende Undichtheiten der Hülle; sein Wert wird durch  $n_{inf}$  gekennzeichnet.

**Tabelle 3 Lüftungsmatrix des Gebäudemodells; Z bezeichnet Zone, R Reservoire**

von nach	R0	Z1	Z2	Z3	Z4	Z5	Z6	Z7	Z8
R0	0	$V_1 \cdot n_{inf}$	$V_2 \cdot n_{inf}$	$V_3 \cdot n_{inf}$	$V_4 \cdot n_{inf}$	$V_5 \cdot n_{inf}$	$V_6 \cdot n_{inf}$	$V_7 \cdot n_{inf}$	$n_{Anl} \cdot V \cdot (1/\eta_{WRG}-1)$
Z1	$V_1 \cdot n_{inf}$	0	0	$2 \cdot V_{int}$	0	0	0	0	$0.5 \cdot V \cdot n_{Anl}$
Z2	$V_2 \cdot n_{inf}$	0	0	$0.25 \cdot V \cdot n_{Anl}$	0	0	0	0	0
Z3	$V_3 \cdot n_{inf}$	$0.125 \cdot V \cdot n_{Anl} + 2 \cdot V_{int}$	0	0	$0.25 \cdot V \cdot n_{Anl} + V_{int}$	$0.25 \cdot V \cdot n_{Anl} + V_{int}$	0	0	0
Z4	$V_4 \cdot n_{inf}$	0	0	$V_{int}$	0	0	0	0	$0.25 \cdot V \cdot n_{Anl}$
Z5	$V_5 \cdot n_{inf}$	0	0	$V_{int}$	0	0	0	0	$0.25 \cdot V \cdot n_{Anl}$
Z6	$V_6 \cdot n_{inf}$	0	0	$0.375 \cdot V \cdot n_{Anl}$	0	0	0	0	0
Z7	$V_7 \cdot n_{inf}$	0	0	0	0	0	0	0	0
Z8	$n_{Anl} \cdot V \cdot (1/\eta_{WRG}-1)$	$0.375 \cdot V \cdot n_{Anl}$	$0.25 \cdot V \cdot n_{Anl}$	0	0	0	$0.375 \cdot V \cdot n_{Anl}$	0	0

- mit:
- V: Summe der Luftvolumina der Zonen 1-6
  - $V_1$ - $V_7$ : Luftvolumen der Zonen 1-7
  - $V_{int}$ : interner Luftwechsel zwischen Zonen mit geöffneten Türen; ist entweder 0 oder, wie im Basisfall, 300 m³/h
  - $n_{inf}$ : Infiltrationsluftwechsel, im Basisfall 0.025 1/h
  - $n_{Anl}$ : Anlagen-Luftwechsel; im Basisfall 0.402 1/h
  - $\eta_{WRG}$ : Wärmebereitstellungsgrad des Wärmeübertragers, im Basisfall 80%

Zur Modellierung des Sommerbetriebes wird ein zusätzlicher Fensterlüftungsablaufplan verwendet. Im Modell werden Fenster im Sommer (d.h. in der Zeit zwischen 15.4. und 31.10.) ab einer mittleren Raumtemperatur von 23 °C geöffnet, oberhalb einer Temperatur von 25 °C im Raum bleiben die Fenster ständig ganz offen, sofern die Außentemperatur geringer ist als die Innentemperatur. Die Fensterlüftung führt zu Maximal 3600 m³/h im EG (Zone 1) und zu 792 bzw. 725 m³/h in den Zonen 4 bzw. 5. Mit dem modellierten Fensterlüftungsverhalten im Sommer werden die sommerlichen Innentemperaturen in etwa zwischen 23 und 24 °C stabilisiert. Das entspricht auch den durchschnittlichen Verhältnissen in den bewohnten Häusern, wengleich diese oft durch andere Maßnahmen erreicht werden (wie z.B. einem zusätzlichen Sonnenschutz, vgl. dazu [Peper 2002], dort



wurden diese Fragen detailliert untersucht). Da das Sommerklima hier nicht Gegenstand der Fragestellung ist, wird auf eine genauere Analyse der verschiedenen Möglichkeiten hier verzichtet. Allerdings muss auch für unsere Untersuchung ein annähernd adäquates Sommermodell verwendet werden; wenn der Winterbetrieb auch über die gesamte Sommerperiode fortgesetzt würde, ergeben sich nämlich sehr hohe Sommertemperaturen im Bereich von 30 °C. Wegen der langen Zeitkonstante der Gebäude würde sich dies bis in die Heizperiode hinein auswirken, wodurch auch die Ergebnisse für die Heizlast verfälscht würden.

Die internen Gewinne sind als Zeitfahrpläne für jede einzelne Zonen eingegeben. Beim Basismodell wurden die in Tabelle 4 dargestellten Leistungen verwendet. Gewinne aus der Abwärme von elektrischen Geräten oder Personen erscheinen hierbei positiv, zusätzliche Wärmeverluste (Feuchtigkeitsverdunstung aus Handtüchern, Blumen oder Wärmeabgabe an kalte Wasserleitungen / Spülkasten) negativ.

**Tabelle 4: Interne Wärmegewinne im Basisfall des verwendeten Modells**

Zone	von	Bis	Leistung [W]
1	0 Uhr	7 Uhr	-34.9
	7 Uhr	22 Uhr	188.2
	22 Uhr	24	-34.9
2	0 Uhr	24 Uhr	-1.6
3	0 Uhr	24 Uhr	0.0
4	0 Uhr	7 Uhr	172.9
	7 Uhr	22 Uhr	91.1
	22 Uhr	24	172.9
5	0 Uhr	7 Uhr	128.8
	7 Uhr	22 Uhr	-12.6
	22 Uhr	24	128.8
6	0 Uhr	24 Uhr	-5.5
7	0 Uhr	24 Uhr	50.0 (WW-Speicher)

Die hier angesetzten inneren Wärmequellen führen zu einer mittleren Quelleistung im gesamten Haus von 2.59 W/m<sup>2</sup>. Dies entspricht dem empirisch bestimmten Mittelwert in der Passivhaussiedlung [Peper 2002]. Der Wert liegt etwas höher als die Standardannahme im PHPP für die Projektierung von Passivhäusern (2.1 W/m<sup>2</sup>). Die Ursache liegt darin, dass nicht in allen Wohnungen besonders effiziente Hausgeräte eingesetzt wurden.

### 3.5 Simulation im Basisfall: Reihenendhaus als Passivhaus, wie gebaut

Für die DYNBIL-Simulation wird zunächst der Basisfall mit Raumluftolltemperaturen von 20 °C zugrundegelegt; verwendet wird der Referenzklimadatensatz nach dem Testreferenzjahr Frankfurt/M "DYNFFMB2".

Abbildung 34 zeigt, dass die Simulation unter diesen Bedingungen eine maximale tagesmittlere Heizlast von 7.6 W/m<sup>2</sup> ermittelt. Die zugehörige Heizkurve (Abbildung 35) zeigt den für Passivhäuser typischen Verlauf; das Maximum der Heizleistung wird nicht am kältesten Tag, sondern bereits bei mäßig niedrigen Außentemperaturen erreicht. Die Maximallast nach der Simulation liegt über den gemessenen Maximalwerten aus den drei Heizperioden, wenn man den Ausreißer in der ersten Heizperiode ausnimmt.

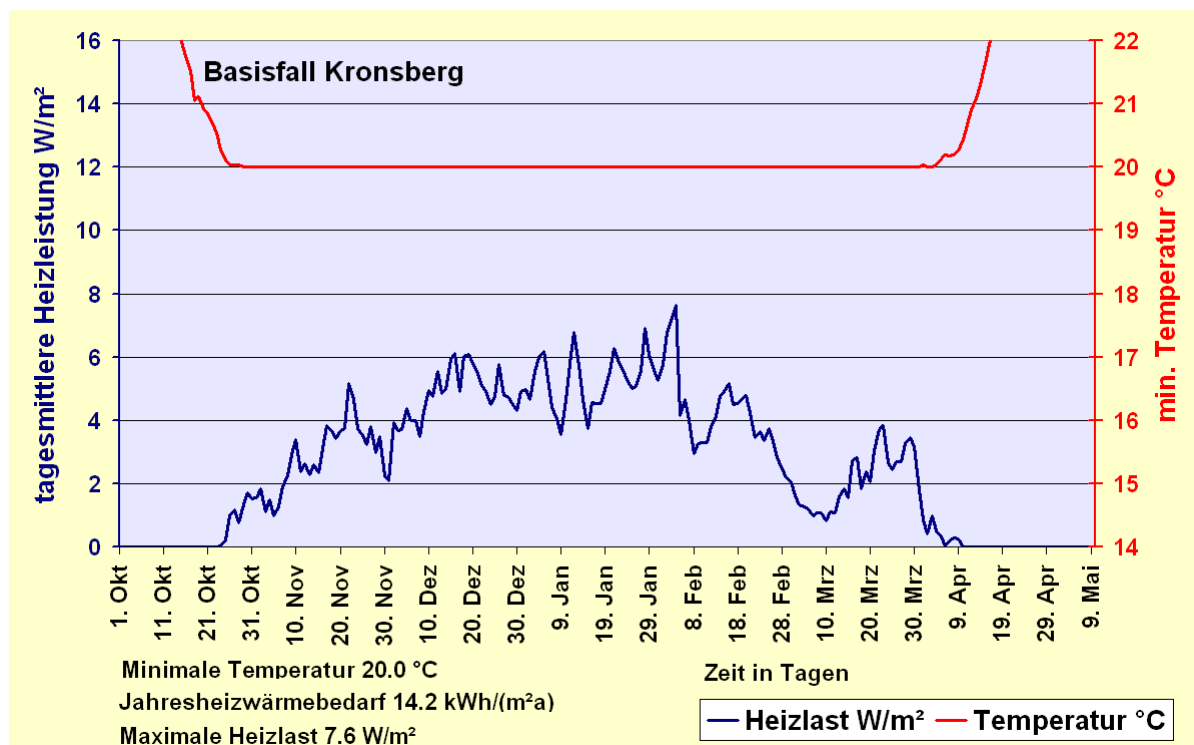


Abbildung 34: Zeitverlauf der tagesmittleren Heizleistung (unten, linke Achse) und der minimalen Innentemperatur im Basisfall der Simulation mit DYNBIL

Für einen Vergleich zwischen typisch empirisch aufgenommenen Heizleistungen und den Ergebnissen der Simulation haben wir in Abbildung 36 die Messwerte aus den acht Endhäusern der DYNBIL-Simulation dargestellt, immer noch mit dem Testreferenzjahr, allerdings mit einem Solltemperaturwert von 21.8 °C, wie es dem Durchschnitt der Raumtemperaturen in der Zeit vom 1.11.2001 bis 31.3.2002 entspricht. Die Messwerte zeigen tendenziell eine größere Streuung, dies ist auf das individuelle Heizverhalten zurückzuführen. Der Maximalwert der Simulation liegt um ca. 1.5 W/m<sup>2</sup> über dem der Messungen. Da die verfügbare Leistung deutlich höher ist, liegt dies nicht an einer Heizleistungsbeschränkung. Eine Ursache für die in der Praxis geringere Leistungsanforderung kann darin bestehen, dass an Tagen mit hohen Heizlasten (kalt bzw. Schneefall oder regnerisch) Personen eher im Haus bleiben und daher stärker zu den inneren Wärmegewinnen beitragen. Es kann sich

aber auch um eine systematische Modellabweichung bzw. um Auswirkungen des Standardklimatensatzes handeln. Jedenfalls liegen die mit DYNBIL berechneten Werte gegenüber den Messungen auf der sicheren Seite, wodurch die Gültigkeit der Schlussfolgerungen aus der Simulation nicht eingeschränkt wird.

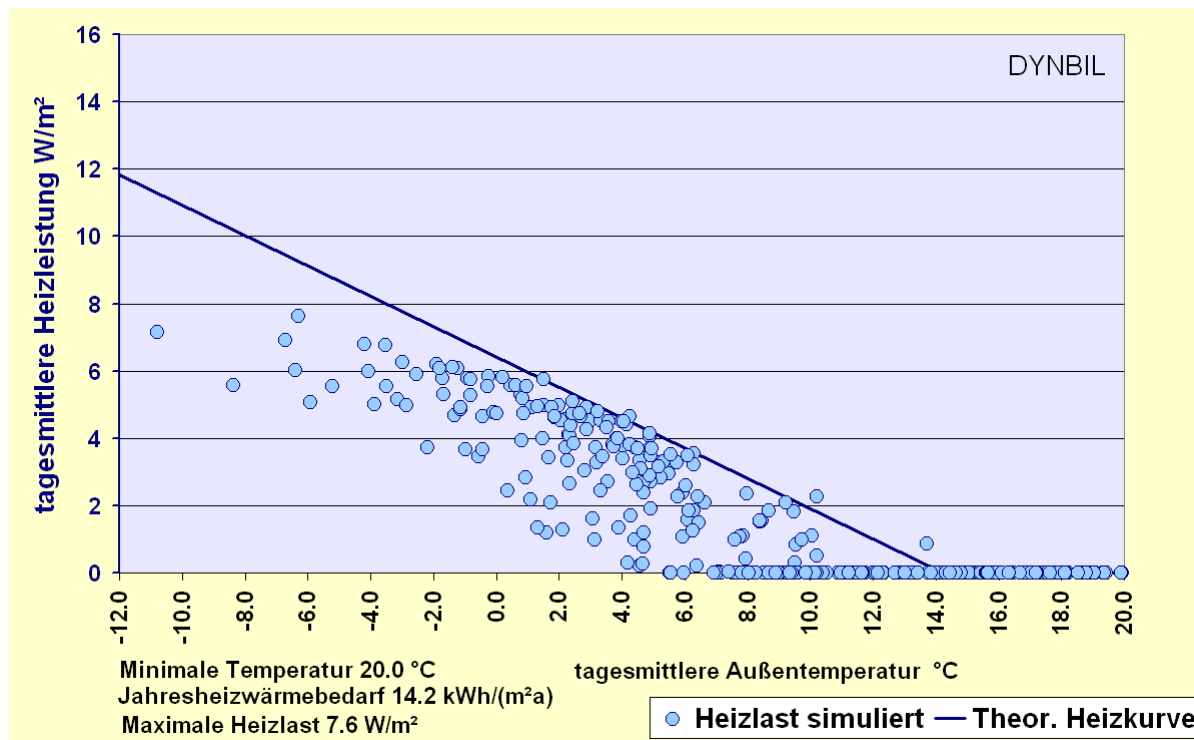


Abbildung 35: Heizkurve für den Basisfall der Simulation mit DYNBIL ( $\vartheta_{i,soll} = 20^\circ\text{C}$ )

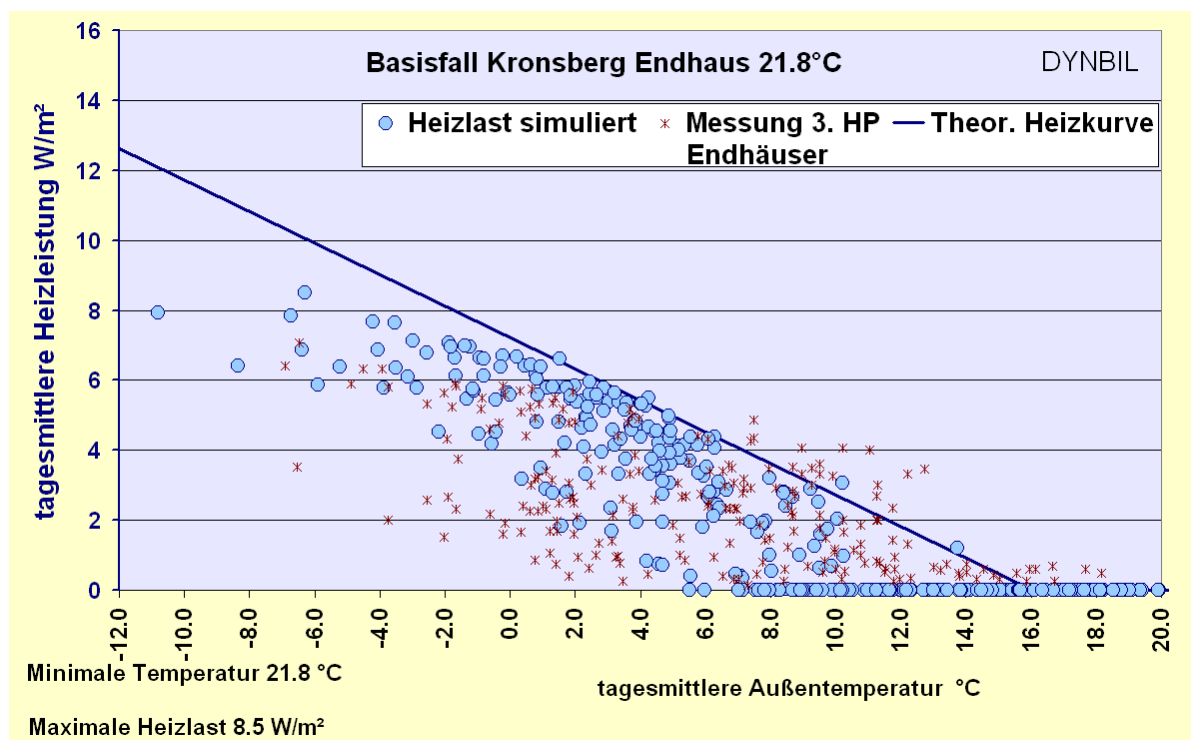


Abbildung 36: Vergleich Heizlasten nach der Simulation mit dem Referenzklimatensatz (ausgefüllte Kreise) für das Reihenendhaus bei 21.8 °C Solltemperatur und von Messwerten aus der dritten Heizperiode Hannover-Kronsberg (Wetter 2001/02; Durchschnitt der Endhäuser).

### 3.6 Simulation Reihenendhaus reduziert auf EnEV-Standard

Eine Vergleichsbasis für die bisher vorgestellten Mess- und Rechenwerte lässt sich gewinnen, indem die bauphysikalischen Daten der Gebäudehülle und die technischen Daten der Wohnungslüftung auf das Anforderungsniveau der Energieeinsparverordnung (EnEV 2002) zurückgesetzt werden. Das Haus verfügt dann nicht mehr über eine Wärmerückgewinnung, sondern wird über Fenster gelüftet; die Fenster sind nur noch mit einer Zweischeibenwärmeschutzverglasung ausgestattet und das Dämmniveau der Gebäudehülle wird deutlich reduziert. Die wesentlichen Kennzeichen des "Reihenendhauses nach EnEV" finden sich in Tabelle 5.

Tabelle 5: Kennwerte des Reihenendhauses, zurückgesetzt auf EnEV-Anforderungen

<b>Bauteil</b>	<b>U-Wert in W/m<sup>2</sup>K</b>	<b>Nutzfläche A<sub>N</sub></b>	165.16 m <sup>2</sup>
<b>Dach_EnEV</b>	0.33	<b>A/V</b>	0.63 m <sup>-1</sup>
<b>Fass_EnEV</b>	0.34	<b>Anforderung Q<sub>p</sub>"</b>	107.9 kWh/(m <sup>2</sup> a)
<b>Giebel_EnEV</b>	0.36	<b>Anlagen-AZ</b>	1.55
<b>Grund_EnEV</b>	0.64	<b>Anforderung q<sub>h</sub></b>	57.4 kWh/(m <sup>2</sup> a)
<b>Fenster</b>	1.26	bedeutet bei Bezug auf Wohnfläche	
<b>Lüftung</b>	Fensterlüftung	<b>q<sub>h</sub> Wohnfl.bezug</b>	79.3 kWh/(m <sup>2</sup> a)
Mit den verwendeten Gebäudedaten werden die Anforderungen der EnEV erfüllt.			

Für die DYNBIL-Berechnung wurden die gleichen internen Wärmequellen angesetzt wie beim Passivhaus (deutlich kleiner als nach rechnerischer Vorgabe bei der EnEV, vgl. [Feist 2001b]) und es wurde eine Raumluft Solltemperatur von 20 °C im Wohn-Schlaf- und Kinderzimmer sowie im Bad zu allen Zeiten verwendet (wie im Passivhausfall); die Raumtemperaturen der Simulation sind damit höher als der Ansatz 19 °C in der EnEV. Das Simulationsergebnis zeigt daher auch einen deutlich höheren Jahresheizwärmebedarf: Realistisch sind für einen solchen Baustandard 91.7 kWh/(m<sup>2</sup>a) zu erwarten - nahezu 60% mehr als nach der EnEV-Berechnung. Davon gehen 38% allein auf den geänderten Flächenbezug (die EnEV-Nutzfläche A<sub>N</sub> ist in diesem Fall um 38% größer als die Wohnfläche), die restlichen 22% sind durch die geringeren inneren Quellen und die höhere Raumluft Solltemperatur bedingt.

Abbildung 37 zeigt den zeitlichen Verlauf der tagesmittleren Heizleistung für die EnEV-Variante. Die maximale Heizleistung beträgt mit 32 W/m<sup>2</sup> das 4.2-fache des Wertes im Passivhaus (vgl. Abbildung 34); die Heizzeit erstreckt sich nun über den Zeitraum von Anfang Oktober bis Mitte Mai. Der Jahresheizwärmebedarf nach der DYNBIL-Simulation steigt aus diesem Grund sogar um das 6.4-fache gegenüber dem Passivhaus auf 91.7 kWh/(m<sup>2</sup>a).

In der Heizkurvendarstellung nach Abbildung 38 tritt der Unterschied zwischen Passivhaus und EnEV-Variante deutlich hervor. Die einzelnen Leistungen liegen beim EnEV-Haus sehr viel höher; die Werte fallen zwar ebenfalls von der theoretischen Heizgerade nach unten ab (sogar in absoluten Werten etwas mehr als beim Passivhaus), dies wirkt sich aber in Relation zu den hohen Wärmeverlusten nur wenig aus; die Einzelwerte für den EnEV-Fall liegen daher in der subjektiven Wahrnehmung näher an der zugehörigen Heizgeraden.

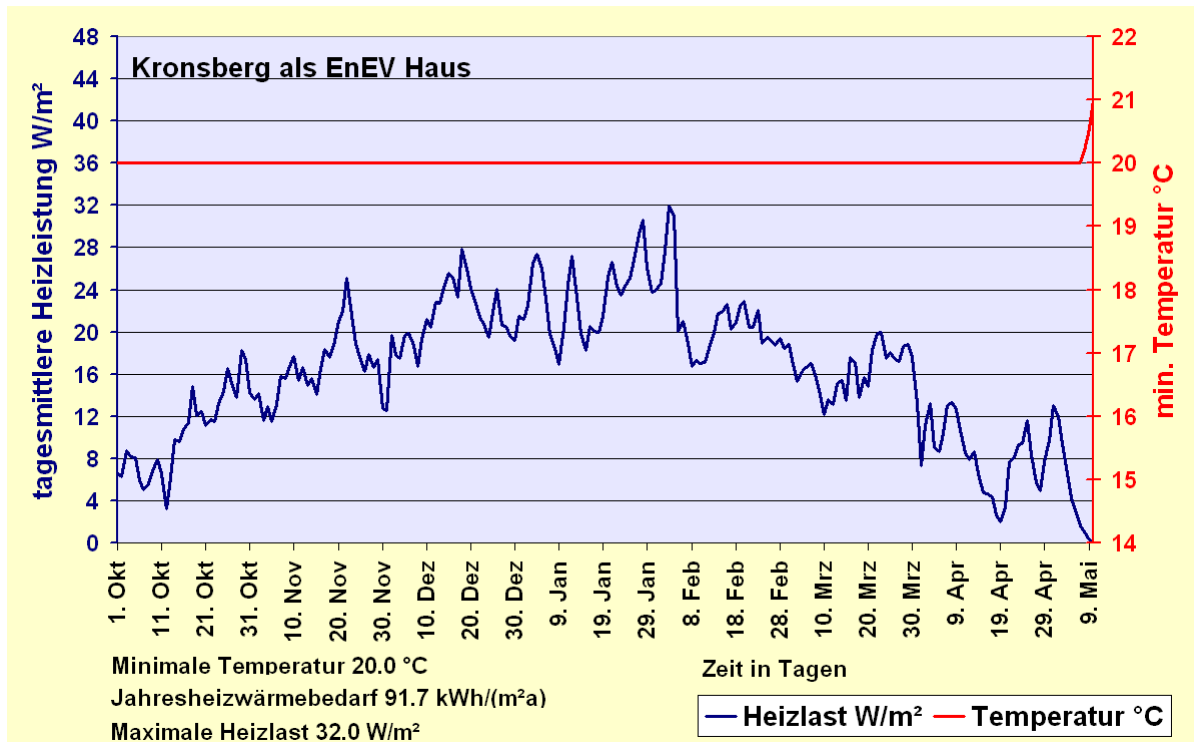


Abbildung 37: Zeitverlauf der Heizlast für die EnEV-Variante des Endhauses.

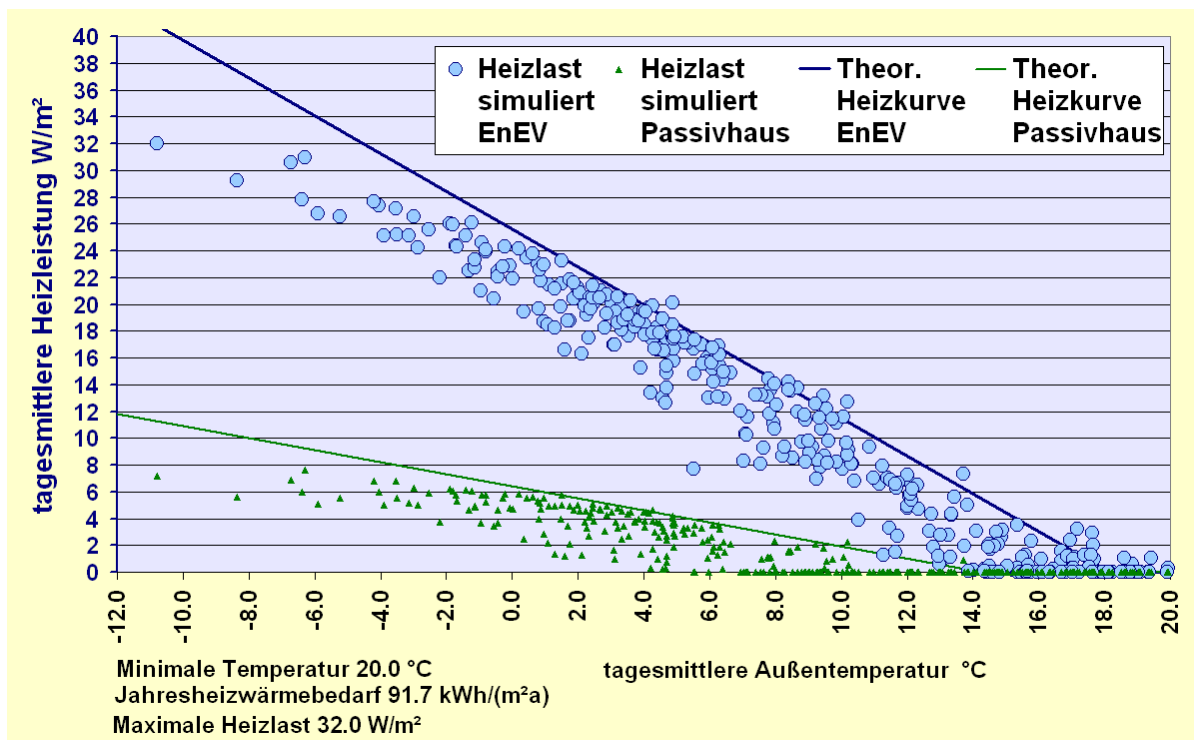


Abbildung 38: Heizkurve für die EnEV-Variante und das Passivhaus im Vergleich.

In den folgenden Abschnitten wird die Sensitivität der maximalen Heizlast auf verschiedene Einflüsse seitens des Klimas, der Nutzung und seitens Auslegungen des Systems getestet.

### 3.7 Heizungsunterbrechung für 14 Tage

Urlaubsbedingt oder durch Ausfall des Systems bzw. der Versorgung wird in diesem Sensitivitätstest davon ausgegangen, dass die Heizung für 14 Tage komplett unterbrochen wird. Als Zeitraum wird hier der 12. bis 26. Januar gewählt.

Abbildung 39 zeigt die Folgen im Basisfall Passivhaus: Die Temperatur fällt zunächst rasch auf etwa 17.5 °C, dann langsamer bis zu einem Minimalwert von 14.3 °C ab. Durch den geringen Wärmeverlust des Passivhauses ist der Temperaturabfall nicht dramatisch. Soll nach dem Wiedereinschalten die Temperatur schnell auf den Sollwert von 20 °C erhöht werden, so ergibt sich eine maximale Wiederanheizleistung von etwa 30 W/m<sup>2</sup> bzw. 3.6 kW insgesamt. Das vorhandene Luftherwärmungssystem kann davon etwa 1.6 kW aufbringen. Die "fehlenden" 2 kW sind bequem mit einem handelsüblichen Heizlüfter zu erbringen. Der gesamte zusätzliche Stromverbrauch für den Betrieb von Heizlüftern beim Wiederanheizen beträgt weniger als 57 kWh. Dies ist sowohl von den Kosten als auch bzgl. der ökologischen Auswirkungen im hier behandelten Notfall vertretbar. Abbildung 41 zeigt, dass sich auch in höherer zeitlicher Auflösung die operative Temperatur rasch in den komfortablen Bereich anheben lässt.

Abbildung 40 zeigt im Vergleich dazu die Auswirkungen bei der EnEV-Variante. Nun fallen die Temperaturen im Haus nach dem Abschalten der Heizung ziemlich rasch auf nur noch 12 °C, im weiteren Zeitverlauf auf unter 6 °C ab. Immerhin sinken die Temperaturen nicht unter den Gefrierpunkt, dies kann bei noch schlechter gedämmten Gebäuden durchaus vorkommen. Nach dem Wiedereinschalten soll der Sollwert von 20 °C rasch wieder erreicht werden, daraus ergibt sich eine maximale Wiederanheizleistung von etwa 100 W/m<sup>2</sup> bzw. 12 kW insgesamt. Diese Leistung entspricht in etwa der alten "Daumen-Auslegungsregel" bei schlecht gedämmten Gebäuden im Bestand. Die zunächst bestimmte maximale Heizlast für den EnEV-Fall lag bei 3.825 kW. Auch in diesem Fall wäre die "fehlende Leistung" von etwa 8 kW z.B. mit 4 Heizlüftern im Prinzip noch aus dem Netz beziehbar. Abbildung 42 zeigt den Verlauf der operativen Temperatur in diesem Fall. Da die gesamte Struktur sehr stark ausgekühlt ist, dauert es trotz hoher Leistung zwei Tage lang, bis eine operative Temperatur von 18 °C wieder erreicht wird.

Abbildung 43 zeigt den Passivhaushausfall, wenn man unterstellt, dass es über die Auslegungsleistung von 909 W überhaupt keine zusätzliche Leistungsreserve für das Wiederanheizen gibt. In diesem Fall würde es etwa 7 Tage dauern, um 18 °C wieder zu erreichen. Die notwendige zusätzliche Leistung beträgt aber nur etwa 2.7 kW und ist mit ein bis zwei Heizlüftern leicht aufzubringen; allein mit der überall vorhandenen Haushaltsausstattung lassen sich leicht mindestens 1000 W (Glühlampen, Backofen, Rotlichtlampe,...) aufsammeln, die gemäß Abbildung 45 und Abbildung 46 ausreichen, um in wenigen Stunden auch in diesem Extremfall akzeptable Bedingungen



zu schaffen. Abbildung 44 zeigt, dass es bei einer Auslegung der Wärmeverteilung und -übergabe in einem EnEV-Haus auf die dort ermittelte stationäre Höchstlast von 3825 W ebenfalls 7 Tage dauern würde, um das Haus wieder auf akzeptable Temperaturen von 18 °C zu bringen. Die notwendige zusätzliche Leistung beträgt nun allerdings etwa 8 kW. Dies dürfte nicht leicht zu improvisieren sein; für einen solchen Fall müssen einsatzfähige Heizgeräte bereitstehen oder das System muss die entsprechende Reserve aufweisen.

Die Analyse zeigt, dass es zwar richtig ist, dass das auf 1.6 kW begrenzte Passivhaus-Heizsystem wenig "Aufheizreserven" hat, dass dies aber aus zwei Gründen nicht bedeutend ist:

1. Wegen der sehr guten Dämmung fallen die Temperaturen gar nicht weit ab.
2. Die im extremen Fall möglicherweise "fehlende" Leistung liegt bei nur etwa 2 kW und kann bequem von einem, max. zwei Heizlüftern übernommen werden. Der entstehende Zusatzenergieverbrauch ist mit unter 60 kWh selbst in Relation zum schon sehr geringen Verbrauch eines Passivhauses vernachlässigbar (unter 1 kWh/(m<sup>2</sup>a)).

Bedeutender ist die erforderliche Wiederanheizleistung im Fall eines Gebäudes nach EnEV, weil dieses auch stärker auskühlt. Dies erklärt auch, warum die Frage der Wiederanheizleistung gerade in der gegenwärtigen Diskussion in der Heizungstechnik eine so große Rolle spielt: Bei Gebäuden mit schlechter Wärmedämmung ist immer der aktuelle Transmissionswärmeverlust maßgeblich und die Leistungsauslegung daher so hoch, dass die dann weit weniger bedeutenden Anheizleistungen von untergeordneter Bedeutung sind. Die bereits etwas besser gedämmten Häuser nach EnEV haben dagegen eine Anheizleistung, die in Relation zur stationären Heizlast bedeutend ist (nämlich sogar deutlich höher) und auch in der absoluten Höhe relevant ist. In Gebäuden mit EnEV-Standard kann außerdem bei Nichtbeheizung die Temperatur noch empfindlich absinken. Eine ausreichende Anheizleistung wird für solche Gebäude offenbar gebraucht und sie ist, wie schon erwähnt, auch nicht leicht durch Improvisation zu gewinnen. Bei dem noch weit besser gedämmten Passivhausstandard ist die Anheizleistung allerdings absolut gering, leicht improvisierbar und im Übrigen können die Temperaturen gar nicht so weit absinken, wie bei mäßigerer Wärmedämmung – d.h. im Passivhaus verliert das Thema Anheizleistung wieder an Bedeutung.

Eine Bemerkung zum Abschluss dieses sehr instationär definierten Falls: Es ist sicher angemessener, die Gebäude wenigstens auf einer gewissen Mindesttemperatur durchzuheizen als allein zum Zweck der Wiederanheizung die etwa dreifache Leistung verfügbar zu machen. Bei nicht sehr gut gedämmten Gebäuden ist das sogar dringend zu empfehlen, weil sonst sogar die Gefahr von Frostschäden besteht. Im Passivhaus ist sogar ein komplettes Durchheizen ökonomisch (und nicht nur wegen des besseren Komforts) ohne weiteres vertretbar, die zugehörigen „Mehrbetriebskosten“ sind vernachlässigbar.

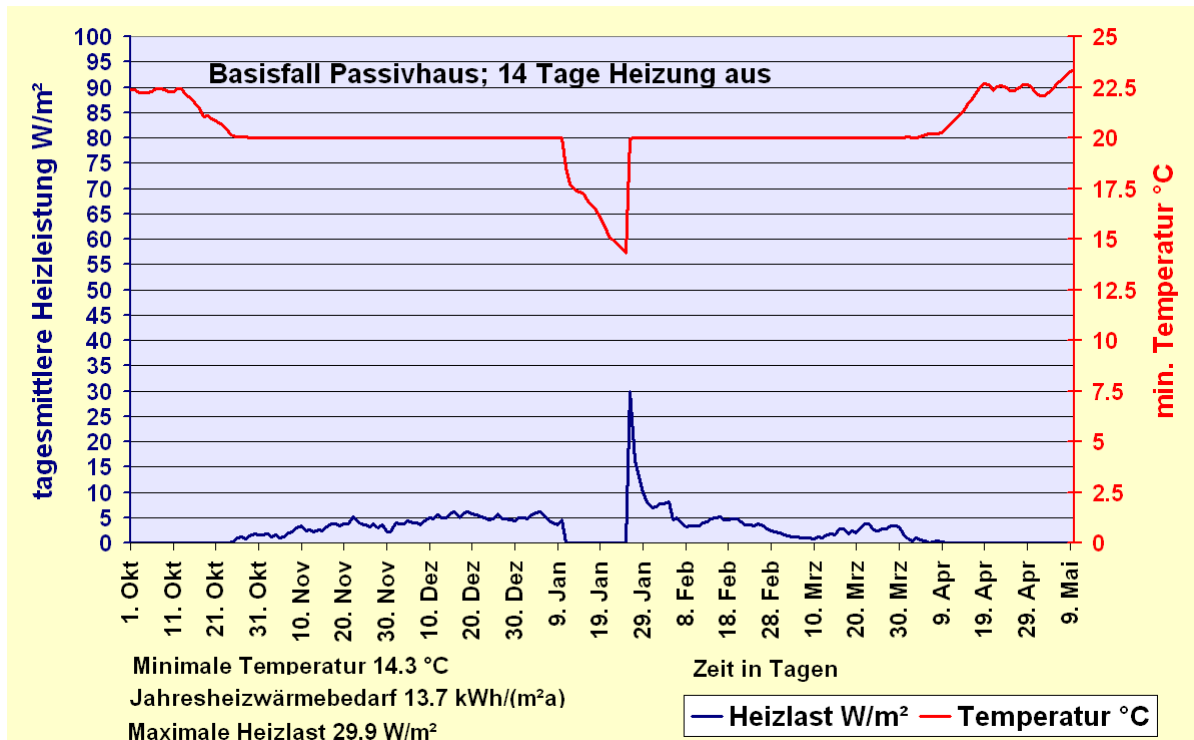


Abbildung 39: Abschalten der Heizung für 14 Tage im Passivhaus. Die Temperatur fällt auf minimal 14.3 °C ab. Die Maximalleistung für "rasches Aufheizen" beträgt für das ganze Haus etwa 3.6 kW (30 W/m<sup>2</sup>), wovon 1.6 schon aus einem Kompaktsystem verfügbar wären.

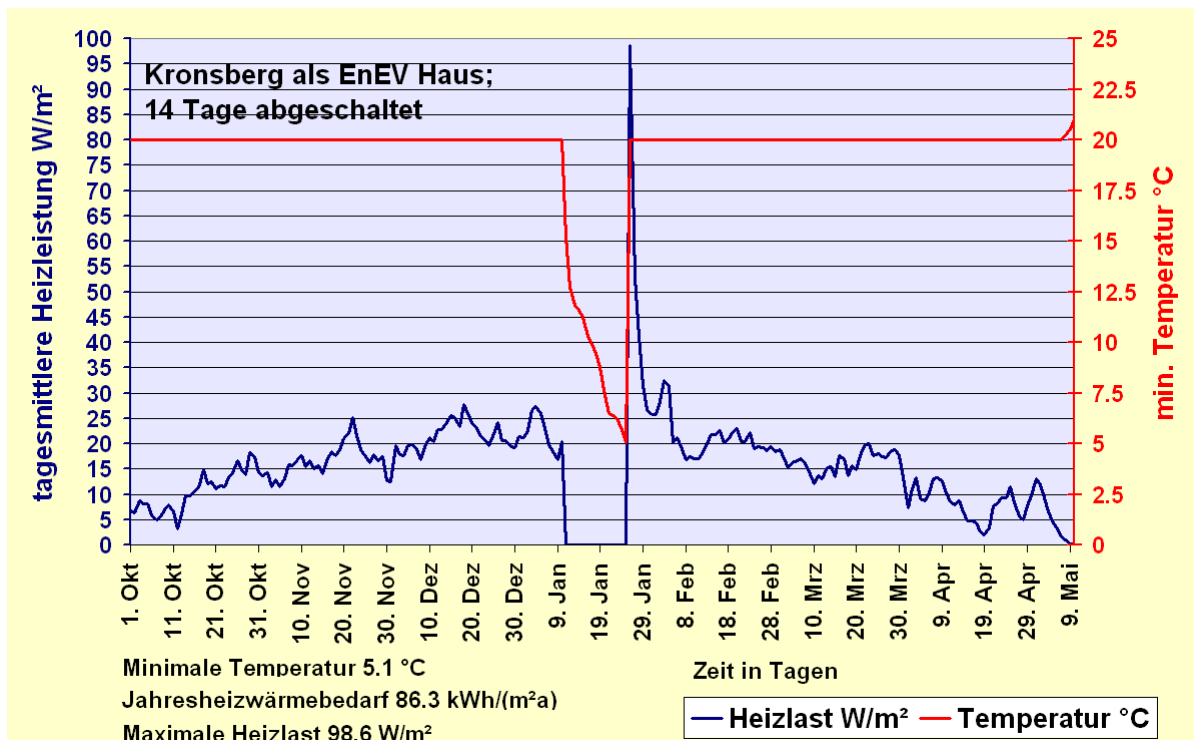


Abbildung 40: Abschalten der Heizung für 14 Tage bei der EnEV-Variante. Die Temperatur fällt bis auf 5.0 °C ab. Die Maximalleistung für "rasches Aufheizen" beträgt für das ganze Haus etwa 12 kW (die Auslegungsleistung der Wärmeverteilung beträgt 3.6 kW).

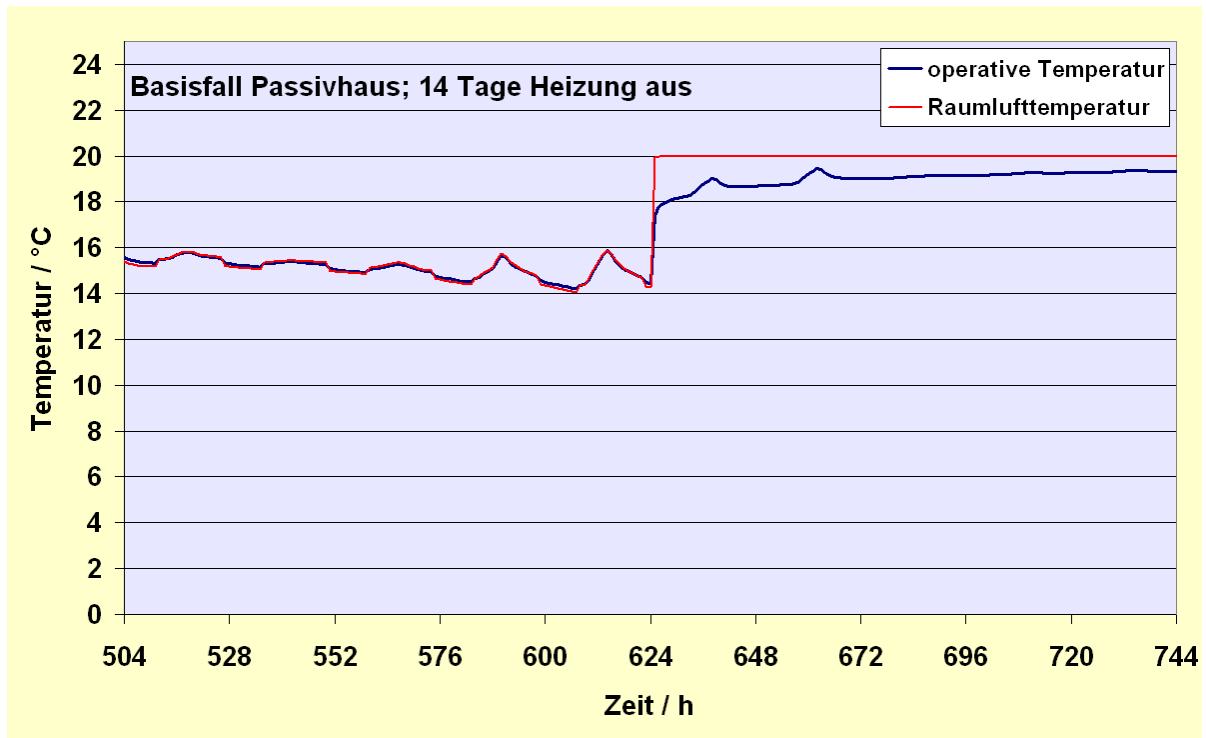


Abbildung 41: Verlauf der operativen Temperatur beim Wiederanheizen; Fall Passivhaus mit zusätzlicher Unterstützung durch temporäre Wärmequellen (+2 kW).

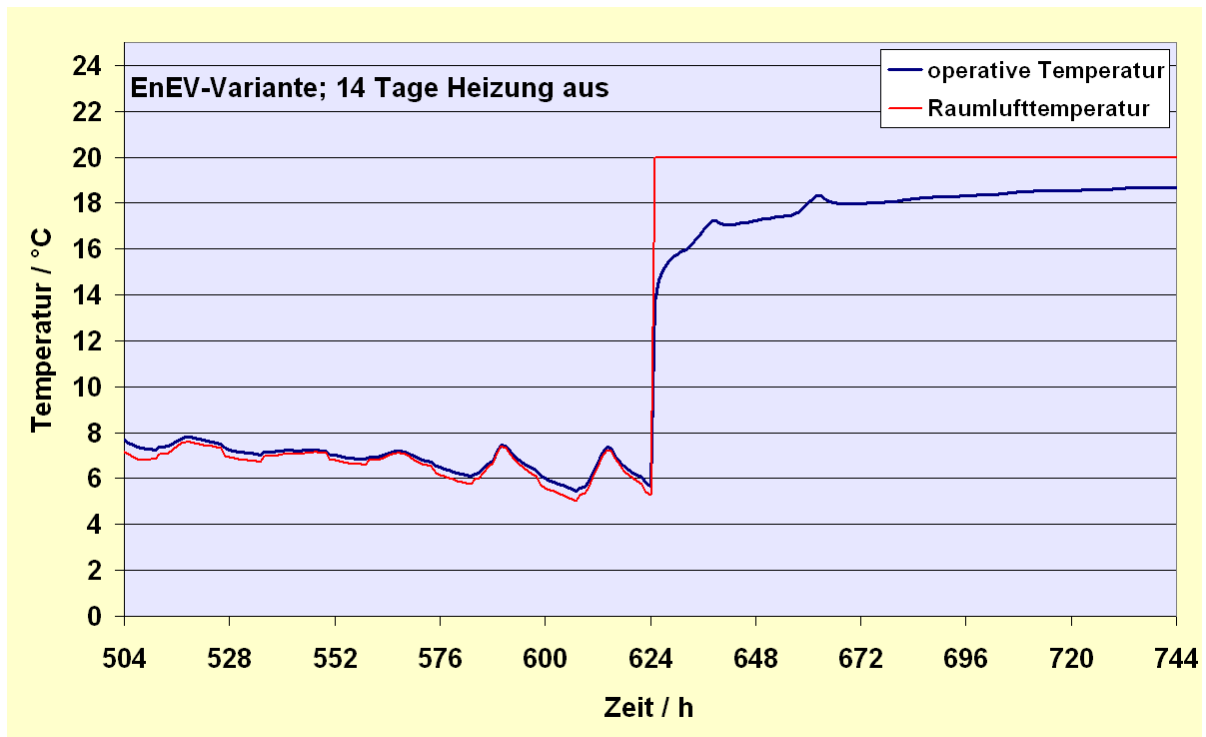


Abbildung 42: Verlauf der operativen Temperatur beim Wiederanheizen; Fall EnEV-Haus mit verfügbarer Heizleistung von 12 kW insgesamt (ca. 100 W/m<sup>2</sup>).

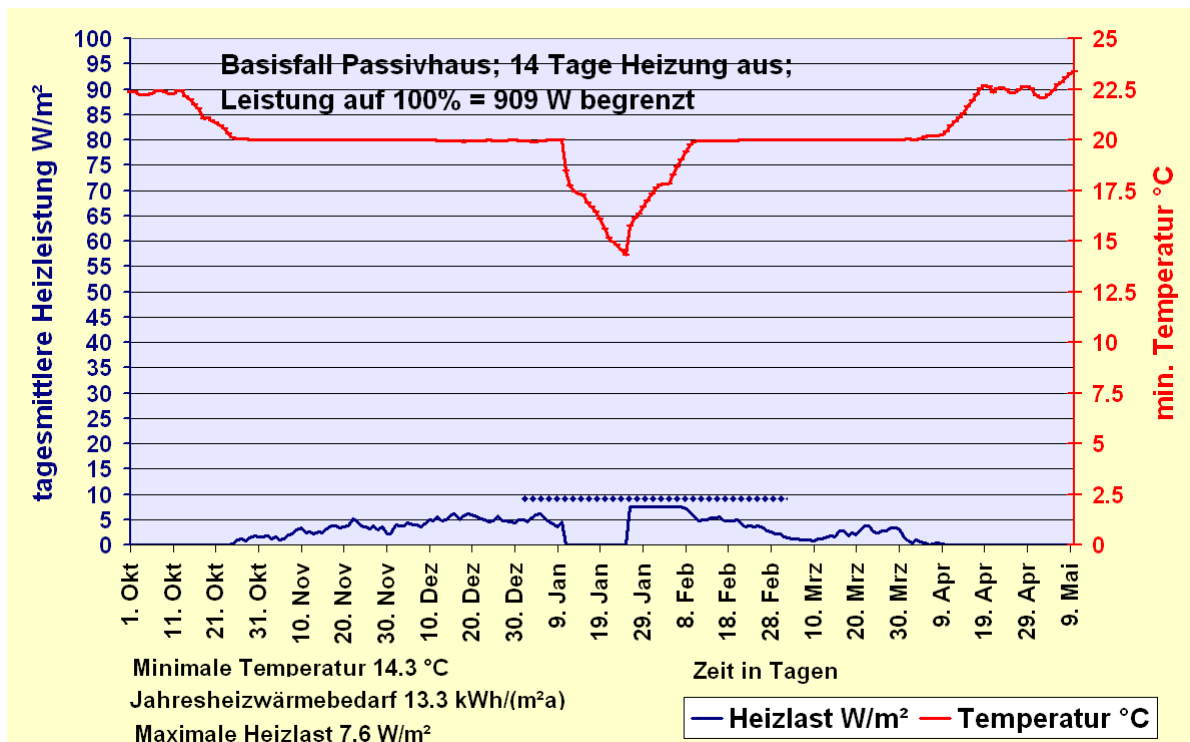


Abbildung 43: In einem Passivhaus, in welchem nur die 909 W Auslegungsleistung zur Verfügung stehen, würde es etwa 7 Tage dauern, um 18 °C wieder zu erreichen. Die notwendige zusätzliche Leistung um sofort 20 °C zu erreichen beträgt aber nur etwa 2.7 kW und wäre mit ein bis zwei Heizlüftern leicht aufzubringen, die nur im „Ernstfall“ und nur kurzzeitig eingesetzt werden müssten.

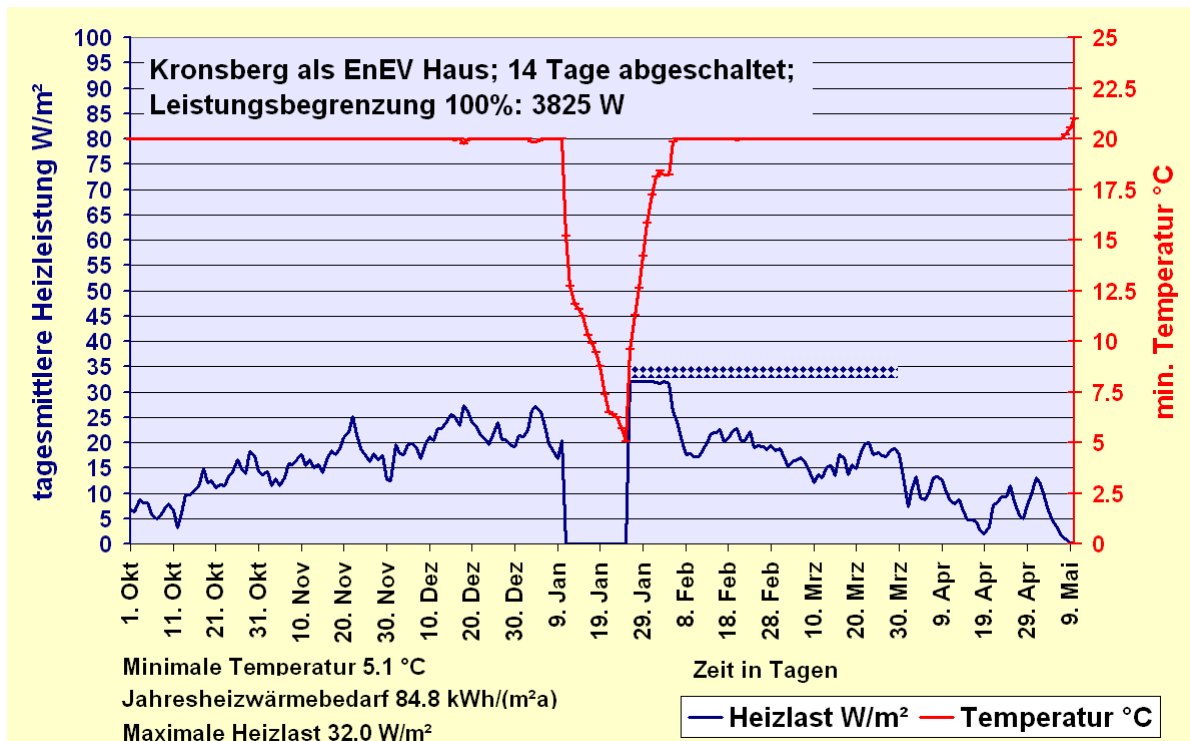


Abbildung 44: In einem Endhaus nach EnEV würde es ohne zusätzliche Leistungsreserve ebenfalls 7 Tage erfordern, bis 18 °C wieder erreicht sind. Die notwendige Leistungsreserve müsste ca. 8 kW betragen.

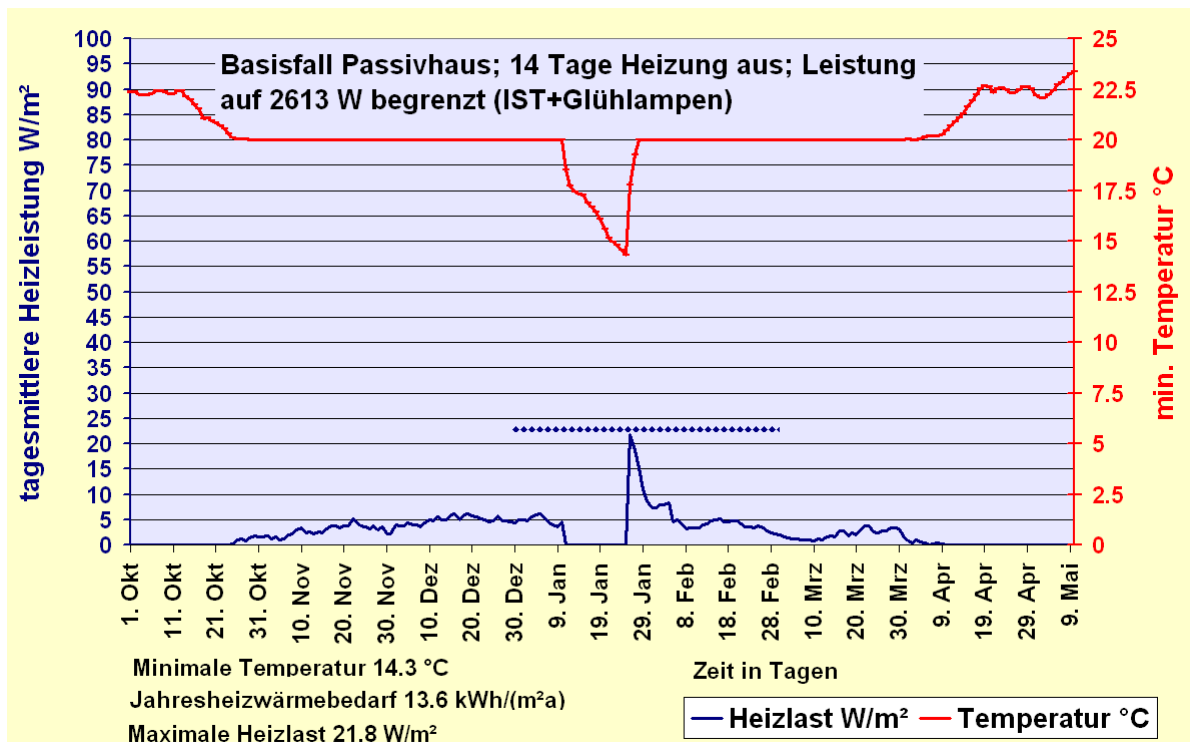


Abbildung 45: Wiederanheizung mit zusätzlicher Leistung von 1000 W, z.B. Glühlampen, Rotlichtlampe, Haartrockner, .... Innerhalb von einigen Stunden sind bereits akzeptable Bedingungen erreichbar.

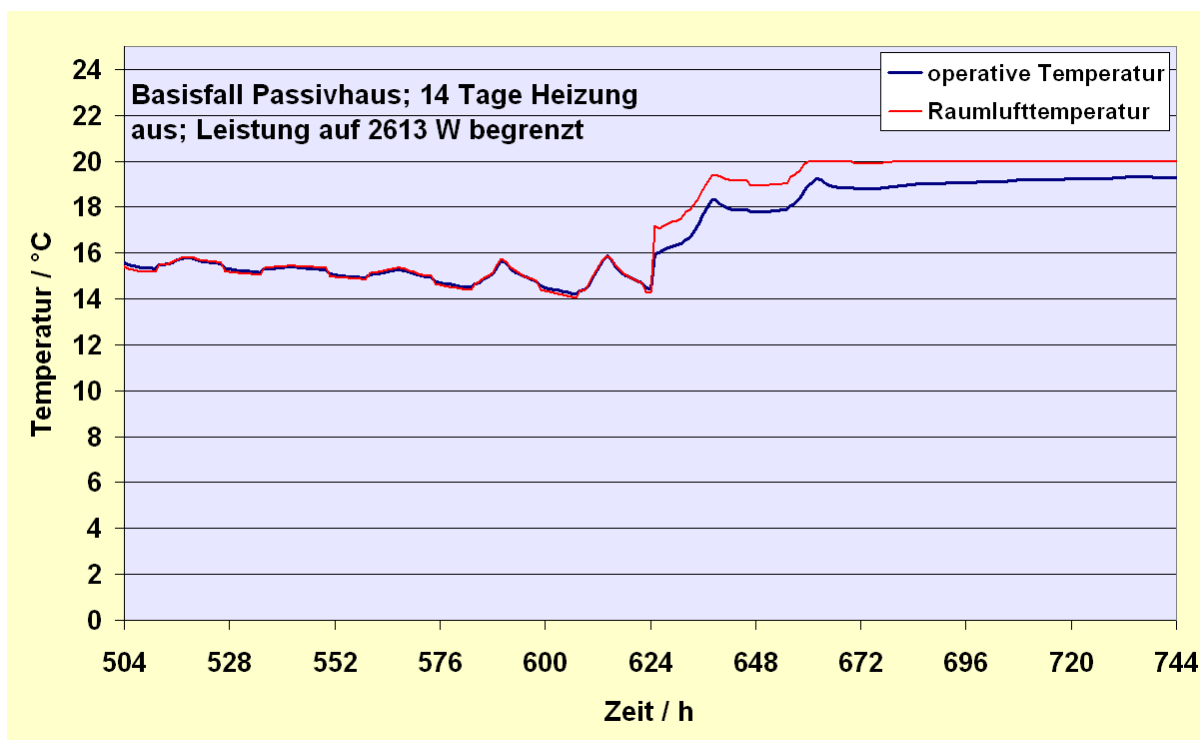


Abbildung 46: Bei einer begrenzten Leistung von etwa 22 W/m<sup>2</sup> ist bereits gegen Mittag des Wiederanheitztages eine operative Temperatur von 18 °C erreichbar. Abbildung 41 zeigt, dass mit einem Heizlüfter (2 kW) diese Bedingungen bereits nach etwa 1 Stunde erreicht werden.

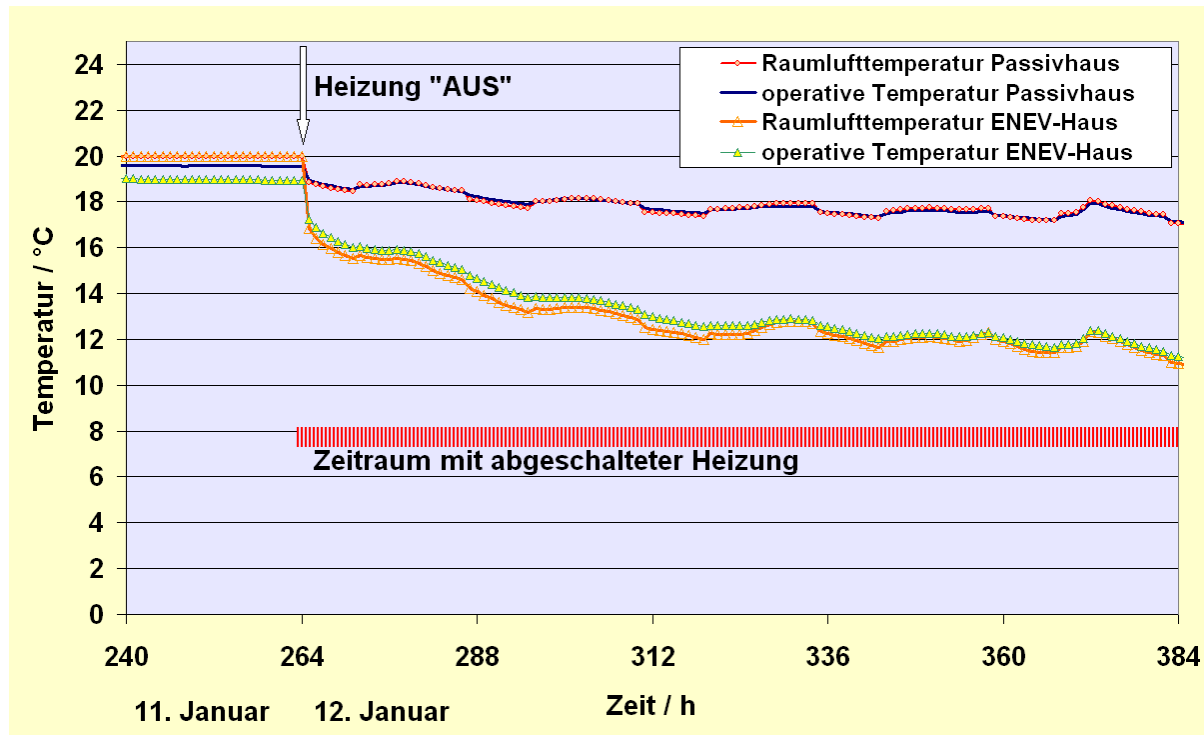


Abbildung 47: Temperaturabfall nach dem Abschalten der Heizung: Im Passivhaus nur sehr gering, in den ersten vier Tagen liegen die Temperaturen immer noch um 18 °C. In schlechter gedämmten Häusern wird es schnell ziemlich kalt.

In Abbildung 47 wird noch die Anfangsphase nach dem Abschalten des Heizsystems diskutiert. Dies könnte z.B. die Situation bei einem Stromausfall sein. In einem Passivhaus fallen Lufttemperatur und operative Temperatur innerhalb des ersten Tages gerade auf etwa 18 °C ab und dieser Zustand wird noch bis etwa 4 Tage nach dem Heizungsausfall gehalten. Dies sind keine ausgesprochen komfortablen Bedingungen, aber mit entsprechender Kleidung lässt sich eine solche Phase im Notfall sicher durchstehen. Im EnEV-Haus liegen die Temperaturen schon nach 5 Stunden im Bereich von 16 °C, am zweiten Tag schon unter 14 °C und die Auskühlung setzt sich noch weiter fort. Wenn nicht vergleichsweise schnell für eine Reparatur oder eine Ersatzwärmequelle gesorgt wird, sind diese Bedingungen kaum erträglich.

Fazit: Auch bei extremsten Auskühlbedingungen, wie sie im Passivhaus eigentlich kaum vorkommen sollten, ist mit vertretbaren zusätzlichen Leistungen (notfalls reichen einige Glühlampen, ein Heizlüfter ist immer ausreichend) eine Wiederaufheizung auf Komfortbedingungen möglich. Dies sollte nicht der Regelfall sein. In den Messaufzeichnungen des PHI aus inzwischen über 300 Passivhauswohnungen kam ein solcher Fall nicht vor. Sollte er dennoch eintreten, so führt er jedoch im Einzelfall weder zu hohen Kosten noch zu einer unverträglichen Umweltbelastung.



### 3.8 Auswirkungen von fehlender Heizleistung (Auslegungsfehler oder Baumängel)

In diesem Abschnitt wird diskutiert, welche Folgen ein Leistungsdefizit bei der verfügbaren maximalen Heizleistung hat. Ein Defizit aufgrund mangelnder Leistungsfähigkeit der Wärmeerzeuger wird es kaum geben. Vielmehr könnte ein Defizit entstehen z.B. durch nicht erreichte (oder wieder verlorengegangene) Luftdichtheitskennwerte, Ausführungsmängel in der Wärmedämmung oder falsch eingebaute Produkte. Diese Fehlereinflüsse sind in erster Näherung proportional zum Wärmebedarf des jeweiligen Objektes. Im folgenden werden daher Varianten diskutiert, in denen jeweils ein Leistungsdefizit von 10, 25 und 50% der eigentlich erforderlichen Heizleistung gibt.

**Tabelle 6: Werte der Leistungsbegrenzung für 90%, 75% und 50% der maximalen Heizlast im Passivhaus und für das Haus nach EnEV.**

	Passivhaus	EnEV-Haus
100% Heizlast	909 W	3825 W
90% Heizlast	818 W	3443 W
75% Heizlast	682 W	2869 W
50% Heizlast	454 W	1913 W

Das Leistungsdefizit von 50% im Passivhaus beträgt nur 454 W für das gesamte Gebäude; ein solches Defizit wäre natürlich leicht (z.B. durch Einschalten aller Leuchten im Haus) behebbbar. Dies würde übrigens zu einem Stromverbrauch von ganzjährig 478 kWh oder etwa 4 kWh/(m<sup>2</sup>a) führen und wäre weder von den Kosten noch von den Umweltauswirkungen her dramatisch. Allerdings sollte das keine ernsthaft kalkulierte Methode bei systematisch zu knapper Auslegung der Heizanlage sein; eine gewissenhafte Planung führt zu einer korrekten Auslegung und impliziert eine Qualitätssicherung an der Baustelle. Die Erfahrungen mit bisherigen Passivhaus-Bauprojekten zeigen, dass damit reproduzierbar zuverlässige Qualitäten und eingehaltene Kennwerte erreicht werden können. Hier wird der seltene Ausnahmefall diskutiert, nicht eine nachlässige oder bewusste Abweichung von den Sollwerten. Für die Risiko-Bewertung ist es wichtig, zu wissen, wie sich eine fehlerhaft zu geringe verfügbare Leistung auswirken würde.

Im EnEV-Haus wäre ein Leistungsdefizit von 1913 W nur durch zusätzliche Heizlüfter zu kompensieren, deren Verbrauch dann im Jahresverlauf bei 2980 kWh bzw. 25 kWh/(m<sup>2</sup>a) liegen würde. Diese Beträge führen etwa zu einer Verdopplung des Stromverbrauches und zu entsprechend hohen Zusatzkosten. Fehlende Heizleistungen bei Häusern nach EnEV haben daher weitergehendere Auswirkungen.

Abbildung 48 zeigt die Raumluft-Temperaturverläufe in Passivhäusern, in denen die verfügbare Leistung auf die jeweils angegebenen Werte begrenzt ist. Ausgewählt ist der "kritische Zeitraum" im Testreferenzjahr vom 24. Januar bis einschließlich 6. Februar. Bei Beschränkung auf 90% sind Temperaturrückgänge tagsüber um maximal 0.4 K (eine Stunde lang) nach der Fanger'schen Komfortgleichung nicht bemerken [DIN EN ISO 7730]. Auch in der Nacht sinken die Temperaturen nicht unter 19.3 °C. Ein solches Defizit wäre als völlig unkritisch anzusehen. Fehlen 25% der Leistung, sinken die Temperaturen auch tagsüber an sechs Tagen auf um 19.6 °C, in der kältesten Stunde sogar auf 19.1 °C. Selbst dieses Defizit wäre,

gerade wegen der Kürze des Zeitraumes, notfalls noch akzeptabel. Der Unterschied in der Bewertung im "Vorausgesagten mittleren Votum" PMV beträgt  $\Delta PMV = -0.17$ , dies liegt noch innerhalb des Komfortbandes zur "Comfort-Class A" ( $|\Delta PMV| \leq 0.22$ ) nach [ASHRAE 55-2003]. Bei 50% Unterdimensionierung wird es allerdings doch wahrnehmbar unkomfortabel: Über Wochen liegen die Temperaturen dann um 17 °C mit einem Minimum bei 16 °C. Die Abweichung im Votum beträgt dann  $\Delta PMV = -0.77$  und liegt außerhalb der Anforderungen nach DIN EN ISO 7730 bzw. ASHRAE "Comfort-Class B" ( $|\Delta PMV| \leq 0.5$ ). Diese Auswirkungen treten beim Passivhaus aber erst auf, wenn *die Hälfte* der Leistung nach PHPP-Heizlastblatt gemäß dem Verfahren von [Bisanz 1999] fehlt.

Abbildung 49 zeigt zum Vergleich die entsprechenden Temperaturverläufe im Endhaus nach EnEV. Bei Beschränkung auf 90% sind Temperaturrückgänge tagsüber um maximal 1 K (eine Stunde lang) und mehrmals unter 19.5 °C gerade bemerkbar, aber auch nicht von dramatischer Bedeutung. In der Nacht sinken die Temperaturen bis auf 18.5 °C. Fehlen 25% der Leistung, sinken die Temperaturen tagsüber mehrere Stunden unter 19°C, an einem Tag sogar unter 18 °C (kälteste Stunde sogar auf 17.2 °C). Dieses Defizit wäre mit  $\Delta PMV = -0.53$  bereits jenseits der Anforderungen nach DIN EN ISO 7730 und daher nicht mehr zulässig. 50% Unterdimensionierung macht sich beim EnEV-Standard dramatisch bemerkbar: Wochenlang herrschen Temperaturen um 14 °C herum (Minimum: 11.5 °C), hier ist sicher mit Beschwerden zu rechnen, die Komfortzone wird definitiv und über lange Zeiträume verlassen.

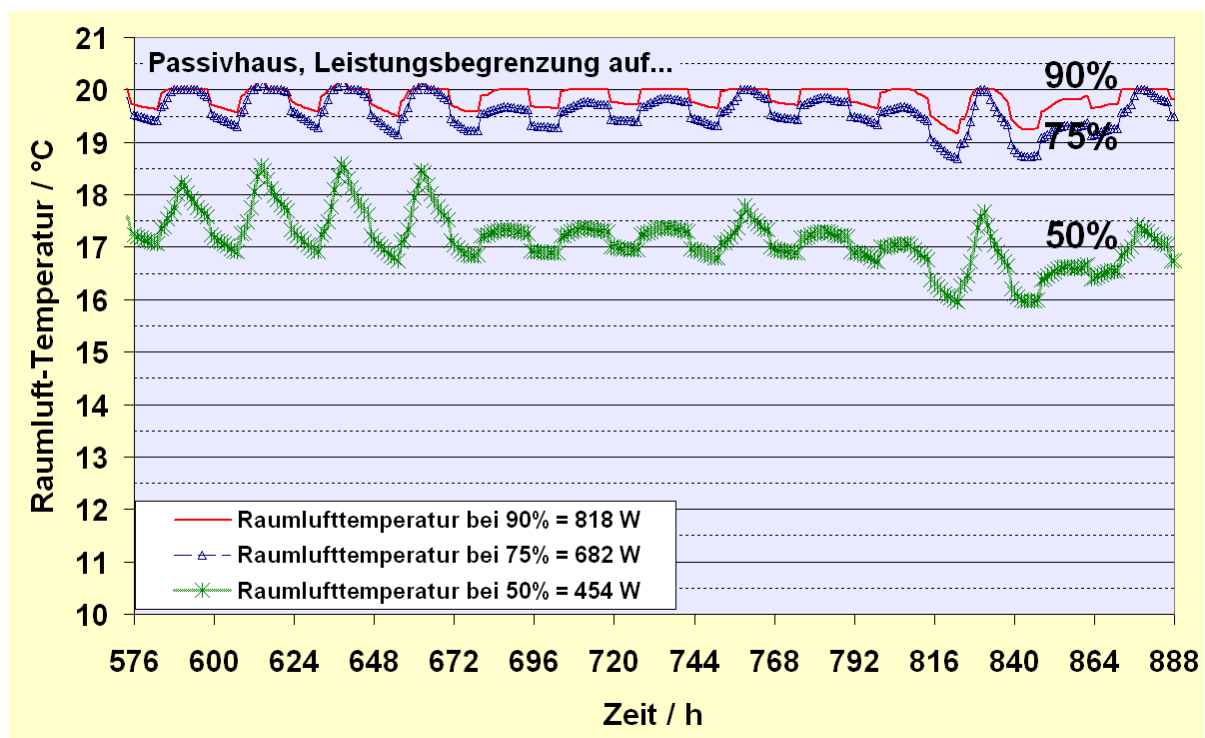


Abbildung 48: Verlauf der Raumluf-Temperatur im lastkritischen Zeitraum bei Leistungsdefiziten der Wärmeversorgung in einem Reihenendhaus mit Passivhaus-Standard.

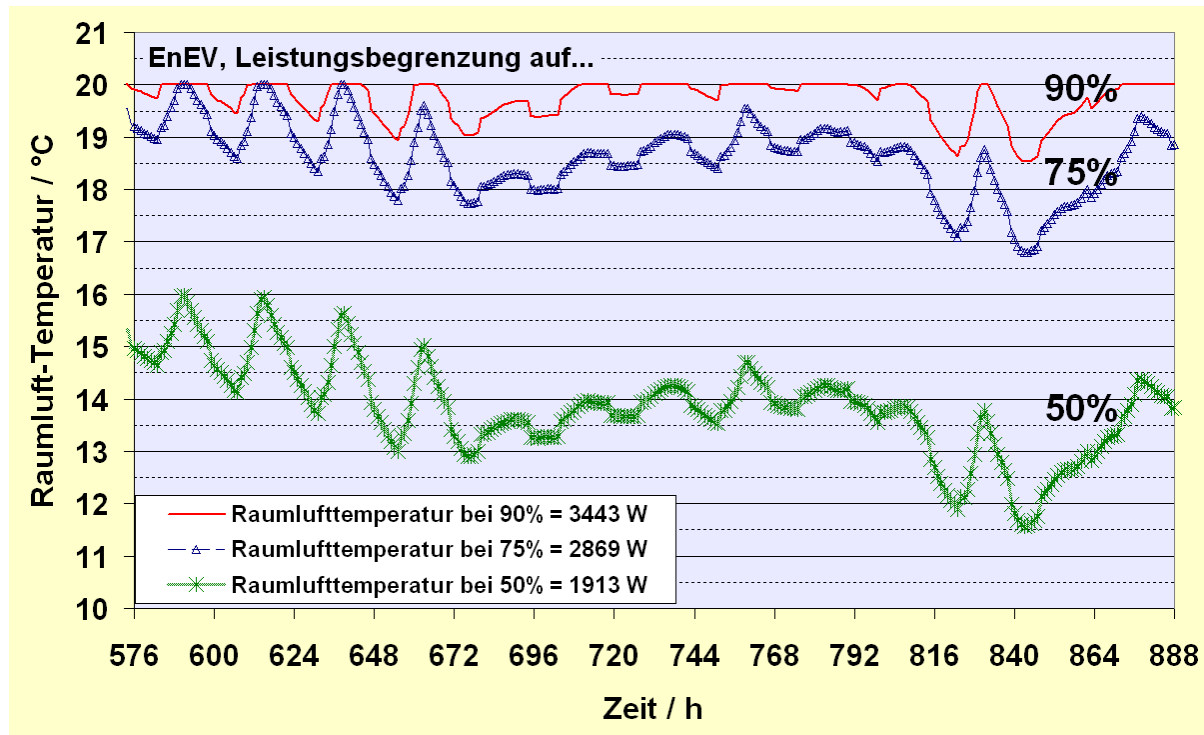


Abbildung 49: Verlauf der Raumlufttemperatur im lastkritischen Zeitraum bei Leistungsdefiziten der Wärmeversorgung in einem Reihenendhaus nach EnEV.

Ausschlaggebend sind die vorherrschenden operativen Temperaturen. Abbildung 50 zeigt deren Verlauf bei Leistungsdefiziten im Passivhaus. An der Bewertung ändert sich nichts Grundsätzliches gegenüber den bereits diskutierten Raumtemperaturverläufen: Leistungsdefizite bis etwa 25% wirken sich im Passivhaus noch nicht unakzeptabel aus; eine 50%ige Unterdimensionierung ist allerdings nicht empfehlenswert. Im EnEV-Fall machen sich schon 10% Defizit bemerkbar, 25% sind bereits unakzeptabel.

Schließlich wird mit Abbildung 52 noch eine Variante mit Passivhausstandard aber in *reiner Leichtbauweise* untersucht. Durch die geringere Wärmekapazität im Raum und die dadurch kürzeren Zeitkonstanten wirken sich fehlende Leistungen im reinen Leichtbau stärker aus als im Basisfall mit Mischbauweise. Leistungsdefizite von 10% bleiben unkritisch, bei 25% fehlender Leistung sinken die minimalen operativen Temperaturen im Leichtbau-Passivhaus bis auf etwa 18 °C ab ( $\Delta PMV = -0.43$ , nach DIN EN ISO 7730 wäre dies gerade noch zulässig); bei 50% Leistungsdefizit ist die Auswirkung nicht akzeptabel (wie auch beim Mischbau-Basisfall). Selbst bei reiner Leichtbauweise ist das Verhalten des Objektes mit Passivhausstandard gegenüber Leistungsdefiziten deutlich gutmütiger als bei Standard nach EnEV. Eindeutiges Ergebnis dieser Fallstudie ist, dass bei leichter Bauweise die tatsächliche Verfügbarkeit korrekter bestimmter Heizleistungen von größerer Bedeutung ist als beim Massivbau: Die Anforderungen an die Qualitätssicherung sowohl bzgl. der Ausführung der Gebäudehülle als auch bzgl. der Heizungstechnik sind daher bei reiner Leichtbauweise höher. Abhilfe kann durch die bewusste Einbringung von zur inneren Wärmekapazität beitragenden Bauteilen erfolgen, wie z.B. schwere Estriche, Sandfüllungen (statt Mineralwolle) bei Innenwänden, mehrfache Bepankungen von Leichtbauwänden oder der Einsatz von PCM (Materialien mit Phasenübergängen).

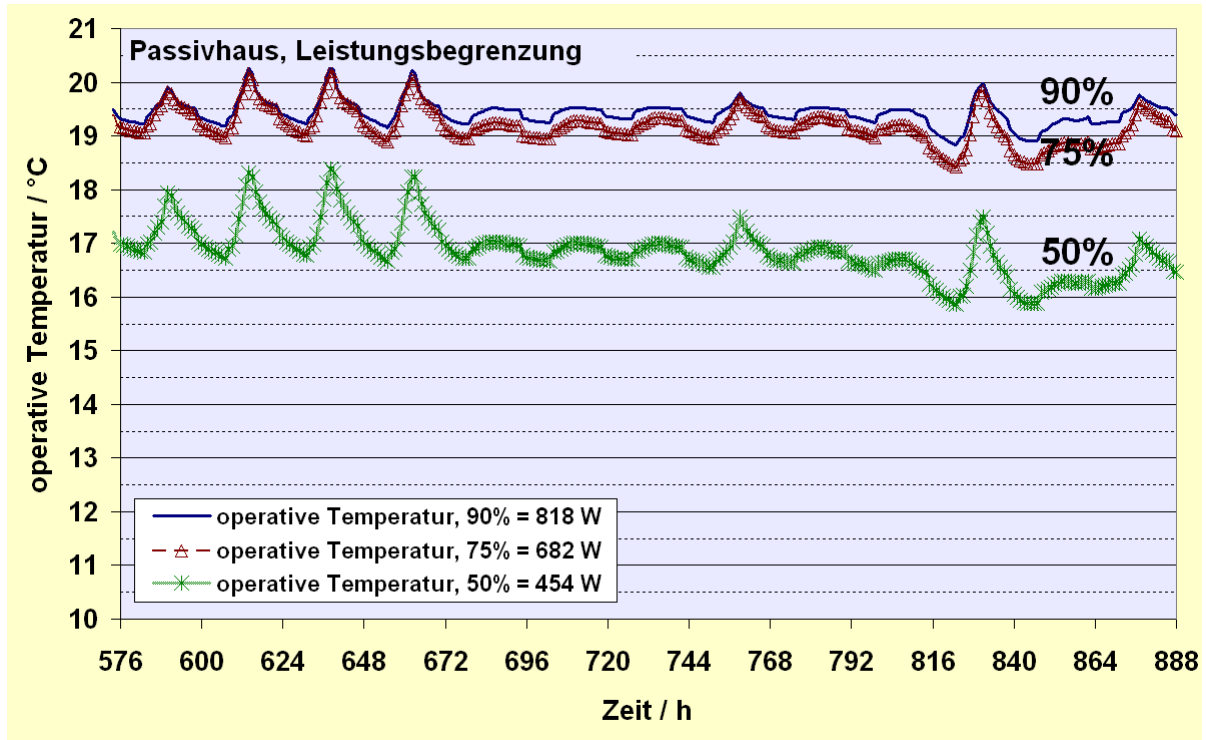


Abbildung 50: Verlauf der operativen Temperatur im lastkritischen Zeitraum bei Leistungsdefiziten der Wärmeversorgung in einem Reihenendhaus mit Passivhaus-Standard.

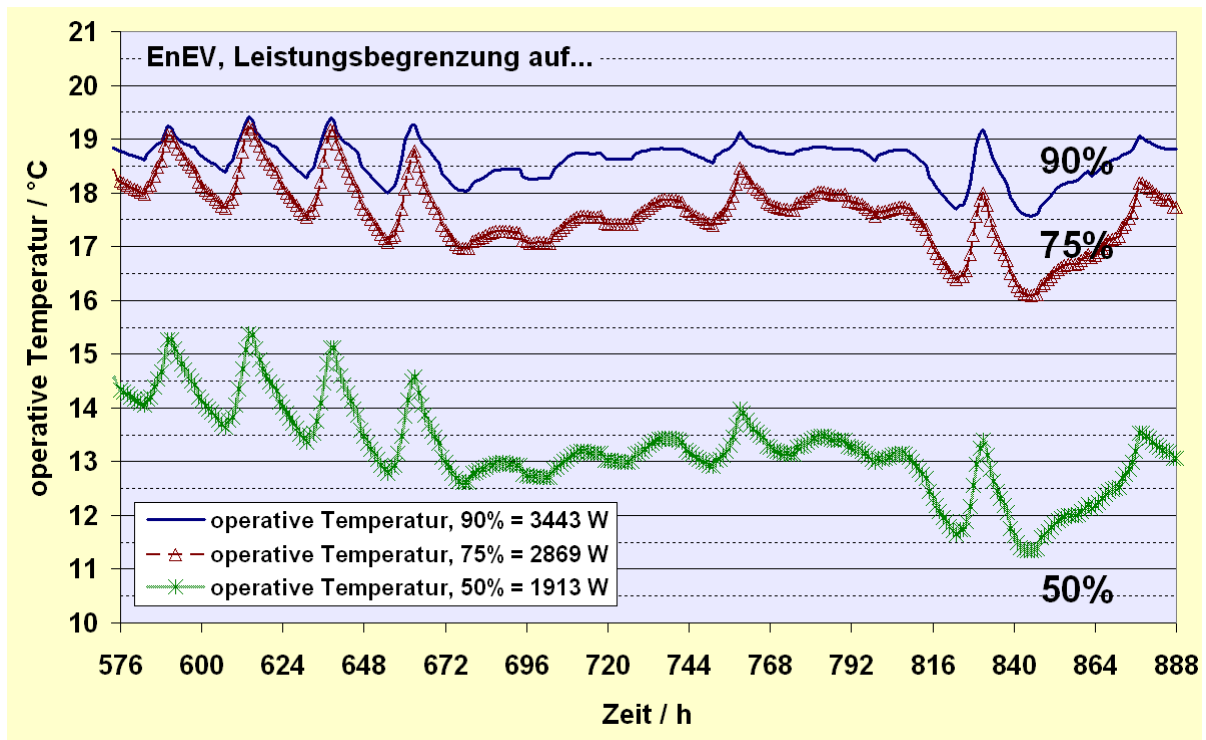


Abbildung 51: Verlauf der operativen Temperatur im lastkritischen Zeitraum bei Leistungsdefiziten der Wärmeversorgung in einem Reihenendhaus nach EnEV.

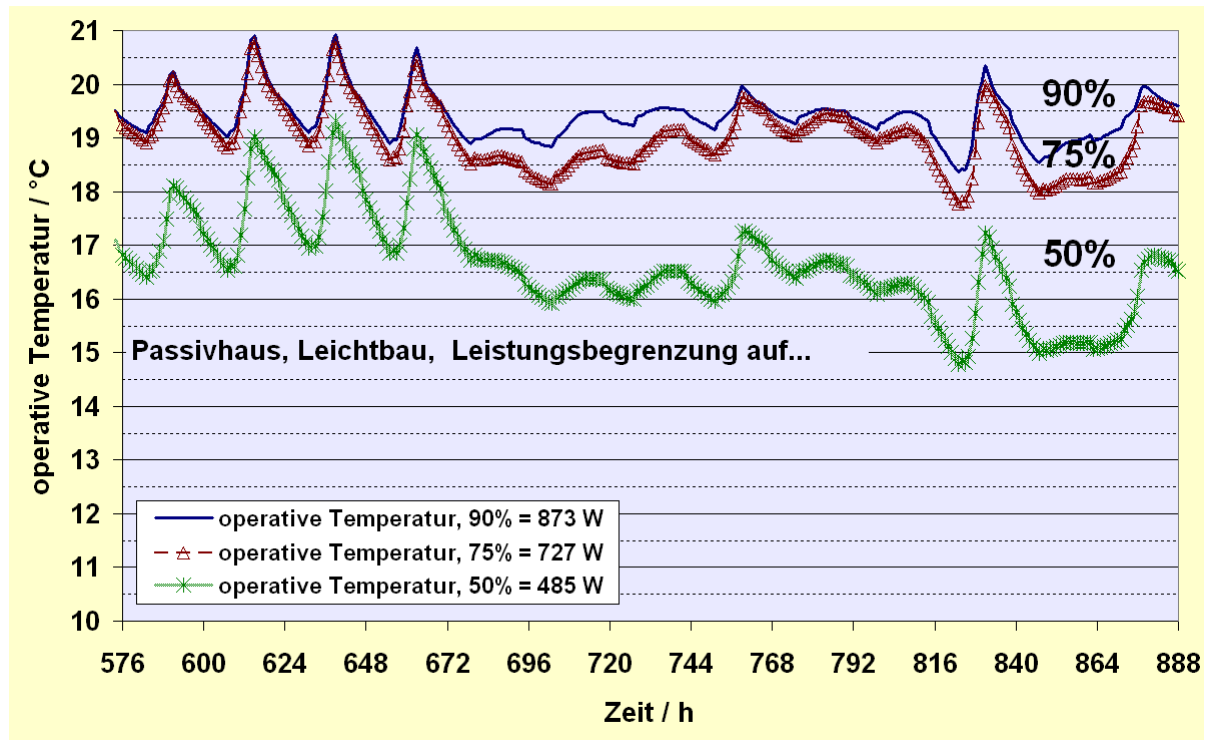


Abbildung 52: Verlauf der operativen Temperatur im lastkritischen Zeitraum bei Leistungsdefiziten der Wärmeversorgung in einem Reihenendhaus mit Passivhaus-Standard als reiner Leichtbau.

Solche Maßnahmen verbessern nicht nur die Toleranz des Gebäudes gegenüber Störungen, sondern auch:

- das Regelungsverhalten (vgl. [AkkP 28]),
- die Gleichmäßigkeit der Temperaturverteilung innerhalb der Räume und innerhalb des Hauses (vgl. [AkkP 25]),
- die Temperaturreaktion auf kurzzeitige innere oder äußere Lastspitzen (z.B. Solareinstrahlung),
- das sommerliche Innenklima (vgl. [AkkP 15]),
- den Schallschutz.

Allein wegen der besseren Fehlertoleranz gegenüber Leistungsdefiziten lohnt sich die Einbringung einer höheren inneren Wärmekapazität natürlich nicht; richtig ist vielmehr, auf eine korrekte Auslegung nach PHPP zu achten. Die anderen genannten Vorteile einer gegenüber reiner Leichtbauweise zumindest etwas erhöhten inneren Wärmekapazität sind jedoch insgesamt überzeugend, weshalb das PHI solche Maßnahmen empfiehlt. Bei Massiv- oder Mischbauweisen hingegen ist die verfügbare innere Wärmekapazität ohnehin so groß, dass eine weitere Erhöhung keine Vorteile mehr bewirkt.

### 3.9 Sondersituation: Kurzfristige Temperaturerhöhung

In der folgenden Parameterstudie wird eine Sondersituation behandelt, die zu einem typisch instationären Betriebsverhalten führt. Ausgehend von der regulären Temperatur von 20 °C wird ab einem festgelegten Zeitpunkt (21. Januar, 14:00) eine um 2 K höhere Raumtemperatur gewünscht. Das könnte z.B. anlässlich eines Besuches auftreten, wenn eine Person mit gegenüber der Familie deutlich unterschiedlichem Behaglichkeitsempfinden im Raum verweilt.

Der Wunsch nach höherer Raumtemperatur wird durch eine entsprechende Einstellung des Thermostaten ausgedrückt. Da die Komfortanforderung das Wohnzimmer betrifft, wird in diesem Fall von einer geschlossenen Tür ausgegangen.

Abbildung 53 zeigt die Systemreaktion in einem Passivhaus, wenn eine Begrenzung der verfügbaren Leistung auf 10 W/m<sup>2</sup> vorliegt (im konkreten Objekt stehen höhere Leistungen zur Verfügung). Die Raumlufttemperatur steigt in dieser Situation nur auf ca. 21.5 °C. Wie Abhilfe möglich ist, zeigt Abbildung 55.

Zunächst wird jedoch in Abbildung 54 die gleiche Situation für ein EnEV-Haus betrachtet; in diesem Fall ist die Leistungsbegrenzung auf 35 W/m<sup>2</sup> (Maximallast) vorgenommen. Die Raumlufttemperatur steigt nun sogar nur um 1 K, das Verhalten bzgl. der operativen Temperaturen ist noch unbefriedigender.

Ohne zusätzliche Leistungsreserven sind somit weder beim Haus nach EnEV noch beim Passivhaus rasche Anhebungen des Temperaturniveaus möglich.

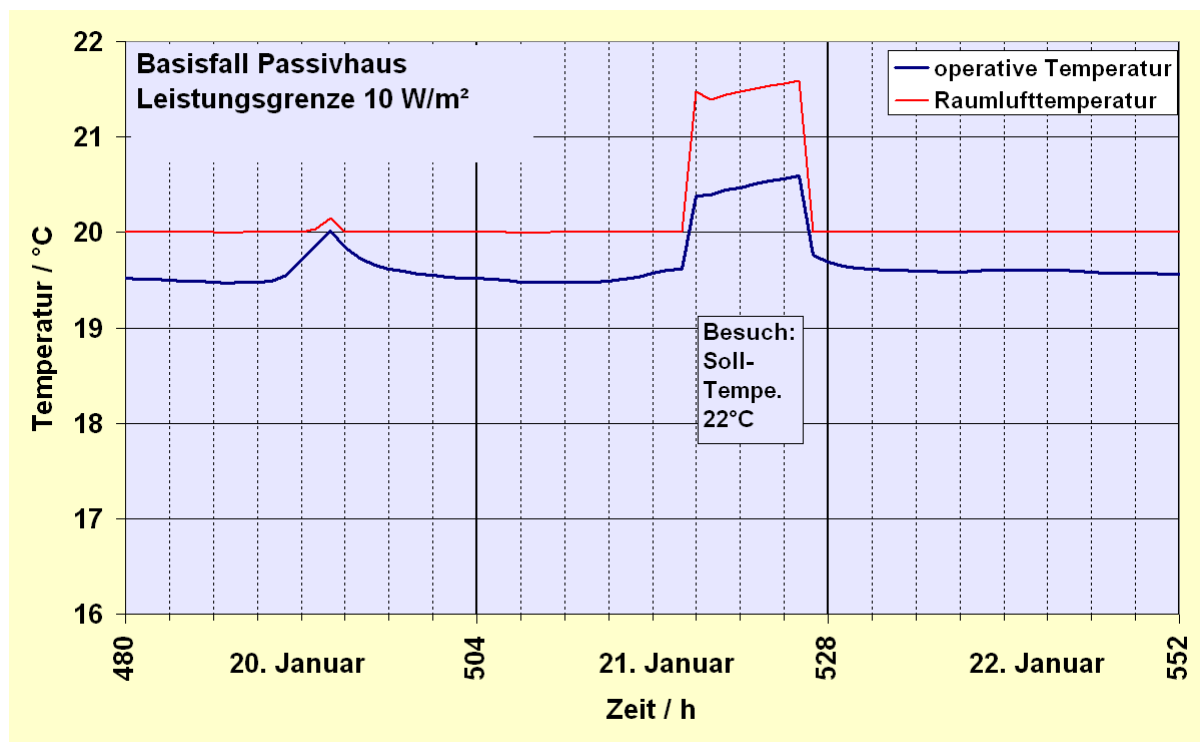


Abbildung 53: Passivhaus: Begrenzung der Heizleistung auf 10 W/m<sup>2</sup>.



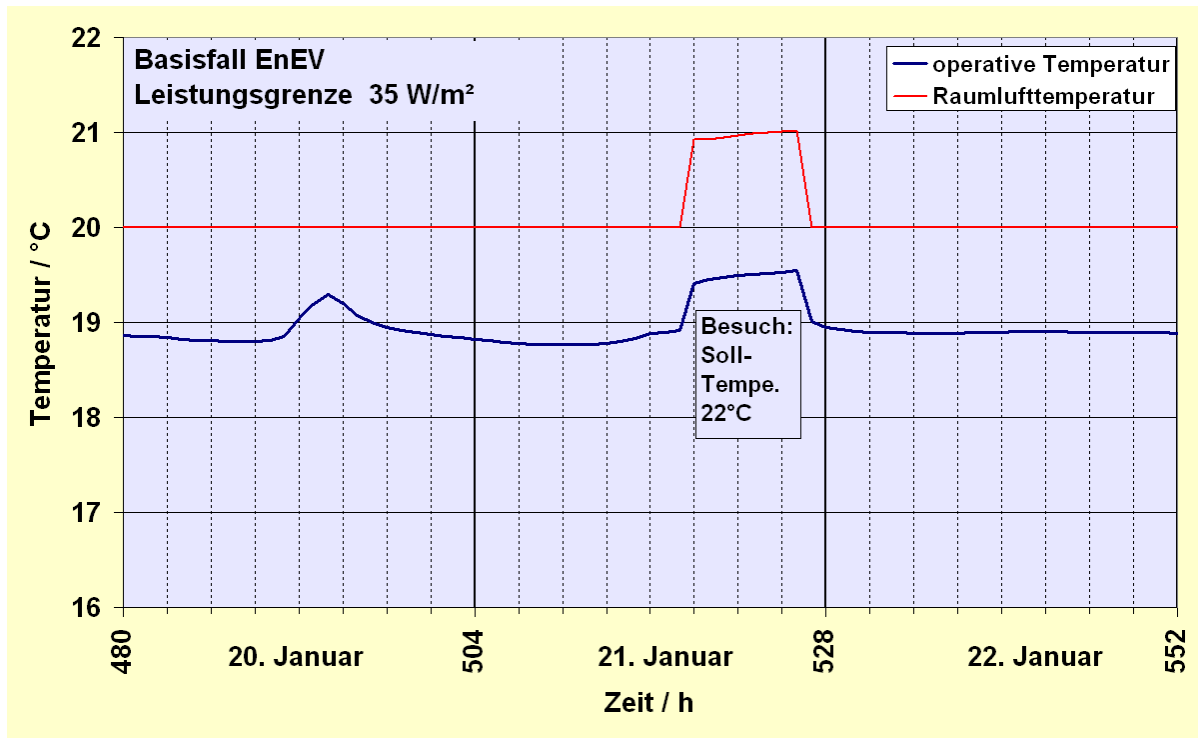


Abbildung 54: EnEV: Begrenzung der Heizleistung auf 35 W/m<sup>2</sup>.

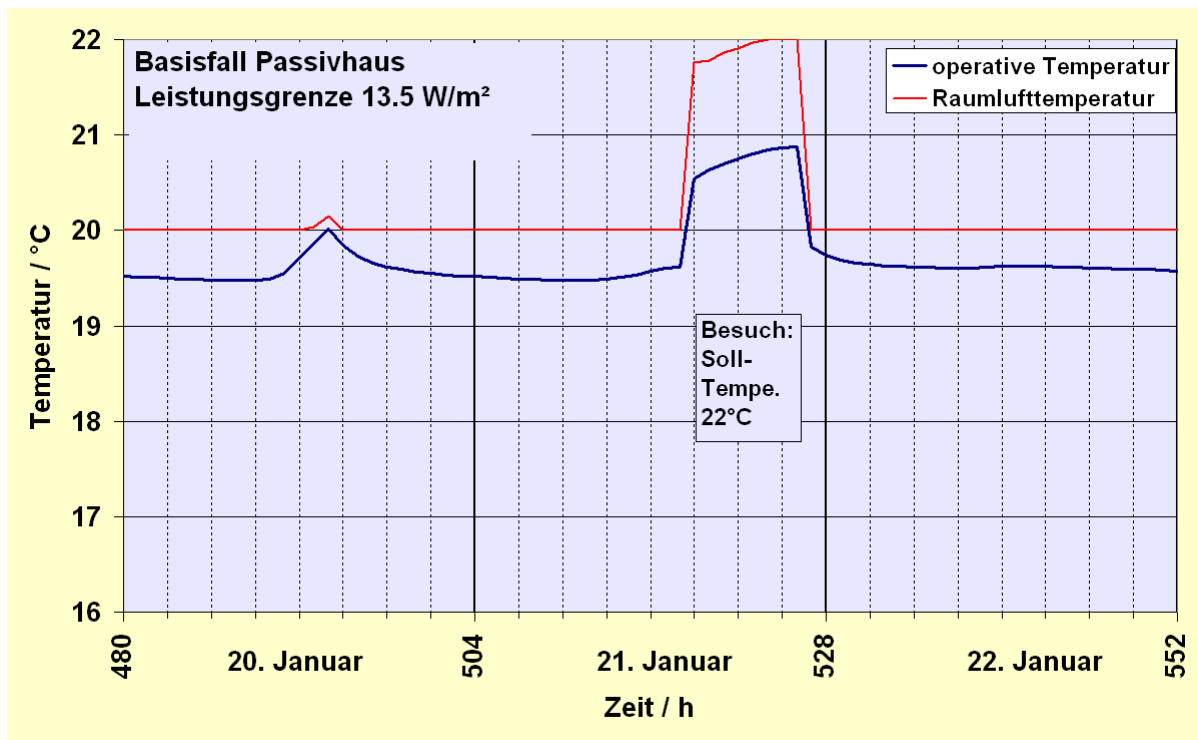


Abbildung 55: Passivhaus mit dem hier konkret vorhandenen System: Eine Leistung von 13.5 W/m<sup>2</sup> ist im Maximum möglich.

Bereits mit einer zusätzlichen Leistung von 3.5 W/m<sup>2</sup>, wie sie im gebauten Objekt in Hannover tatsächlich verfügbar ist, ergeben sich nach Abbildung 55 befriedigendere Ergebnisse. Nun werden Temperaturen nahe an 22 °C rasch erreicht. Insgesamt handelt es sich bei der ins Spiel gebrachten Zusatzleistung um 75 W für das

betroffene Wohnzimmer; der Effekt wäre also z.B. durch das Einschalten einer Stehlampe zu erreichen. Abbildung 56 zeigt, dass in diesem Fall eine reine Leichtbauweise zu einer noch schnelleren Anpassung an den kurzzeitig veränderten Sollwert erfolgt. Der vermeintliche Vorteil ist aber nicht bedeutend; die zuvor beschriebenen Vorteile einer höheren inneren Wärmekapazität zählen mehr. Dies soll hier kurz begründet werden: Höhere innere Wärmekapazitäten führen unter allen Umständen zu einem thermisch trägeren Verhalten der Räume:

- Bei starker Solareinstrahlung (vgl. die Temperaturzunahme am 20. Januar in Abbildung 56, die bei schwererer Bauweise kaum auffällt, vgl. Abbildung 53),
- bei plötzlichen Wechseln von Randbedingungen,
- in Hitzeperioden im Sommer (es bleibt länger kühl und die Tagesspitzen werden gedämpft)
- aber auch beim Anheizen bzw. Abschalten der Heizung.

Alle Untersuchungen zur thermischen Behaglichkeit in großen statistischen Stichproben zeigen, dass eine gute Temperaturstabilität wichtigste Voraussetzung für eine gute Bewertung ist. Instationäre Temperaturverläufe (z.B. Anheizen) kommen überwiegend nur dann vor, wenn zuvor nicht behagliche Zustände zugelassen wurden. Dafür gibt es bei schlecht gedämmten Gebäuden möglicherweise den Grund, dass durch solche Absenkenzeiten Energie gespart werden soll. In gut gedämmten Gebäuden, wie dem Passivhaus, entfällt dieser Grund, da das Haus ohnehin nur extrem wenig Energie verbraucht. Damit rückt die Bedeutung der "Kontrolle" instationärer Vorgänge in den Hintergrund; man kann es sich problemlos leisten, dauerhaft behagliche Bedingungen eingestellt zu lassen. Dabei ist eine hohe thermische Trägheit des Gebäudes (nicht des Heizsystems!) förderlich.

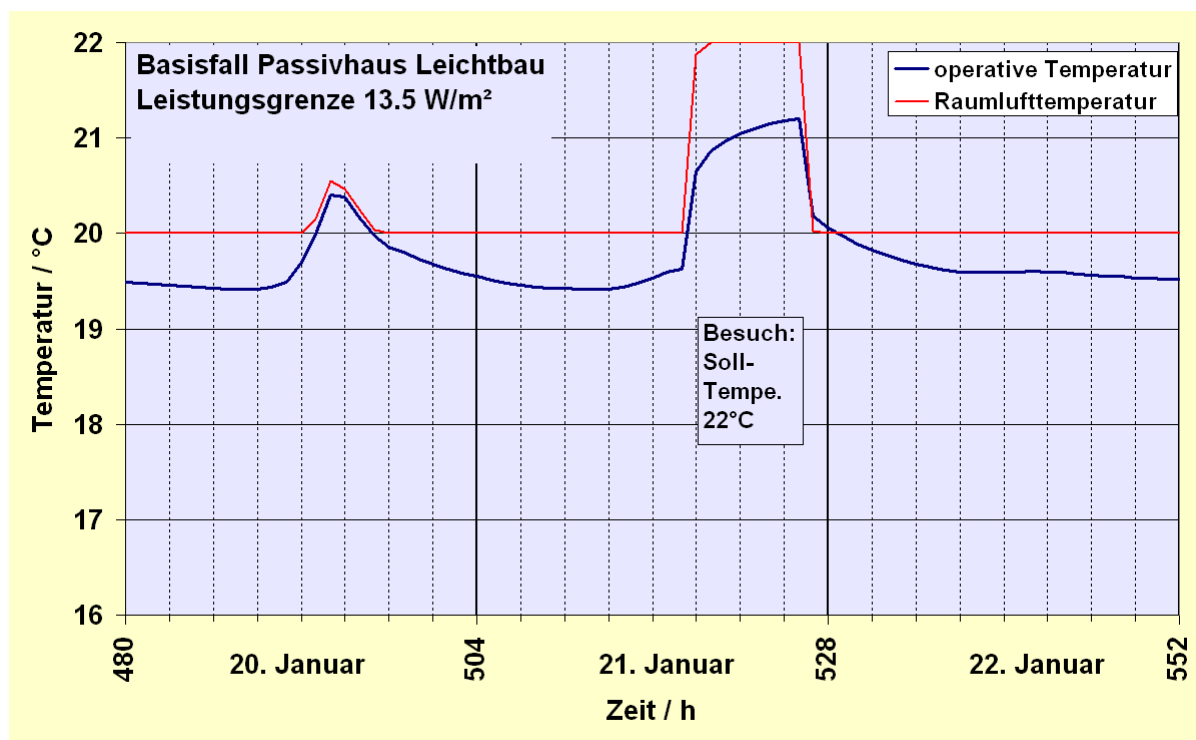


Abbildung 56: Passivhaus als Leichtbau mit dem vorhandenen System, eine Leistung von 13.5 W/m<sup>2</sup> ist im Maximum möglich.

### 3.10 Nachtabsenkung (-abschaltung)

In bestehenden Gebäuden werden regelmäßig aus Energiespargründen Nachtabsenkungen eingerichtet. Bei besser gedämmten Häusern ist es nach allgemein anerkannten Erfahrungen sinnvoll, wenn schon abgesenkt werden soll, das System gleich ganz abzuschalten, da die Temperaturen in der kurzen Absenckphase ohnehin nicht stark absinken.

In Abbildung 57 ist zunächst der Temperaturverlauf beim Passivhaus-Standard für eine Nachabschaltung zwischen 22:00 und 8:00 ohne bestehende Leistungsgrenze des Heizsystems dokumentiert. Auch bei einer 8 Stunden dauernden vollständigen Abschaltung fällt die operative Temperatur zu keinem Zeitpunkt unter 18 °C. Dies bringt die Behaglichkeitsbewertung kurz vor dem Wiederanheizen zwar auf  $PMV = -0.38$ , also außerhalb von ASHRAE-Comfortclass "A", aber immer noch innerhalb von  $|\Delta PMV| \leq 0.4$  für die Erfüllung der DIN EN ISO 7730. Selbst außerhalb des Zeitraums mit Komfortanforderungen sinken die Temperaturen in einem sehr gut gedämmten Haus gar nicht auf völlig unakzeptable Werte ab. Diese Tatsache wird in der Diskussion um "Leistungsreserven" für die Wiederanheizung nicht beachtet: Wenn die Temperaturen auf Grund eines thermisch sehr stabilen Gebäudes gar nicht entscheidend absinken, muss auch kein großer Temperaturunterschied beim Anheizen überwunden werden. Unmittelbar nach dem Wiedereinschalten erreicht die operative Temperatur zwar nicht den ungestörten Wert von normalerweise um 19.5 °C, sondern im Extremfall nur 19.2 °C - dies bedeutet  $\Delta PMV = -0.15$  und damit klar innerhalb der Grenzen der ASHRAE-Comfortclass "A". Bzgl. der Komfortbewertung besteht daher im Passivhausfall auch bei Regelung nach der Lufttemperatur kein Problem.

Die Nachtabschaltung wird in der Absicht durchgeführt, Energie und Energiekosten einzusparen. Die Simulation in diesem Fall zeigt, dass der Jahresheizwärmebedarf durch die Abschaltung in jeder Nacht (ohne Leistungsbegrenzung) auf 13.3 kWh/(m<sup>2</sup>a) zurückgeht. Das ist eine Einsparung von 6.5% oder insgesamt über das gesamte Jahr von 110 kWh/a entsprechend etwa 5.50 €/a. Das ist ein enttäuschend niedriger Einsparererfolg für die Maßnahme Nachtabschaltung.

Die Analyse der Momentanleistungen zeigt, dass diese für den hier dokumentierten Betrieb im Maximum (8:00) auf 16.2 W/m<sup>2</sup> ansteigt, somit mehr als das Doppelte der Maximalleistung ohne Nachtabschaltung beträgt. Mit dem in diesen Häusern installierten Heizsystem stehen 16.2 W/m<sup>2</sup> nicht zur Verfügung; um dennoch den hier behandelten Fall realisieren zu können, müsste daher eine zusätzliche Leistung installiert werden. Im vorliegenden Fall ist es auch nicht sinnvoll, diese Leistung z.B. durch zusätzliche direktelektrische Wärmequellen zu erbringen - denn diese würden regelmäßig einen nennenswerten Anteil an der Energie für die Wiederaufheizung übernehmen, und dies zu hohen Preisen von elektrischer Energie; der eigentlich gewünschte Einspareffekt würde dadurch konterkariert. Er wird aber auch konterkariert, wenn allein aus diesem Grund ein über 1000 € teures zusätzliches Wärmeübergabesystem eingebaut wird. Mit 5.5 € Energiekosteneinsparung ist eine solche Maßnahme nicht annähernd zu rechtfertigen. Nur für die Nachtabschaltung bedeutend erhöhte Leistungen bereitzustellen, erweist sich vor diesem Hintergrund in einem sehr gut wärmegeprägten Gebäude als nicht sinnvoll.

Es muss daher im nächsten Schritt diskutiert werden, welche Auswirkungen eine Nachtabschaltung hat, wenn keine Leistungserhöhung vorgenommen wird.

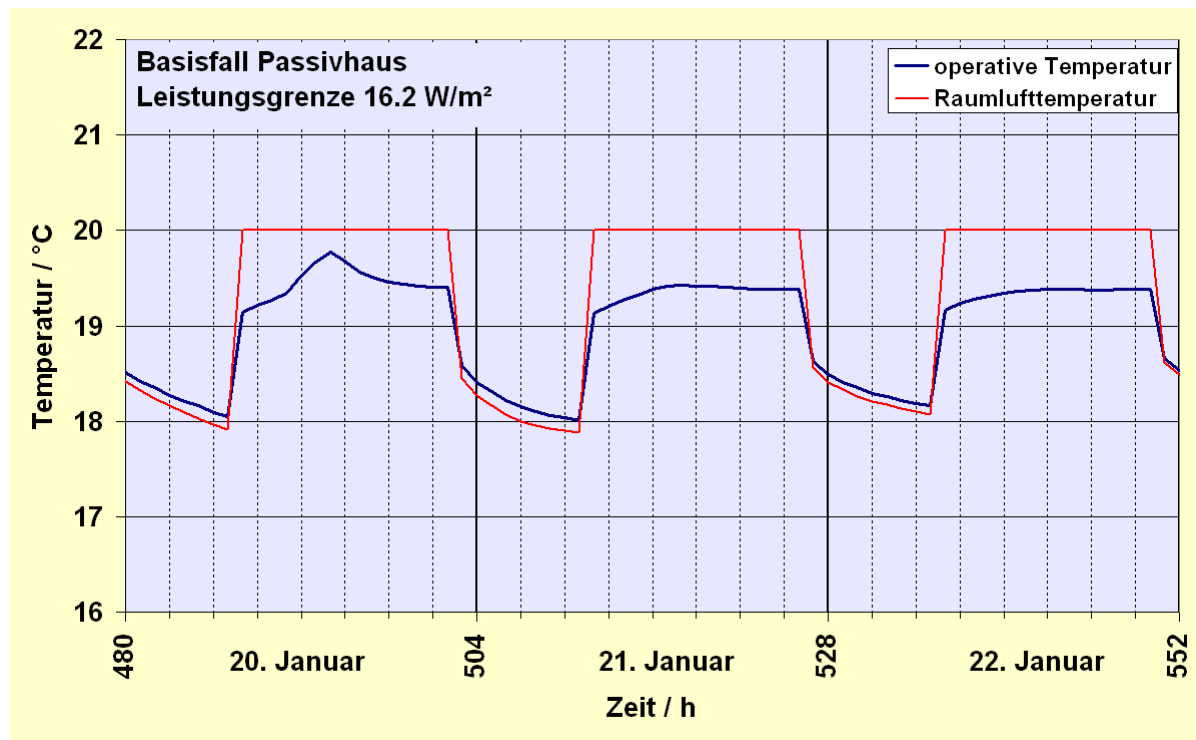


Abbildung 57: Nachtabsenkung im Passivhaus ohne Leistungsgrenze; die maximale erforderliche Leistung beträgt dann 16.2 W/m<sup>2</sup> bzw. 206% der im Basisfall erforderlichen.

Mit einer Leistungsbegrenzung auf die im ursprünglichen Basisfall eintretende maximale tagesmittlere Heizlast von 909 W ergeben sich gemäß Abbildung 58 minimale operative Temperaturen von tagsüber 18.8 °C und früh am Morgen sogar von 18.5 °C (entsprechend  $\Delta PMV = -0.28$ , außerhalb ASHRAE-Comfortclass "A"). Der Haupteffekt entsteht übrigens nicht wegen einer evtl. fehlenden Anheizleistung - nach wie vor sinken die Temperaturen in der Nacht nicht bedeutend gegenüber den Tageswerten ab - sondern wegen der insgesamt im Tagesmittel nun im Lastfall fehlenden mittleren Leistung: Denn das System ist jetzt nur 16 h am Tag im Betrieb. Diese Betriebsweise ist nicht empfehlenswert; zwar wird jetzt etwas mehr Heizwärme eingespart, aber dies geht auf Kosten des Komforts.

Das muss nicht sein, wie ein weiterer, optimierter Fall nach Abbildung 59 zeigt: Hier wurde von einer maximal verfügbaren Leistung von 10 W/m<sup>2</sup> ausgegangen, wie sie in einem Passivhaus normalerweise mindestens vorliegt (für die hier konkret behandelten Häuser ist die vorhandene Leistung sogar höher). Wichtiger ist, dass mit einer optimierten Regelung der Zeitpunkt des Wiederanheizens um 2 h vor den Anforderungszeitpunkt gelegt wurde. Nun werden im Anforderungszeitraum die Kriterien für ASHRAE-Comfortclass "A" wieder eingehalten. Die erzielte Einsparung im Jahreswärmebedarf beträgt nun noch etwa 5%; ob dies den Zusatzaufwand rechtfertigt, soll her nicht diskutiert werden. Jedenfalls zeigt diese Untersuchung, dass auch im Passivhaus mit einer vernünftigen Regelung eine Nachtabschaltung mit komfortablem Ergebnis betrieben werden kann, wenn dies gewünscht wird.

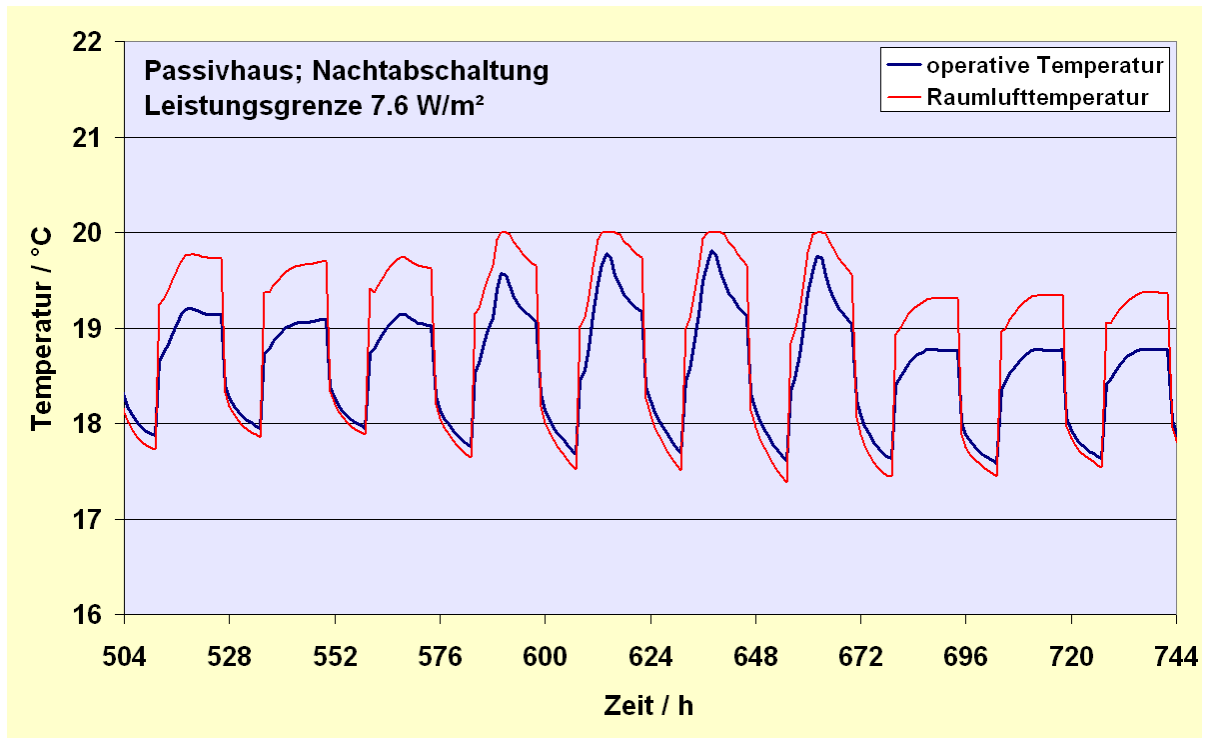


Abbildung 58: Nachtabstimmung mit Leistungsbegrenzung auf die max. tagesmittlere Heizlast im Basisfall (909 W).

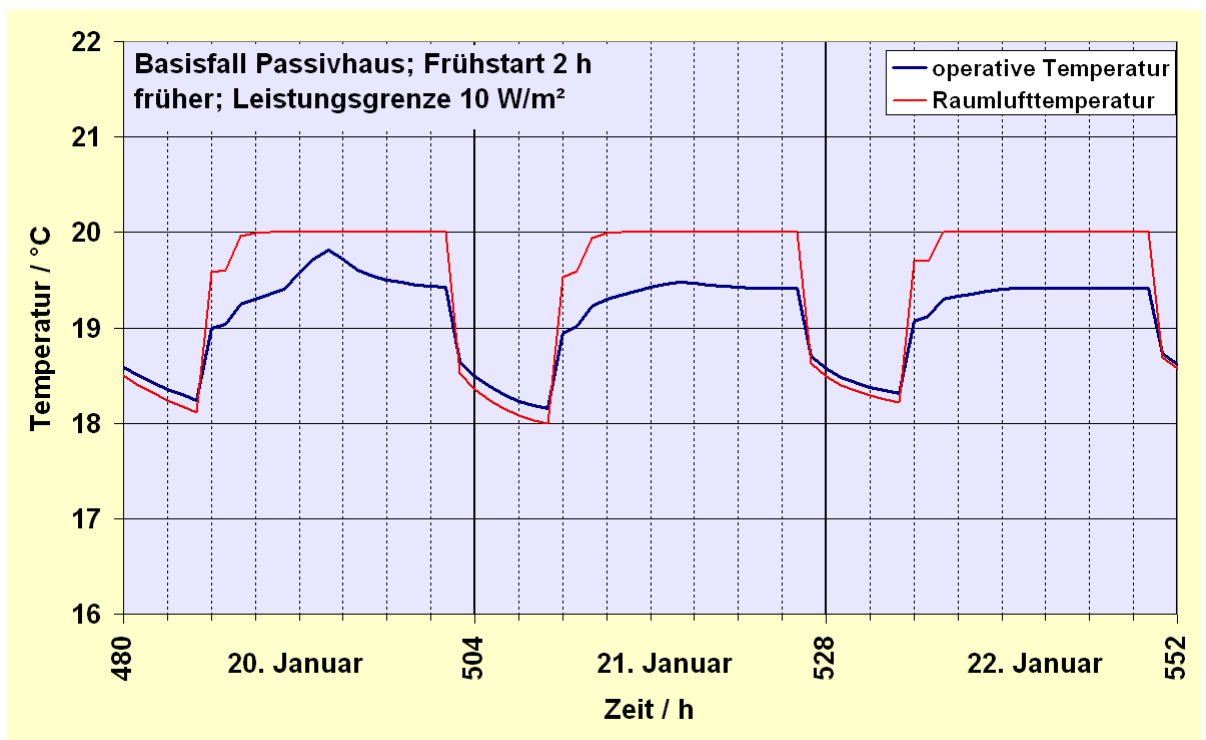


Abbildung 59: Lösung mit Optimierungsregelung: Leistungsbegrenzung auf 10 W/m<sup>2</sup>, Start des Tagbetriebes aber schon 2 h vor der bestehenden Anforderung

Die Frage möglicher Komfortbeeinträchtigungen durch Absenkbetrieb wird in der Heizungsbranche weit bedenklicher gesehen als die bisherigen Ergebnisse zeigen. Die folgende Untersuchung zum Basisfall nach EnEV wird aufklären, dass diese Bewertungsunterschiede begründet sind, sie haben eine reale Grundlage.

Zunächst zeigt Abbildung 60 den Basisfall nach EnEV mit Nachtabsenkung ohne Leistungsbegrenzung. Für einen solchen Betrieb wird nun eine Leistung von 8340 W gebraucht, die um 119% über der ursprünglichen Leistung liegt und somit tatsächlich auslegungsrelevant ist. Die Temperaturen sinken in der Nacht auf unter 15 °C; insbesondere die Temperaturen der Raumbooberflächen lassen sich trotz hoher Leistung ausgehend von derart niedrigen Niveaus nicht schnell auf für die Behaglichkeit wichtige Strahlungstemperaturen anheben (operative Temperaturen um 8:00 um 18 °C trotz hoher Leistung).

Der Heizwärmebedarf sinkt um 1311 kWh auf 80.7 kWh/(m<sup>2</sup>a) und liegt um 12% unter dem EnEV-Basisfall. Immerhin etwa 66 €/a Betriebskosten werden durch die Nachtabschaltung eingespart. Im Vergleich zum Passivhaus ist die Nachtabschaltung somit unter Komfortgesichtspunkten deutlich problematischer und sie führt zu hohen zusätzlichen Leistungsanforderungen - ist aber nicht als unbedeutend bzgl. der Energiekosten anzusehen, wodurch es wahrscheinlicher wird, dass Nutzer tatsächlich von dieser Maßnahme Gebrauch machen (müssen).

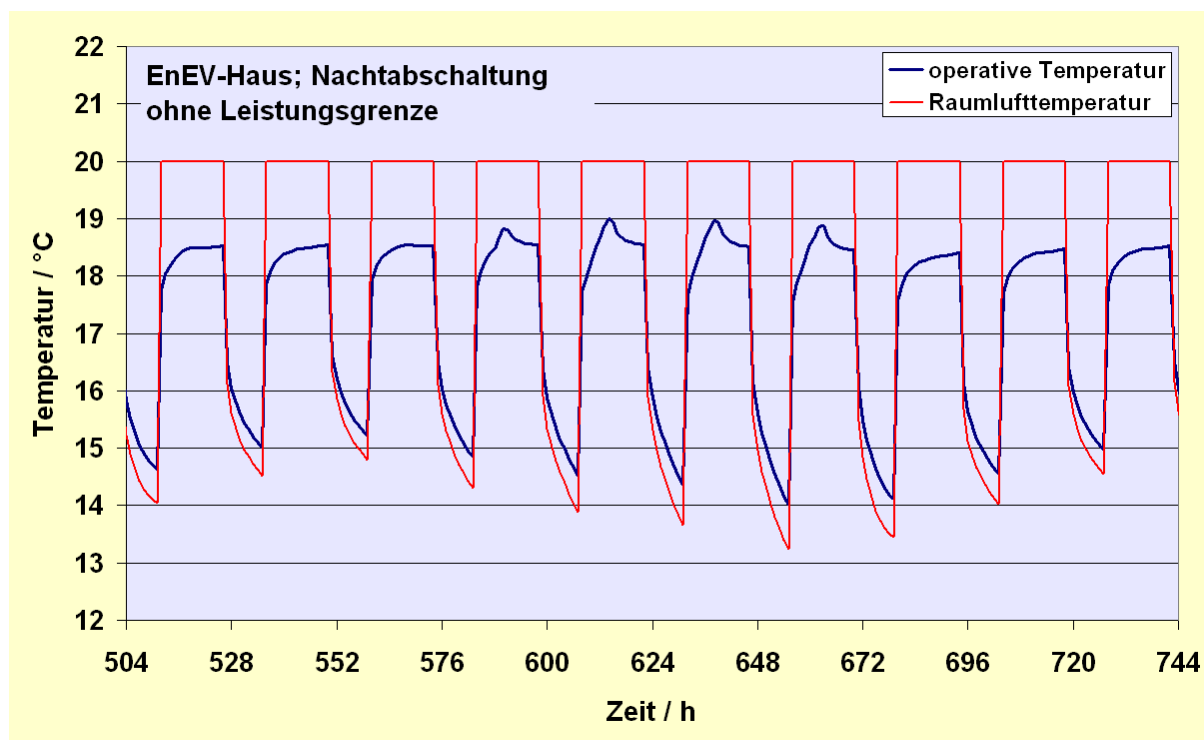


Abbildung 60: Nachtabschaltung beim Haus nach EnEV, ohne Begrenzung der Leistung. Die maximale Heizlast steigt dadurch um 119% auf 70 W/m<sup>2</sup> an.

Vollends problematisch wird es, wenn im EnEV-Fall eine Leistungsbegrenzung auf 100% der Heizung für den Fall des Durchheizens (3825 W) vorgenommen wird und nun das Nachtabschaltungskonzept durchgeführt wird. Die "Einsparung" beträgt nun immerhin 1594 kWh oder 14%, aber: Die operativen Temperaturen liegen jetzt



wochenlang ganze Tage um und unter 18 °C, mit minimalen Werten um 16 °C, wie es Abbildung 61 zeigt. Hier handelt es sich um dramatische Defizite bei der Behaglichkeit. Vor diesem Hintergrund ist völlig verständlich, warum die Heizungsbranche Leistungsreserven für die Wiederanheizung bei Objekten mit Wärmeschutzstandards gemäß EnEV (oder schlechter gedämmt) fordert. Diese Forderung ist bei diesen nicht besonders gut gedämmten Gebäuden gerechtfertigt.

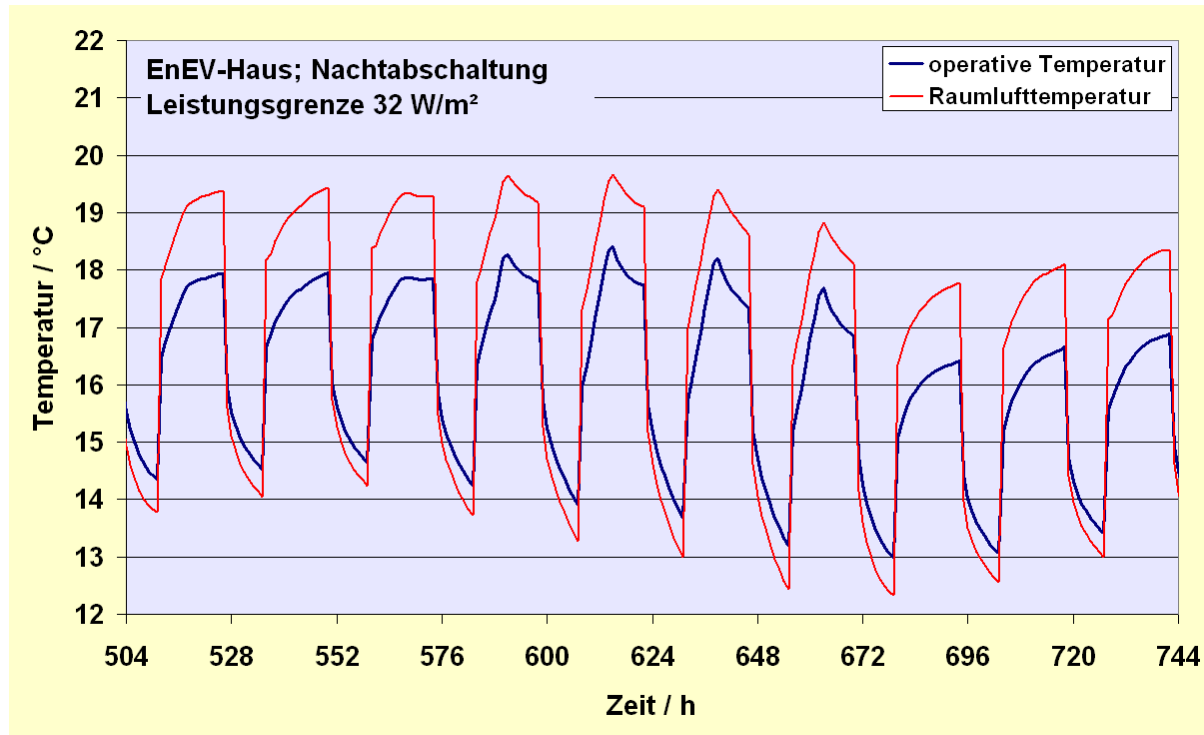


Abbildung 61 Nachtabschaltung beim EnEV-Haus, Begrenzung der Leistung auf 100% der ursprünglichen Heizlast von 3825 W.

Zusammenfassend kann zum Thema Nachtabsenkung / Nachtabschaltung festgehalten werden: Die im Passivhaus maximal erzielbaren Einsparungen von etwa 100 kWh/a lohnen den zusätzlichen Aufwand für mehr Leistung in Einzelwohnungen eher nicht. In größeren Objekten kann es sinnvoll sein, die Regelungsstrategie noch weiter zu optimieren (z.B. keine Nachtabsenkung, wenn ohnehin sehr hohe Heizlasten vorliegen - das sind ca. zwei bis vier Wochen im Jahr). In schlechter gedämmten Gebäuden bringt die Nachtabschaltung zwar merkliche Energieeinsparungen, Komforteinbussen sind aber nur dann vermeidbar, wenn es eine ausreichende Leistungsreserve gibt. Durch die letztere Erfahrung erklärt sich der hohe Stellenwert der Anheizleistung bei der aktuellen Diskussion in der Heizungsirtschaft, die sich auf Gebäude mit durchschnittlich viel höherer Heizleistung und viel kleinerer Gebäudezeitkonstanten als bei Passivhäusern bezieht.

### 3.11 Vergessenes geöffnetes Fenster

In diesem Abschnitt soll eine extreme Störung des Systems behandelt werden: Es wird (ausgerechnet in der kritischen Kälteperiode) von 8:00 bis 17:00 das Fenster im Schlafzimmer (Zone 4) versehentlich ganz geöffnet stehen gelassen. Dies ist sicher kein Standardverhalten, allein aus Sicherheitsgründen ist ein solcher Fall nicht empfehlenswert. Wenn Personen im Haus sind, werden sie die Situation bemerken und das Fenster bereits früher wieder schließen. Bei Abwesenheit aller Bewohner während des Tages könnte eine solche Extremsituation aber unbeabsichtigt (und selten) schon einmal vorkommen. Wie reagiert ein Passivhaus auf eine solche Störung?

Abbildung 62 zeigt die Temperaturverläufe um den 21. Januar; ausgegangen wird von einer zusätzlichen Dauerlüftung mit 900 m<sup>3</sup>/h ab 8:00 über 9 h. Die Innentüren sind geöffnet, die Heizleistung ist auf 10 W/m<sup>2</sup> begrenzt. Während die Lufttemperatur im unmittelbar betroffenen Raum fast instantan auf um 10 °C zurückgeht, sinken die operativen Temperaturen erst allmählich ab, da Wärme aus den Bauteilen erst zeitversetzt durch den Wärmeübergang an die Luft abgegeben werden muss (das ist auch der Grund, weshalb die Lufttemperatur nicht auf Außentemperatur absinkt). Auch die Temperaturen in anderen Räumen sind nach etwa einer Stunde beeinträchtigt - dargestellt sind die Wohnzimmertemperaturen, die auf um 18,5 °C absinken und im betreffenden Zeitraum recht stabil dort verbleiben; der Temperaturrückgang ist stark genug, um ihn zu bemerken - daher wird ein anwesender Bewohner auch reagieren; die Behaglichkeitsdefizite im Wohnzimmer sind aber andererseits auch nicht extrem störend, wodurch insbesondere nach Behebung der Ursache behagliche Verhältnisse in anderen als den direkt betroffenen Räumen praktisch sofort wiederhergestellt sind.

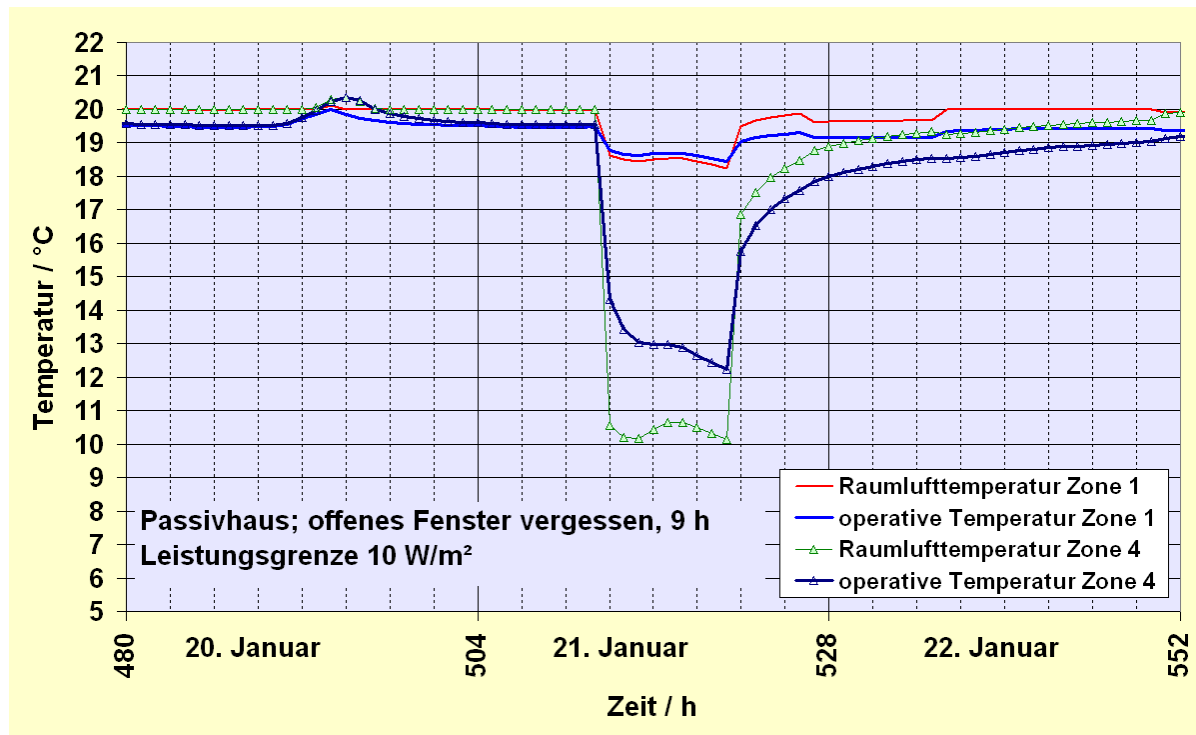


Abbildung 62: Auswirkungen eines versehentlich vergessenen, insgesamt geöffneten Fensters in Zone 4. Am 21. Januar, von 8:00 bis 17:00.

Im betroffenen Raum wird um 17:00 nichts anderes getan, als das Fenster wieder geschlossen. Die Lufttemperatur steigt dann praktisch sofort wieder auf 17 °C an, ohne dass eine zusätzliche Heizaktivität erforderlich wäre. Die Oberflächentemperaturen steigen langsamer, erreichen aber nach 2 h auch 17 °C - ebenfalls ohne weitere Maßnahme. Insgesamt sind die Auswirkungen weit weniger dramatisch, als befürchtet werden könnte. Die Ursache für das auch in diesem Störfall sehr gutmütige Verhalten liegt in der gespeicherten Wärme in tieferen Schichten der Baukonstruktion, welche auch nach 9 h Dauerlüftung nicht restlos abgegeben wird. Noch deutlich längere Phasen mit völlig geöffneten Fenstern würden natürlich auf Dauer zu einer viel weitergehenden Auskühlung führen. Solche Störungen sind aber sehr unwahrscheinlich; sie setzen lange Abwesenheitszeiten aller Bewohner bei offen stehenden Fenstern voraus – aus ganz anderen Gründen kein empfehlenswerter "Betriebszustand" eines Hauses, der in der Realität praktisch nicht vorkommt (selbst bei Gewalteinwirkung werden Fenster provisorisch mit Pappen o.ä. verschlossen).

Der Vollständigkeit halber sei darauf hingewiesen, dass auch eine regelmäßige Wiederholung des Vorgangs "vergessenes geöffnetes Fenster" auf Dauer dazu führen würde, dass das Gebäude über Wochen hinaus auskühlt – für einen solchen Dauerwärmeverlust ist die installierte Leistung nicht ausreichend. Auch ein solcher permanenter Wiederholungsfall ist allerdings nicht als realistische Verhaltensweise anzunehmen. Vielmehr werden Bewohner, sollte das "Offenlassen" einmal vorgekommen sein, in der Folge sorgfältiger darauf achten, dass sie beim Verlassen des Hauses die Fenster schließen. Man denke an Regenfälle und Wind.

### **3.12 Härtetest: Besonders strenge Frostperiode**

Die folgende Untersuchung dient dem Test der Robustheit des Verfahrens gegenüber außerordentlichen, extremen Kältesituationen. Dazu wird der verwendete Klimadatensatz in folgender Weise abgeändert:

Über einen Zeitraum von 16 Tagen (16. Jan. bis 31. Jan., jeweils inklusive) wird die Außenlufttemperatur um 4 K niedriger angesetzt. Abbildung 65 zeigt den resultierenden Außentemperaturverlauf.

Durch diesen Ansatz wird u.a. eine extreme Frostperiode artifizial eingefügt, wie sie im mitteleuropäischen Klima durchaus einmal innerhalb von 20 Jahren vorkommen kann (vgl. dazu z.B. die Messdaten, die in Abbildung 2 wiedergegeben sind). Darüber hinaus enthält dieser mit „DYNFFMT“ bezeichnete Datensatz auch stark bewölkte Zeiträume mit sehr wenig Strahlung, welche nun ebenfalls mit untypisch kalten Außentemperaturen kombiniert werden.

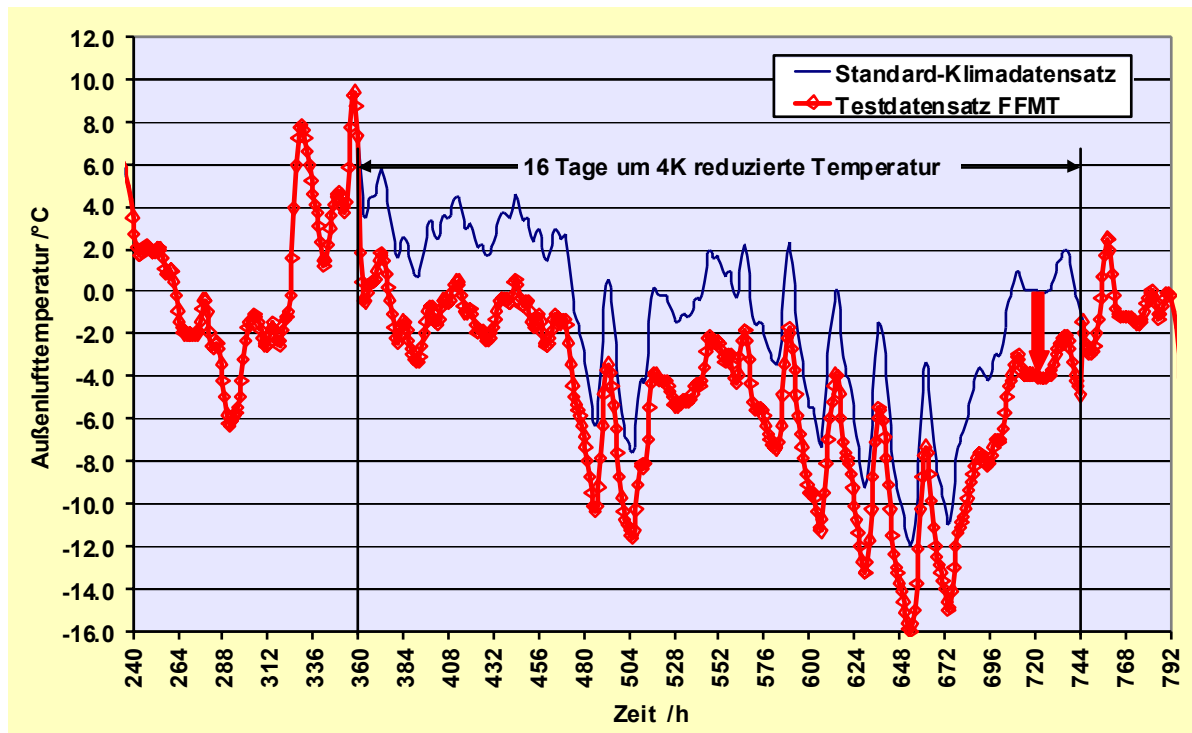


Abbildung 63: Testdatensatz mit während 16 Tagen um 4 K reduzierten Außentemperaturen ("extreme Frostperiode"). Die Absenkung beginnt am 16. Januar und endet am 1. Februar (jeweils 0:00). Sie enthält sowohl eine typische Hochdruckwetterlage (Stunden 576 bis 672) als auch eine kalte, strahlungsarme Zeiträume (Stunden 384 bis 480) in dem Zeitraum, in welchem auch im Standardjahr die maximale Heizlast aufgetreten war.

### 3.12.1 Basisfall Passivhaus: Endhaus Kronsberg / Hätettest Frostperiode / ohne Leistungsbegrenzung

Abbildung 64 zeigt den Heizleistungsverlauf beim Endhaus mit dem Extremklimatensatz DYNFFMT; es wurde keine Begrenzung der Heizleistung vorgenommen, daher liegen die minimalen Raumlufttemperaturen auch nur selten geringfügig (nämlich in den unbeheizten Räumen) unter 20.0 °C. Die maximal auftretende Heizlast steigt gegenüber dem Basisfall um 106 W für das ganze Haus oder um ca. 12% an. Das ist ein überraschend geringer Anstieg; auch die absolute zusätzliche Leistung ist nur sehr gering. Die erforderliche Zusatzleistung ist möglicherweise in der Realität allein dadurch "verfügbar", dass Bewohner unter solch extremen Umständen sich regelmäßig länger im Haus aufhalten und dort Aktivitäten entfalten - dies wurde jedoch im Modell nicht angenommen.

In Abbildung 65 ist die Sortierung über der tagesmittleren Außentemperatur wiedergegeben. Der typische Verlauf der resultierenden Heizkurve hat sich nicht gegenüber dem Basisfall verändert. Ein signifikanter Leistungsanstieg ist nur an einem der kalten Tage erkennbar.

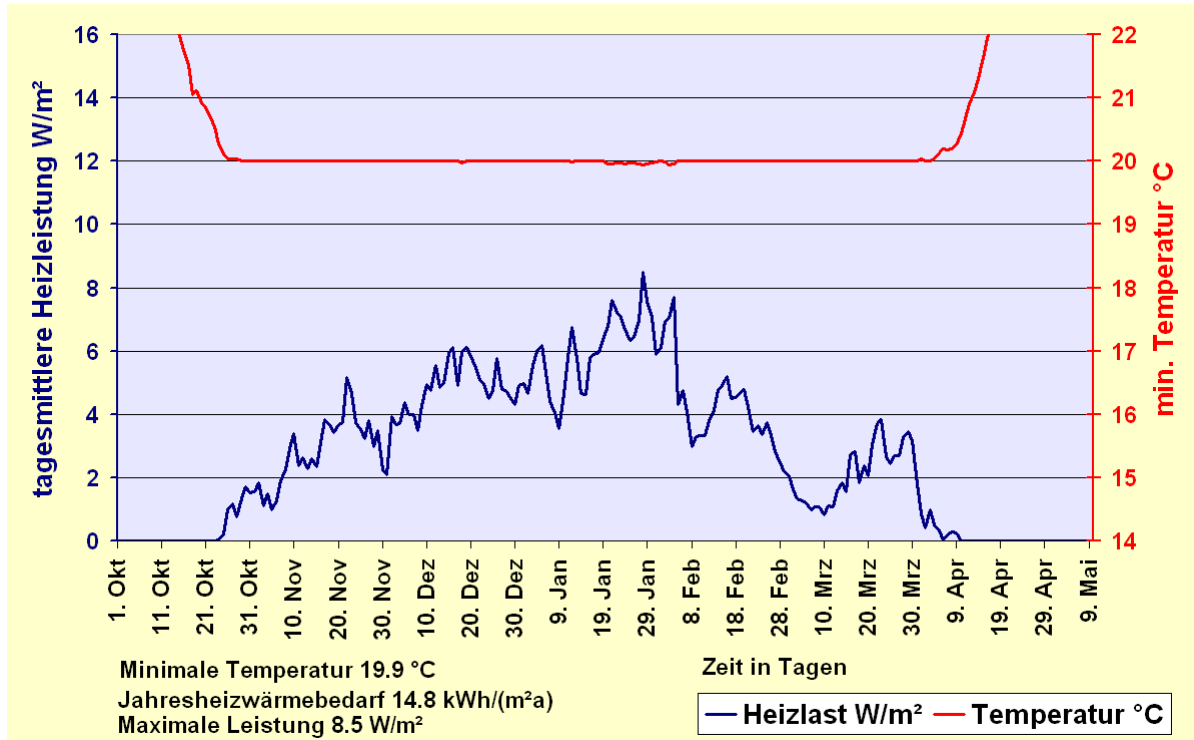


Abbildung 64: Tagesmittlere Heizlast bei 16 Tage um 4 K reduzierter Außentemperatur. Die maximale Heizlast steigt unter diesen Randbedingungen um etwa 12% auf  $1014 W$  an. Der Zeitraum mit der angehobenen Leistung ist gut zu erkennen.

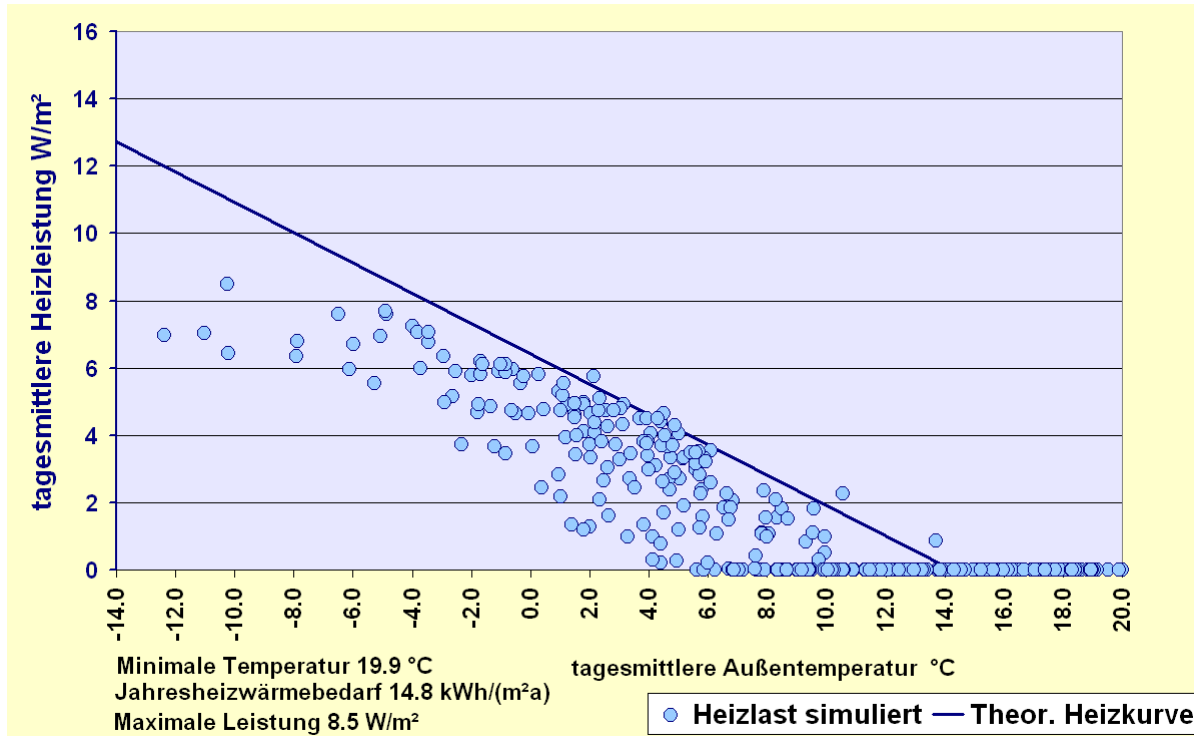


Abbildung 65: Heizkurve für das Testklima mit 16 Tage um 4 K reduzierter Außentemperatur. Der qualitative Verlauf der Kurve ist unverändert, es werden Werte bei niedrigen Außentemperaturen ergänzt. Ein relevanter Anstieg der Heizleistung ist nur an einem Tag ( $-10^{\circ}C$ ,  $8.5 W/m^2$ ) zu erkennen.

### 3.12.2 Basisfall Passivhaus: Endhaus Kronsberg / Härtest Frostperiode mit Leistungsbegrenzung auf die ursprüngliche Maximalleistung

In Abbildung 66 wird nun eine Leistungsbegrenzung auf genau 100% der ursprüngliche Maximalleistung ( $7.6 \text{ W/m}^2$ ) für das Standardjahr vorgenommen; wegen der um 4 K herabgesetzten Außentemperaturen in der Kälteperiode ist diese Leistung für den Extremwinter nicht ausreichend. Daher nehmen die Raumtemperaturen in der betreffenden Zeit gegenüber dem Sollwert ab. Der maximale Rückgang beträgt jedoch nur 0.4 K entsprechend einem  $\Delta\text{PMV} = -0.08$ , somit klar außerhalb jeder Relevanz für die Behaglichkeit. Ist ein Passivhaus auf die maximale Heizleistung eines durchschnittlichen Winters ausgelegt, so ergeben sich auch in einer außerordentlich kalten Periode eines Extremwinters keine spürbaren Defizite bei der Behaglichkeit. Der Vergleich der leistungsbegrenzten Heizkurve (Abbildung 67) mit der für unbegrenzte Leistung erklärt das Ergebnis: Es handelt sich wegen der hohen thermischen Trägheit in jedem Fall nur um wenige Tage, in denen die begrenzte Leistung eine Rolle spielt; bereits wenige Tage später gibt es immer wieder Leistungsreserven, um das Objekt auf die Solltemperaturen zurückzubringen.

Objektiv wird der Zusammenhang in Abbildung 68 untersucht: Die Korrelation zwischen Innen- und Außentemperaturen beläuft sich in diesem Fall mit tatsächlich fehlenden Leistungen auf 0.01 K/K - also weit geringer, als nach dem formulierten Kriterium von 0.025 K/K. Passivhäuser sind damit ohne weitere Maßnahmen "härtest", wenn in einem normalen Winter ausreichende Leistungen vorliegen.



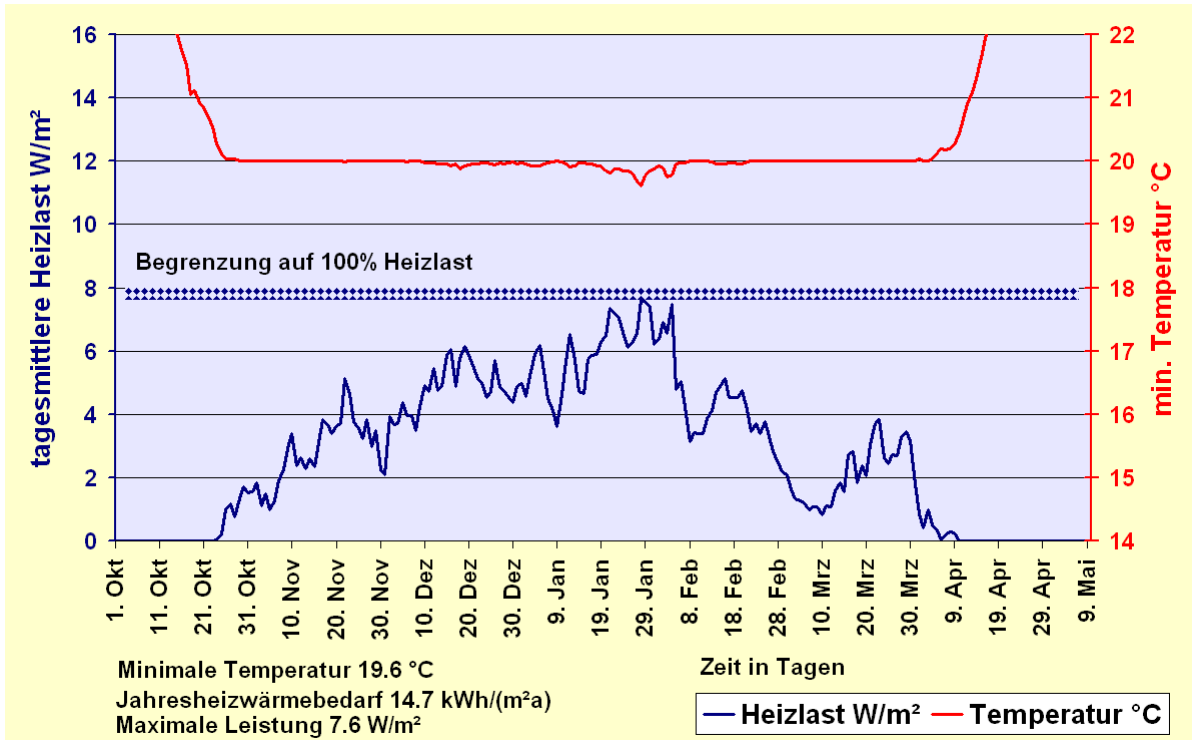


Abbildung 66: Testklima mit 16 Tage um 4°C abgesenkten Außentemperaturen; Leistungs-  
begrenzung auf 100% der Maximalleistung im Basisfall der Simulation (909 W). Das maximale  
Temperaturdefizit beträgt unter diesen Umständen 0.4 K. In den gebauten Häusern ist die  
verfügbare Leistung höher (1613 W). (Endhaus Hannover-Kronsberg Basisfall, Leistungs-  
begrenzung 909 W, Testklima DYNFFMT; DYNBIL)

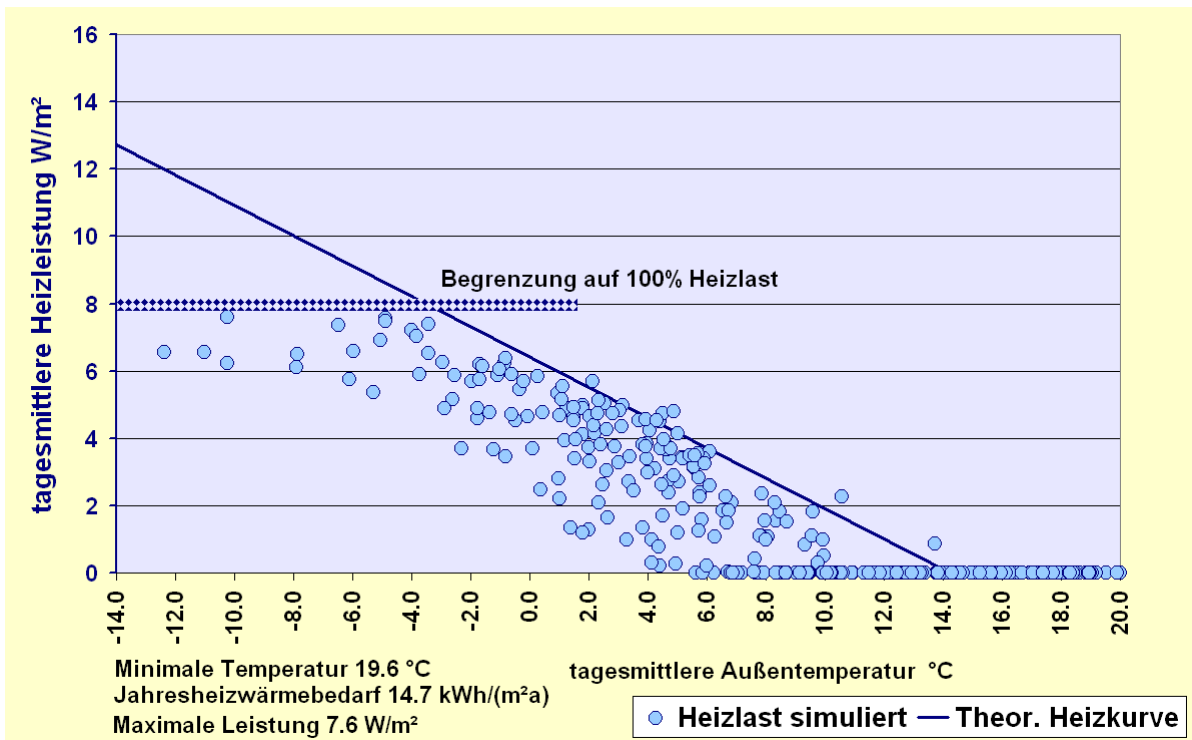


Abbildung 67: Heizkurve für das Testklima mit 16 Tage um 4 °C abgesenkten Außentempera-  
turen; Leistungsbegrenzung auf 100% der ursprünglichen Auslegungsleistung (909 W).  
(Endhaus Hannover-Kronsberg Basisfall, Leistungsbegrenzung 909 W, Testklima DYNFFMT;  
DYNBIL)

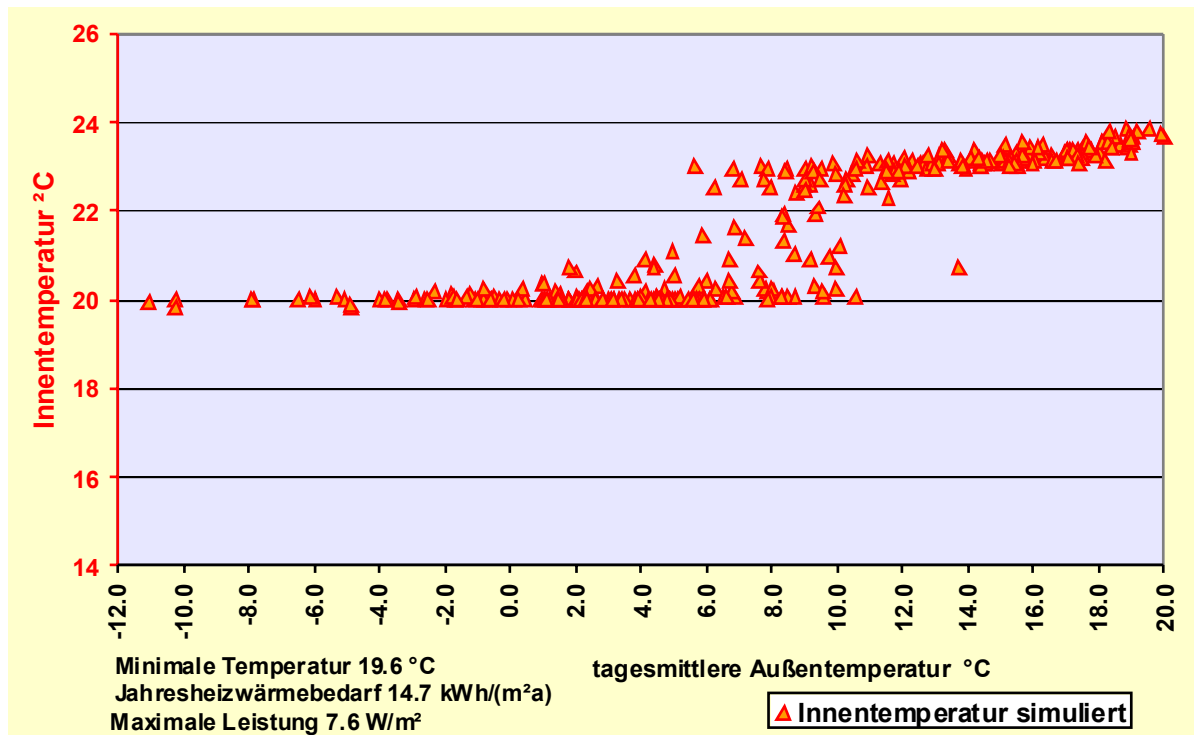


Abbildung 68: Innen/Außentemperatur-Korrelation für das Testklima mit 16 Tage um 4 °C abgesenkten Außentemperaturen; Leistungsbegrenzung auf 100% der ursprünglichen Auslegungsleistung (909 W). Die Abhängigkeit des Innenklimas von den geänderten Außenbedingungen ist kaum zu erkennen. (Endhaus Hannover-Kronsberg Basisfall, Leistungsbegrenzung 909 W, Testklima DYNFFMT; DYNBIL)

### 3.12.3 Basisfall EnEV: Endhaus Kronsberg / Härtetest Frostperiode

In Abbildung 69 ist das Simulationsergebnis für den Basisfall nach EnEV für das Extremjahr für den Fall ohne Leistungsbegrenzung dokumentiert. Die erforderliche Leistung steigt hier um 345 W oder 9% der ursprünglichen Maximalleistung an. Der Absolutwert ist bedeutender als beim Passivhaus. Spannender ist für diesen Standard die Situation, wenn eine Leistungsbegrenzung (auch in diesem Fall auf die ursprüngliche Maximalleistung) vorgenommen wird. Abbildung 70 zeigt den Temperaturverlauf in diesem Fall. Die Temperaturen gehen nun in der betroffenen Zeit merklich stärker zurück als im Passivhaus, nämlich bis auf um 18.5 °C.

Bei weniger gut gedämmten Häusern ist die Toleranz gegenüber besonderen Kälteperioden daher geringer.

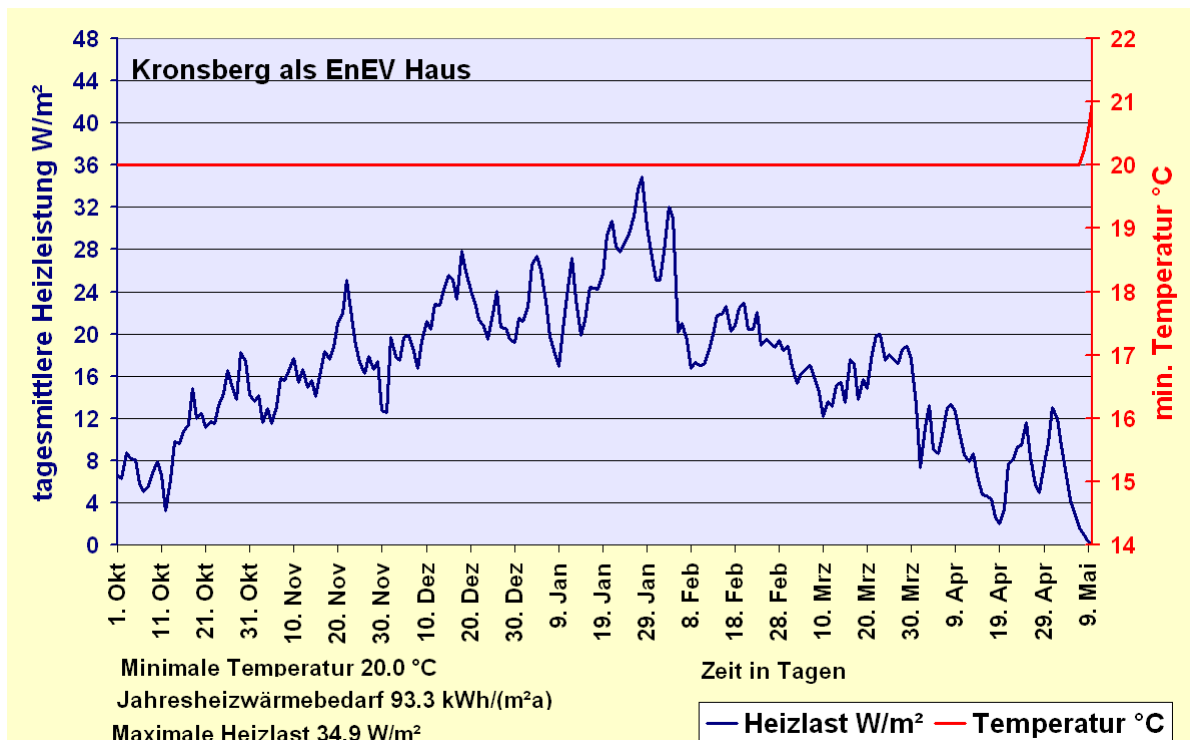


Abbildung 69: EnEV-Variante, ohne Leistungsbegrenzung, Klima mit Frostperiode DYNFFMT, maximale Leistung steigt um 345 W (9% der urspr. Maximalleistung).

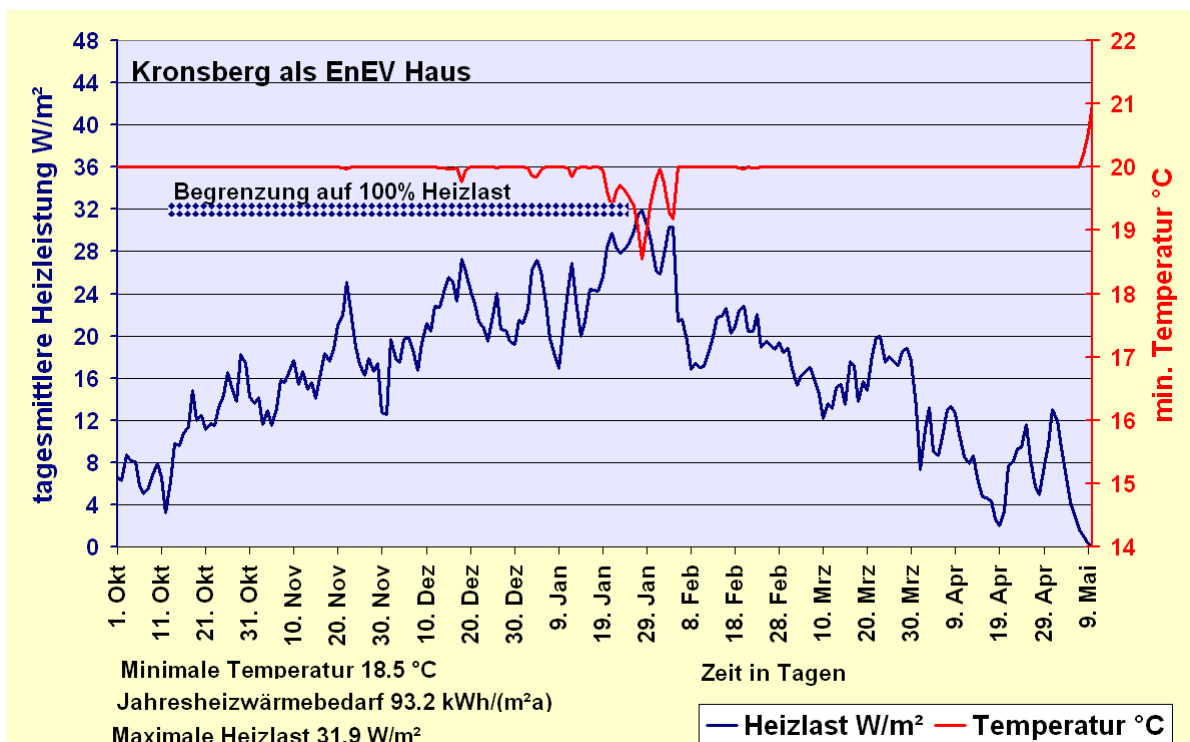


Abbildung 70: EnEV-Variante, Leistungsbegrenzung auf 3825 W, Klima mit Frostperiode DYNFFMT, Innentemperatur geht bis auf 18.5 °C zurück.

## 4 Validierung aus weiteren Messergebnissen

### 4.1 Passivhaussiedlung (22 WE) und Niedrigenergiehauszeile in Wiesbaden am Schloss Freudenberg

Bei der hier beschriebenen Bebauung handelt es sich um die erste Passivhaus-siedlung, die 1997 vom Bauträger Rasch&Partner auf einem Wiesbadener Kon-versionsgelände als erstes Bauprojekt des "Arbeitskreises kostengünstige Passiv-häuser" in elementierter Bauweise errichtet wurde. In dieser Gartenhofsiedlung entstanden drei Baureihen mit insgesamt 46 kostengünstigen Reihenhäusern. Davon sind 24 in einem sehr gutem Niedrigenergie-Standard und 22 im Passivhausstandard gebaut worden.

Zu diesem Projekt existiert umfangreiche Literatur [Rasch 1997], [Schnieders, Such 1998], [Feist, Loga 2000], [Loga, Großklos 1999], [Feist 2001b], [Ebel 2003], [Flade 2003]. Es war Gegenstand einer umfassenden wissenschaftlichen Überprüfung bzgl. der technischen Funktion, der tatsächlichen Verbrauchswerte, des Nutzerverhaltens und der Nutzerzufriedenheit. Das zentrale Forschungsprogramm wurde im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft vom Institut Wohnen und Umwelt/Darmstadt durchgeführt. Die hier vorliegende Auswertung vertieft die Analyse von Messdaten, die im Rahmen des o.g. Forschungsprogramms erhoben worden; der Autor dankt Mark Großklos für die Bereitstellung der Datenreihen. Auf Grund der für die hier maßgebliche Fragestellung geänderten Systemgrenzen und Bezugsflächen können einzelne Zahlenwerte geringfügig von den in [Ebel 2003] publizierten Werten abweichen. Insbesondere wurden für die hier vorliegende Auswertung die Gebäude-datensätze auf Grundlage von [Feist 2001b] in die PHPP-Berechnung übernommen. Die hier dargestellten Heizgeraden sind wie in der gesamten Systematik der vorliegenden Studie vollständig aus den baulichen Daten der Gebäude ermittelt; sie stellen daher im Idealfall die oberen Tangenten an die Messpunkte der tagesmittleren Heizlast dar. Dies ist zu unterscheiden von den in [Ebel 2003] verwendeten empirischen Ausgleichsgeraden. Exemplarisch wird der Zusammen-hang zwischen den beiden Ansätzen in Abbildung 71 für das Messjahr 1999/2000 erläutert:

Die Heizlastgerade (Heizleistung  $P$  über der tagesmittleren Außentemperatur  $\vartheta_a$ ) bestimmt sich nach PHPP zu

$$P'' = -0.459 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K}) (20 \text{ °C} - \vartheta_a) + 4.0 \text{ W}/\text{m}^2,$$

wo  $-0.459 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K}) = 1222 \text{ W} / 102.5 \text{ m}^2 / (20 \text{ °C} - (-6 \text{ °C}))$  der temperaturspezifische Wärmeverlust (Transmission und Lüftung, vgl. Tabelle 8), bezogen auf die Wohn-fläche und  $4.0 \text{ W}/\text{m}^2$  die Summe aus den inneren Wärmequellen und der Wärmeab-gabe der Heizrohrleitungen sind. Erwartungsgemäß bildet die Heizlastgerade in guter Näherung eine von oben an die Punkteschar der Messwerte angelegte Tangente.

Im gleichen Diagramm ist auch die Ausgleichsgerade

$$P''' = -0.2977 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K}) \vartheta_a + 3.3455 \text{ W}/\text{m}^2$$

dargestellt, welche mit  $-0.2977 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K}) * 102.5 \text{ m}^2 = 30.5 \text{ W/K}$  eine wesentlich geringere Steigung aufweist, als die oben zu  $47 \text{ W/K}$  bestimmten differentiellen Wärmeverluste. Die Steigung der Ausgleichsgeraden stimmt mit dem in [Ebel 2003] auf Seite 51 publizierten Wert im Rahmen der Messgenauigkeit überein. Die Ermittlung der Ausgleichsgeraden führt wegen der Streuung der Einzelwerte durch unterschiedlich hohe solare Gewinne und die Begrenzung dieser Streuung auf positive Werte systematisch zu einer niedrigeren Steigung als die tatsächlichen differentiellen Wärmeverluste. Diese Analyse zeigt, dass die allgemein übliche empirische Ermittlung von differentiellen Wärmeverlusten durch Bestimmung von Ausgleichsgeraden für die Punkteschar der Heizleistungen über der Außentemperatur zu einer systematischen Unterschätzung der Wärmeverluste führt.

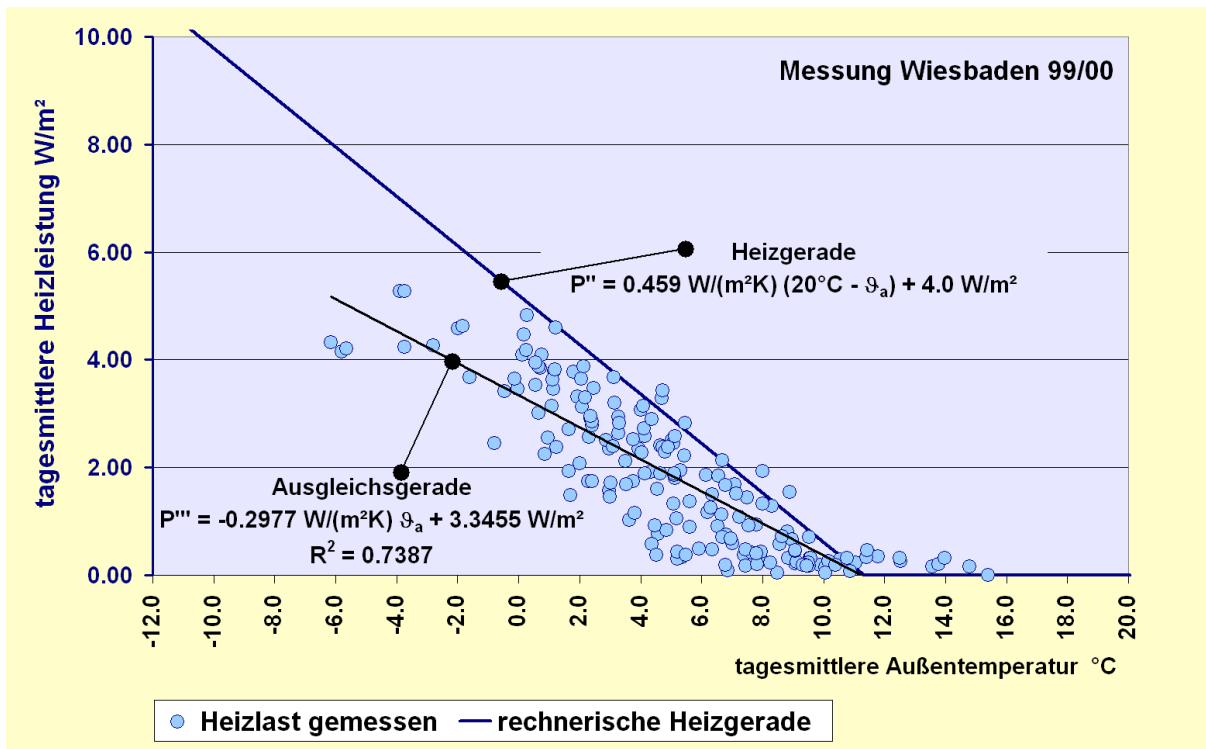


Abbildung 71: Tagesmittlere wohnflächenbezogene Heizleistung im Mittel der 22 Passivhäuser der Siedlung in Wiesbaden-Dotzheim, Oktober 1999 bis März 2000 (3. Heizperiode); vgl. dazu Abbildung 4.2.4-1 in [Ebel 2003], der Umrechnungsfaktor beträgt  $A_{\text{Wohn}} = 102.5 \text{ m}^2$ . Die Ausgleichsgeraden der beiden Abb. stimmen überein, sie geben aber nicht den temperaturspezifischen Wärmeverlust wieder; dieser ist mit Steigung  $0.46 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  deutlich höher; die Heizgerade ist (in Übereinstimmung mit der Theorie) die obere Tangente an die Punkteschar.

Tabelle 7: Passivhäuser der Gartenhofsiedlung Wiesbaden am Schloss Freudenberg.



			
Südansicht (Foto: Rasch)		Nordansicht (Foto: PHI)	
<b>Projektbeschreibung</b>			
<b>Adresse</b>	D-65197 Wiesbaden, Hessen		
<b>Generalunternehmer</b>	Rasch & Partner GmbH, Darmstadt		
<b>Architektur</b>	Rasch & Partner		
<b>Fachingenieure</b>	Haustechnik: Fa. InPlan, Pfungstadt		
<b>Bauzeit</b>	Baubeginn: 01.03.1997, Bezug im Herbst 1997		
<b>Gebäudetyp</b>	Reihenhäuser		
<b>Zahl der Wohneinheiten</b>	46 (Passivhäuser 22, Niedrigenergiehäuser: 24 {davon gemessen: 8} )		
<b>Wohnnutzfläche</b>	30 Häuser Achsmaß 6 m ca. 108 m <sup>2</sup> ; 15 Häuser Achsmaß 5 m ca. 88 m <sup>2</sup> ; 1 Haus Achsmaß 3.8 m ca. 68 m <sup>2</sup>		
<b>Konstruktion</b>			
<b>Konstruktionsart</b>	Mischbauweise (tragende Betonkonstruktion innen, Holzleichtbauhülle)		
<b>Fenster u. Verglasung</b>	Drei-Scheiben-Wärmeschutzverglasung, Holzrahmen mit PU-Dämmkern sowie Standardfenster in den Niedrigenergiehäusern		
<b>U-Werte (W/(m<sup>2</sup>K))</b>	Außenwand: 0.13; Boden/Kellerdecke: 0.13; Dach: 0.098; Verglasung: 0.7; Fensterrahmen: 0.66; Fenster gesamt: 0.89		
<b>Haustechnik</b>			
<b>Heizung</b>	Passivhäuser: Heizkörper an Innenwänden; Niedrigenergiehäuser: Heizkörper an den Außenwänden Wärmeversorgung durch Fernwärme		
<b>Lüftung</b>	Passivhäuser: Hausweise Lüftung mit Wärmerückgewinnung aus der Abluft; Endhäuser mit Erdreichwärmeübertrager Niedrigenergiehäuser: Abluftanlagen mit Feuchteregelung		
<b>Warmwasser</b>	Warmwasserbereitung über Wasser/Wasser-Wärmeübertrager aus der im EG-Fußboden verlegten Fernwärmeleitung		
<b>Elektrogeräte</b>	Energiesparberatung für die Bewohner		
<b>Energetische Kenngrößen</b>			
<b>Energiebezugsfl. (TFA)</b>	Passivhäuser: 2274 m <sup>2</sup> ; hier untersuchte Niedrigenergiehäuser (8 WE) 803 m <sup>2</sup>		
<b>Jahresheizwärme- verbrauch (gemessen)</b> (4. Jahr, bei ca. 20°C)	6.4 kWh/(m <sup>2</sup> a) +4.1 kWh/(m <sup>2</sup> a) Rohrleitungswärmeabgabe	<b>Maximale Heizlast (gemessen)</b>	4.2 W/m <sup>2</sup> +1.0 W/m <sup>2</sup> Rohrleitungswärmeabgabe
<b>Heizwärmebedarf (berechnet nach PHPP, gemäß Baudaten, bei 20 °C Innentemperatur)</b>	14.5 kWh/(m <sup>2</sup> a)	<b>Maximale Heizlast nach PHPP; bei 20 °C Innen- temperatur</b>	7.6 W/m <sup>2</sup>



Tabelle 8: Bestimmung der Heizlast für das repräsentative Passivhaus der Gartenhofsiedlung Wiesbaden (durchschnittliches Haus) nach PHPP.

### Passivhaus-Projektierung

### HEIZWÄRMELAST

Objekt:	Passivhaus Wiesbaden Lummerlund					Gebaudetyp/Nutzung:	repräsentatives Haus				
Standort:						Energiebezugsfläche AEB:	102 m <sup>2</sup>				
Wetterregion (01 - 12):	6 Nördlicher Oberrheingraben, z.B. Frankfurt am Main										
Auslegungstemperatur:	Strahlung: Ost Süd West Nord Horizontal										
Wetter 1:	-6.0 °C	15	50	15	5	5	W/m <sup>2</sup>				
Wetter 2:	-1.0 °C	5	5	5	5	5	W/m <sup>2</sup>				

Bauteile	Fläche m <sup>2</sup>	U-Wert W/(m <sup>2</sup> K)	Faktor immer 1.0	TempDiff 1 K	TempDiff2 K	P <sub>T</sub> 1 Watt	P <sub>T</sub> 2 Watt
1. Fassade	49.6	0.131	1.0	26 bzw. 21	=	168 bzw. 136	
2. Perimeter	11.9	0.152	1.0	26 bzw. 21	=	47 bzw. 38	
3. Dach	63.1	0.098	1.0	26 bzw. 21	=	161 bzw. 130	
4. Boden	62.1	0.129	1.0	10 bzw. 10	=	80 bzw. 80	
5.	15.5	0.111	1.0	26 bzw. 21	=	45 bzw. 36	
6.			1.0	26 bzw. 21	=		
7.			1.0	26 bzw. 21	=		
8. Fenster	22.5	0.888	1.0	26 bzw. 21	=	519 bzw. 419	
Wbrücken außen (Länge/m)	65.0	0.0	1.0	26 bzw. 21	=	-57 bzw. -46	
Wbrücken Boden (Länge/m)	0.9	0.9	1.0	26 bzw. 21	=	21 bzw. 17	

**Transmissionswärmelast P<sub>T</sub>** Summe = **984** bzw. **810**

<b>Lüftungsanlage:</b>	wirksames Luftvolumen V <sub>L</sub>	A <sub>EB</sub> m <sup>2</sup>	lichte Raumhöhe m	=	m <sup>3</sup>
Wärmebereitstellungsgrad des Plattenwärmetauschers	η <sub>WRG</sub> 80%				1/h
Wärmebereitstellungsgrad des Erdreichwärmetauschers	η <sub>EW</sub> 8%	ρ <sub>L,Anlage</sub> 1/h	Φ <sub>WRG</sub>	ρ <sub>L,Rest</sub> 1/h	1/h
energetisch wirksamer Luftwechsel n <sub>L</sub>	0.429	(1 - 0.82)		0.029	= 0.109

Lüftungswärmelast P <sub>L</sub>	V <sub>L</sub> m <sup>3</sup>	n <sub>L</sub> 1/h	c <sub>Luft</sub> Wh/(m <sup>3</sup> K)	TempDiff 1 K	TempDiff2 K	P <sub>L</sub> 1 W	P <sub>L</sub> 2 W
	256.2	0.109	0.33	26.0 bzw. 21.0	=	239 bzw. 193	

**Summe Wärmelast P<sub>V</sub>** P<sub>T</sub> + P<sub>L</sub> = **1222** bzw. **1003**

Ausrichtung der Fläche	Fläche m <sup>2</sup>	g-Wert (senkr. Einstrahlung) gl. Blatt Fenster	Reduktionsfaktor	Strahlung 1 W/m <sup>2</sup>	Strahlung 2 W/m <sup>2</sup>	P <sub>S</sub> 1 W	P <sub>S</sub> 2 W
1. Ost	0.00	0.60	0.45	15 bzw. 5	=	0 bzw. 0	
2. Süd	15.99	0.60	0.39	50 bzw. 5	=	187 bzw. 19	
3. West	0.00	0.60	0.45	15 bzw. 5	=	0 bzw. 0	
4. Nord	6.48	0.60	0.37	5 bzw. 5	=	7 bzw. 7	
5. Horizontal	0.00	0.60	0.45	5 bzw. 5	=	0 bzw. 0	
6.				bzw.	=	0 bzw. 0	

**Wärmeangebot Solarlast P<sub>S</sub>** Summe = **194** bzw. **26**

<b>Interne Wärmelast P<sub>I</sub></b>	spez. Leistung W/m <sup>2</sup>	A <sub>EB</sub> m <sup>2</sup>	P <sub>I</sub> 1 W	P <sub>I</sub> 2 W
	2.4	102	245	245

**Wärmegewinne P<sub>G</sub>** P<sub>S</sub> + P<sub>I</sub> = **439** bzw. **271**

P<sub>V</sub> - P<sub>G</sub> = **783** bzw. **732**

**Heizwärmelast P<sub>H</sub>** = **783** W

= **7.64** W/m<sup>2</sup>

<b>Wärmelast, von Zuluft transportiert P<sub>Zuluft;Max</sub></b>	Zulufttemperatur ohne Nachheizung ϑ <sub>Zu,Min</sub> 15 °C	Zulufttemperatur Max. ϑ <sub>Zu,Max</sub> 52 °C	Watt	=	1336	<b>13.0</b> W/m <sup>2</sup>
---	---	---	------	---	------	------------------------------

Abbildung 72 zeigt die gemessenen Werte für die tagesmittlere Heizleistung über der Außenlufttemperatur im zweiten Betriebswinter - dies war der Beginn der Messaufzeichnungen. Die Messwerte liegen bis auf zwei offensichtliche Ausreißer ( $-1.7\text{ °C}$ ;  $6.8\text{ W/m}^2$ ) und ( $17.9\text{ °C}$ ;  $1\text{ W/m}^2$ ) im Rahmen der Messgenauigkeit innerhalb des von der Heizgeraden und der berechneten Maximallast definierten Trapezes. Bei Außentemperaturen unter  $-2\text{ °C}$  nimmt die Heizleistung tendenziell eher wieder ab.

Abbildung 73 zeigt den gleichen Zusammenhang für das Folgejahr 1999/2000. In diesem Jahr gab es niedrigere Außenlufttemperaturen, die zeitweise um  $-6\text{ °C}$  im Tagesmittel lagen. Die maximale Heizleistung trat aber nicht an diesen Tagen, sondern bei um  $-3.8\text{ °C}$  mit  $5.3\text{ W/m}^2$  auf.

Das dritte Messjahr ist in Abbildung 74 dokumentiert. Obwohl auch hier tagesmittlere Außentemperaturen um  $-4\text{ °C}$  vorkamen, stieg die tagesmittlere Heizleistung in diesem Winter auf nur maximal  $4.2\text{ W/m}^2$ . Bei den höheren Außentemperaturen im Umfeld der Heizgeraden ( $+8$  bis  $+13\text{ °C}$ ) liegt nun eine größere Streuung vor, wobei einige Punkte oberhalb der Heizgeraden zu liegen kommen. Dies ist allerdings für die Untersuchung zur maximalen Heizlast nicht von Bedeutung.

Schließlich wird das vierte Messjahr in Abbildung 76 dargestellt. Hier treten bei  $-5$  und bei  $-9\text{ °C}$  tagesmittlere Heizleistungen um  $5.8\text{ W/m}^2$  auf. Alle Werte zu Außentemperaturen unter  $10\text{ °C}$  liegen sauber unter der Heizgeraden. Die Messungen im Winter 2001/02 mit einigen für Wiesbaden eher untypisch kalten Tagen zeigen, dass die Passivhaustechnik gegenüber wetterbedingten Extremsituationen stabil ist. Die Berechnungsmethodik nach dem PHPP-Heizlastverfahren liefert auch in diesem Fall zuverlässige Ergebnisse.

Abbildung 75 zeigt für die Passivhaussiedlung Wiesbaden, dass es im Winter keine Korrelation zwischen den Raumtemperaturen (Ordinate) und den Außentemperaturen gibt. In die Analyse einbezogen wurden ausschließlich Daten aus dem Winterzeitraum vom 1. Oktober bis zum 31. März und nur die Tage, an denen die tagesmittlere Außentemperatur kleiner als  $10\text{ °C}$  war. Bei höheren Außentemperaturen steigt die Raumtemperatur natürlich an, da es sich bei wohnungsüblichen Thermostaten um halbseitige Regler handelt; dies stellt für die thermische Behaglichkeit auch ohne Änderung der Kleidung solange kein Problem dar, wie die Temperaturerhöhung bis maximal etwa  $1\text{ K}$  beträgt; dies ist nach dem Diagramm der Fall. Zum Sommer hin sind wegen der dann leichteren Kleidung höhere Temperaturen nicht nur akzeptabel, sondern sogar wünschenswert (bei  $1\text{ clo}$ ,  $1\text{ met}$  beträgt die optimale operative Temperatur etwa  $23\text{ °C}$ ). Abbildung 75 zeigt somit, dass die in den Häusern der Passivhaussiedlung verfügbare und eingesetzte Heizleistung zu allen Zeiten für gehobenen Komfort ausreichend war. Da die technisch verfügbare Leistung erheblich höher war als die jemals gemessenen tatsächlich aufgetretenen Leistungen ist dies ein Beleg für die Validität des Auslegungsverfahrens.

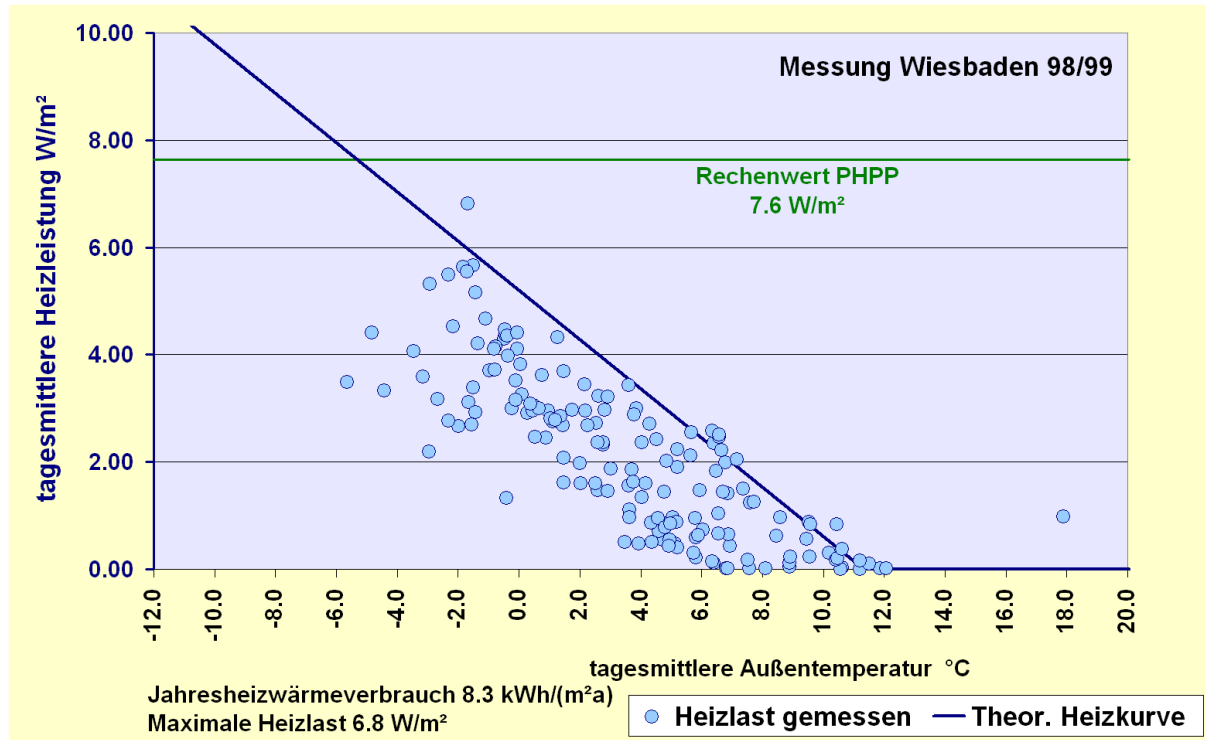


Abbildung 72: Passivhaussiedlung Wiesbaden: Heizkurvendarstellung der Messergebnisse im 2. Betriebswinter (1998/99).

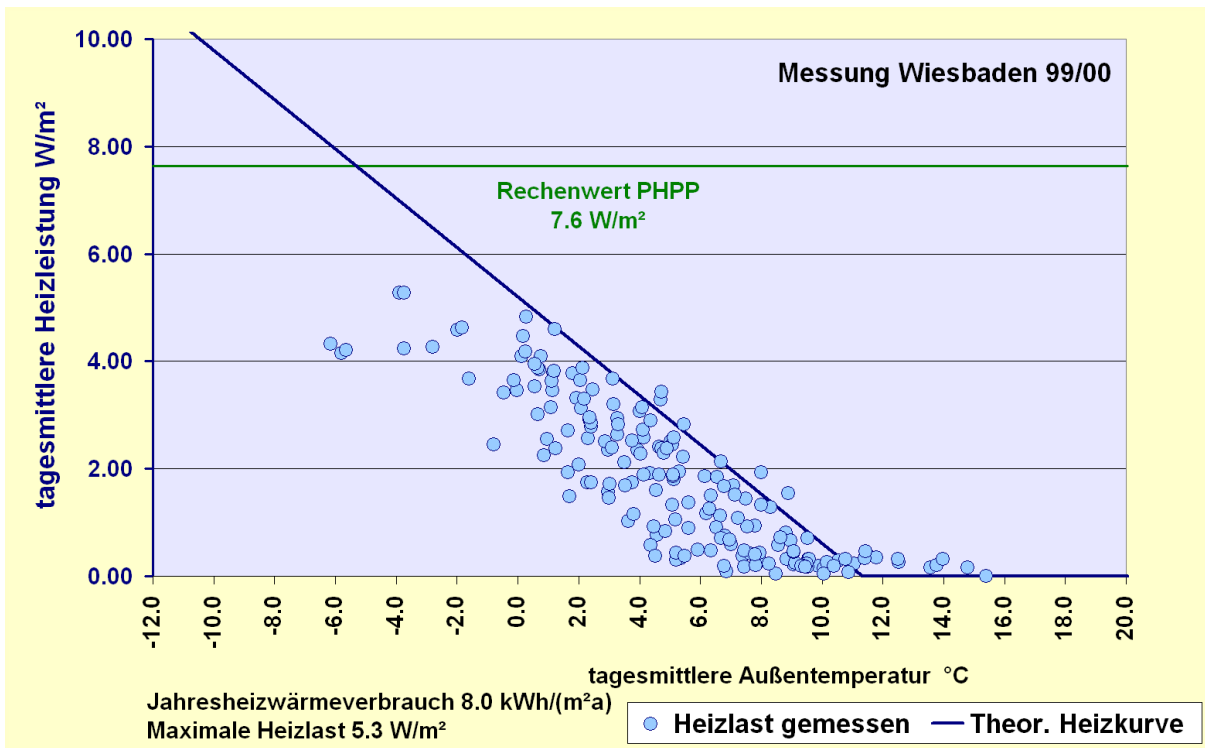


Abbildung 73 Passivhaussiedlung Wiesbaden: Heizkurvendarstellung der Messergebnisse im 3. Betriebswinter (1999/2000).

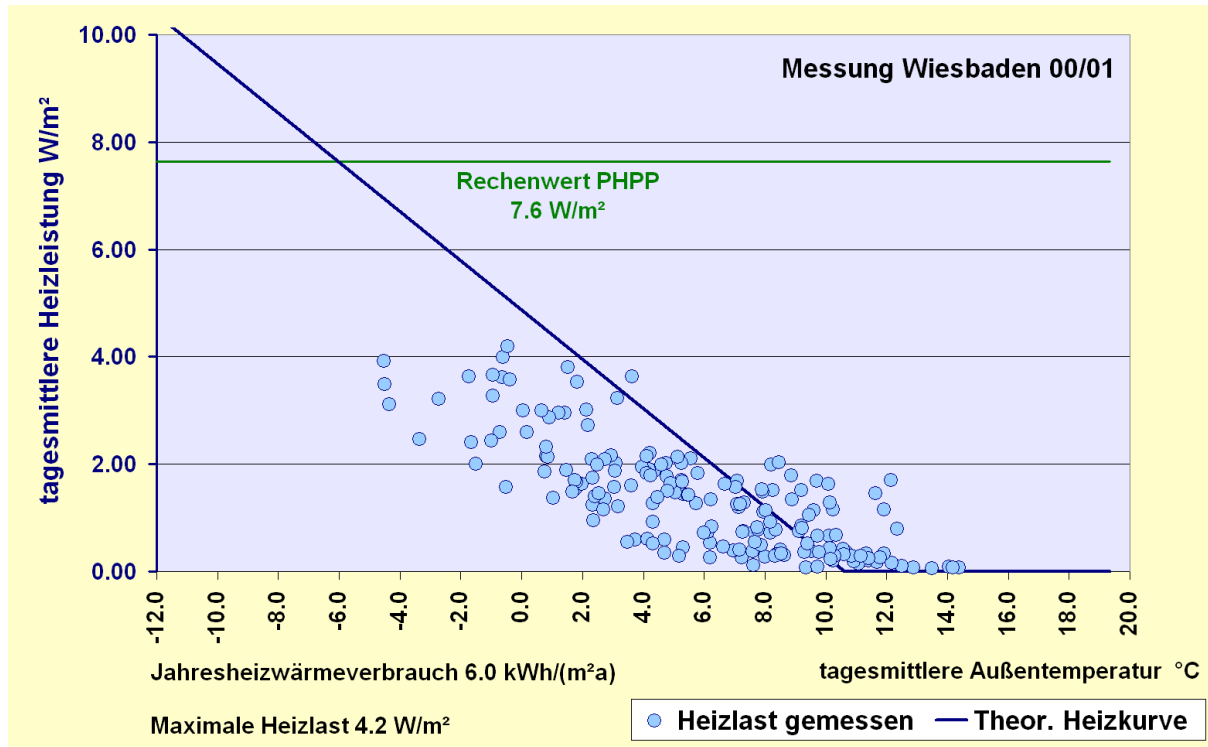


Abbildung 74: Passivhaussiedlung Wiesbaden: Heizkurvendarstellung der Messergebnisse im 4. Betriebswinter (2000/01).

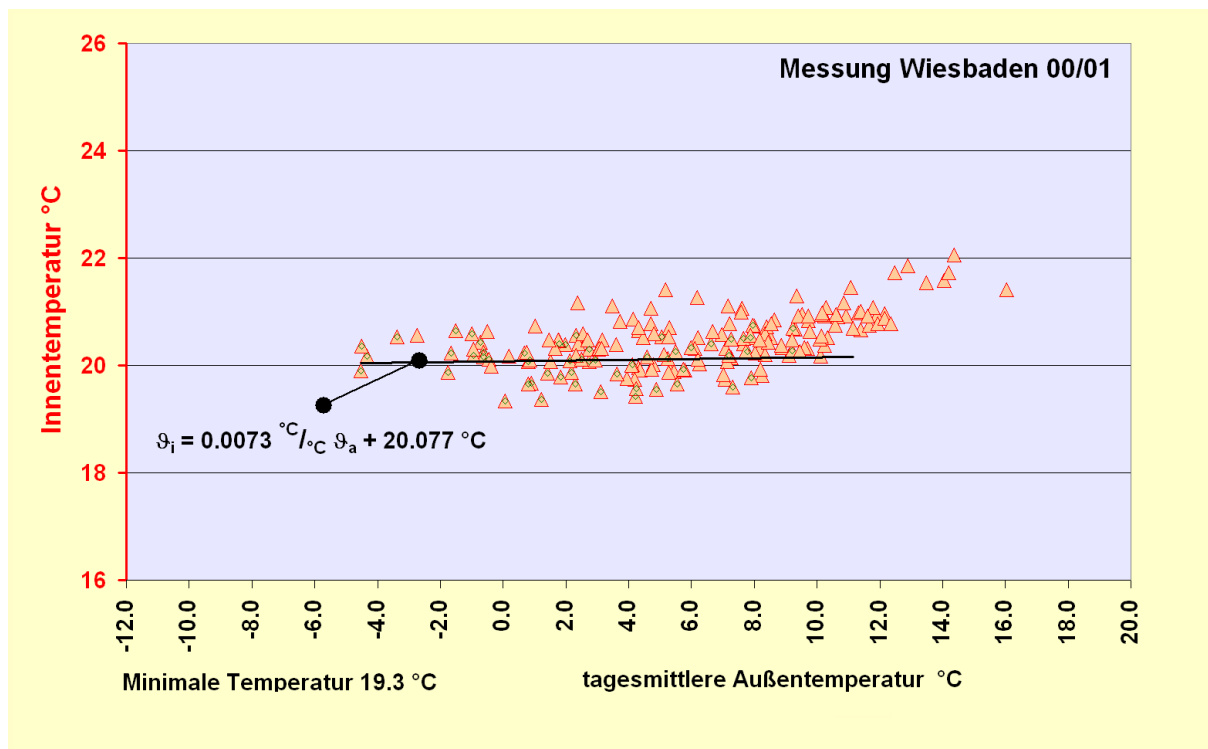


Abbildung 75: Korrelation zwischen Raum- und Außenlufttemperaturen im Kernwinter (nur Außentemperaturen < 10 °C) bei der Passivhaussiedlung Wiesbaden; die Abhängigkeit ist verschwindend gering und nicht signifikant (Verlauf bei Außentemperaturen über +10 °C nicht in die Korrelation einbezogen, da für das Heizverhalten irrelevant).

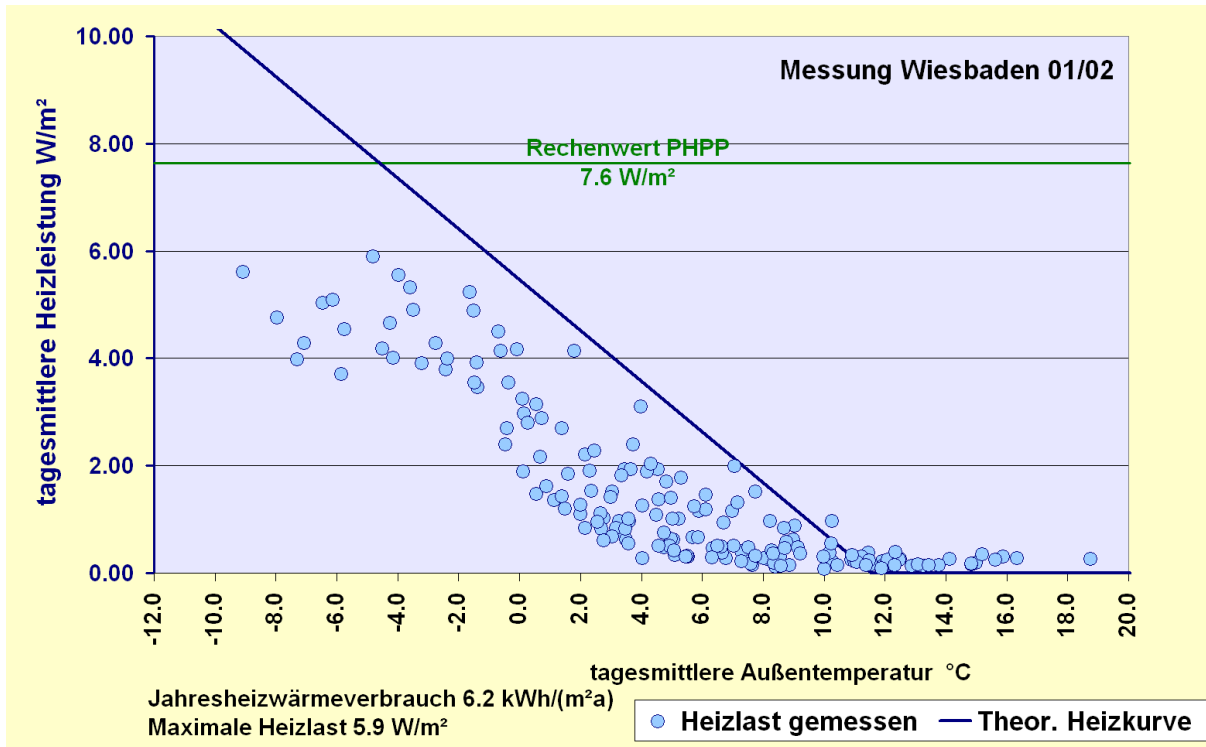


Abbildung 76: Heizkurve für das Messjahr 2001/2002 in der Passivhaussiedlung Wiesbaden.

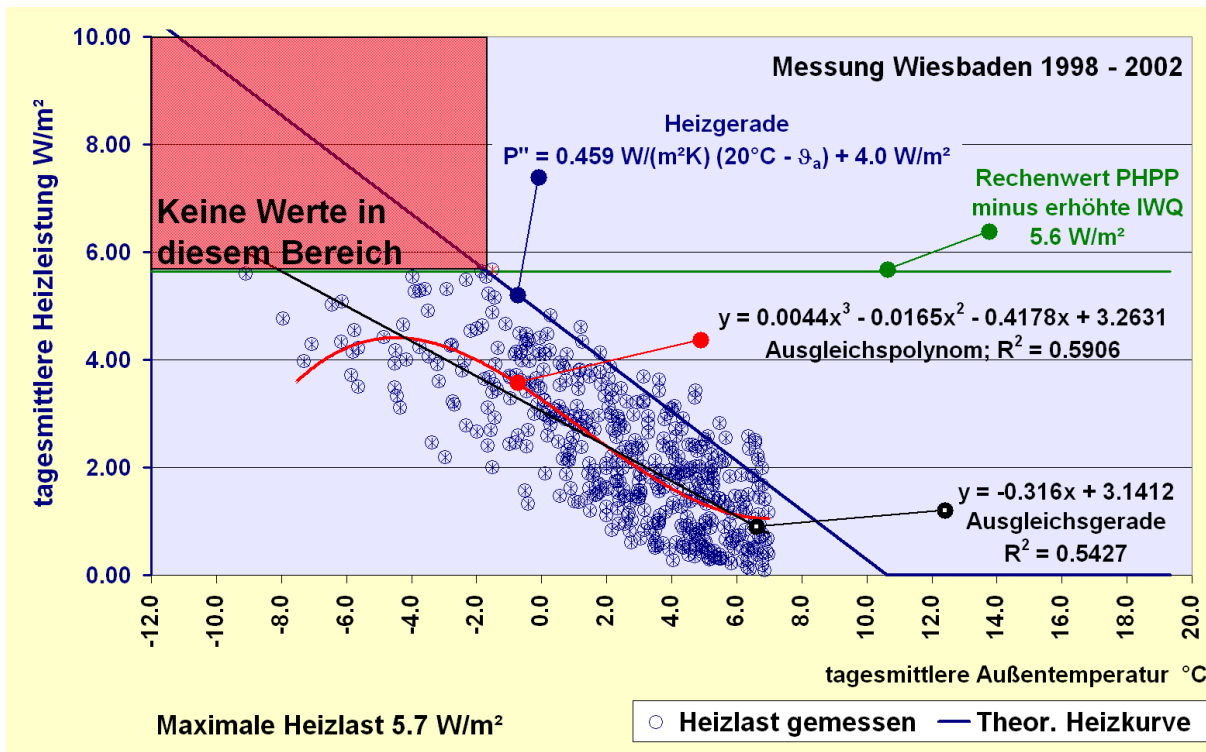


Abbildung 77: Gesamtanalyse der Messdaten von Oktober 1998 bis inkl. März 2002 aus der Passivhaussiedlung Wiesbaden (Durchschnitt von 22 Passivhäusern, nur Messwerte zu tagesmittleren Außentemperaturen unter 7 °C, ein Ausreißer entfernt, innere Wärmequellen nach Messwerten und um Wärmeabgabe der Rohrleitungen ergänzt).

Da zur Passivhaussiedlung Wiesbaden Daten aus vier vollständigen Heizperioden vorliegen, lässt sich eine empirische Analyse auf einer umfassenden Datenbasis durchführen. Abbildung 77 zeigt die Messdaten für den gesamten Zeitraum vom 1.10.1998 bis 31.3.2002 als tagesmittlere Heizlasten über dem Tagesmittel der Außenlufttemperatur:

- Verwendet wurden nur Daten an Tagen, an denen das Außentemperaturmittel kleiner war als 7 °C. Dadurch wird die Nichtlinearität jenseits der Heizgrenze unterdrückt, dies interessiert für den Auslegungsfall des Heizsystems nicht.
- Ein einzelner Ausreißer (-1.7 °C; 6.8 W/m<sup>2</sup>) vom 4.12.1998 wurde entfernt.
- Die rechnerische Auslegungheizlast wurde um die mittlere Rohrleitungs-Wärmeabgabe und die messtechnisch bestimmten Inneren Wärmequellen reduziert (-2 W/m<sup>2</sup>).

Die Grafik zeigt unmittelbar, dass die Messdaten das Trapez zwischen positiver x- und y-Achse unterhalb der Heizgeraden und unterhalb der rechnerischen maximalen Heizlast ausfüllen. Nur wenige Punkte liegen geringfügig über der Heizgeraden, die Maximallast wird ziemlich genau erreicht - und zwar bei Außentemperaturen von -1.5 °C, -4 °C und -9 °C. Wie von der Theorie vorausgesagt, steigt die Heizleistung bei Außentemperaturen unter -2 °C nicht mehr an, sondern bildet bei diesen Gebäuden ein Plateau. Werte aus dem markierten Rechteck oberhalb der Maximallast werden nicht angenommen. Damit liegt für diese Siedlung eine rein empirische Bestätigung des PHPP-Heizlastverfahrens vor. Die Ausgleichsgerade durch die Punktwolke zeigt aus den bereits analysierten Gründen eine kleinere Steigung; bei der linearen Regression wird die nichtlineare Begrenzung bei niedrigen Außentemperaturen sozusagen in eine insgesamt geringere Steigung uminterpretiert. Die Regressionsanalyse mit einem Polynom 3. Ordnung hellt diesen Sachverhalt auf: Nun nähert sich die Steigung im mittleren Bereich dem Wert des temperaturspezifischen Wärmeverlustes an und die Abflachung der Heizkurve bei niedrigen Außentemperaturen wird erkennbar. Die verbleibende Streuung bleibt natürlich überall relativ hoch, dies war auf Grund der stark variierenden anderen Wetterbedingungen (Strahlung, Luftfeuchtigkeit, Windgeschwindigkeit, Bodentemperatur) auch zu erwarten.

Für die im gleichen Baugebiet vermessenen acht Niedrigenergiehäuser sind die Heizkurvenwerte für den Winter 2000/01 in Abbildung 78 wiedergegeben. Die opaken Hüllflächen dieser Häuser sind genauso gut gedämmt wie die Passivhäuser. Sie unterscheiden sich nur durch das Lüftungssystem (Abluftanlage mit Feuchteregelung) und die Fenster (Zweischeiben-Wärmeschutzverglasung mit konventionellem Rahmen); es handelt sich daher um ausgezeichnet gedämmte Niedrigenergiehäuser mit einer rechnerischen maximalen Heizlast von nur 14.5 W/m<sup>2</sup> und einem rechnerischen Jahresheizwärmebedarf von 27 kWh/(m<sup>2</sup>a). Die gemessenen Verbrauchswerte liegen mit nur 10.5 W/m<sup>2</sup> sogar noch darunter; die Ursachen für diese Abweichung sind höhere innere Wärmequellen in den Niedrigenergiehäusern und ein sehr geringes Fördervolumen der Abluftanlagen von durchschnittlich nur 39 m<sup>3</sup>/h (vgl. [Ebel 2003]). Aus Sicht der Raumlufthygiene sind die Außenluftfraten in diesen Niedrigenergiehäusern grenzwertig. Abbildung 78 zeigt, dass die Ansätze für das PHPP-Heizlastverfahren auch auf diese Gebäude, die nicht mehr mit Passivhaustechnik versorgt werden können, immer noch anwendbar sind. Die überwiegende Zahl der Messwerte liegt unterhalb der Heizgeraden, die rechnerische maximale Heizlast wurde um 4 W/m<sup>2</sup> unterschritten.



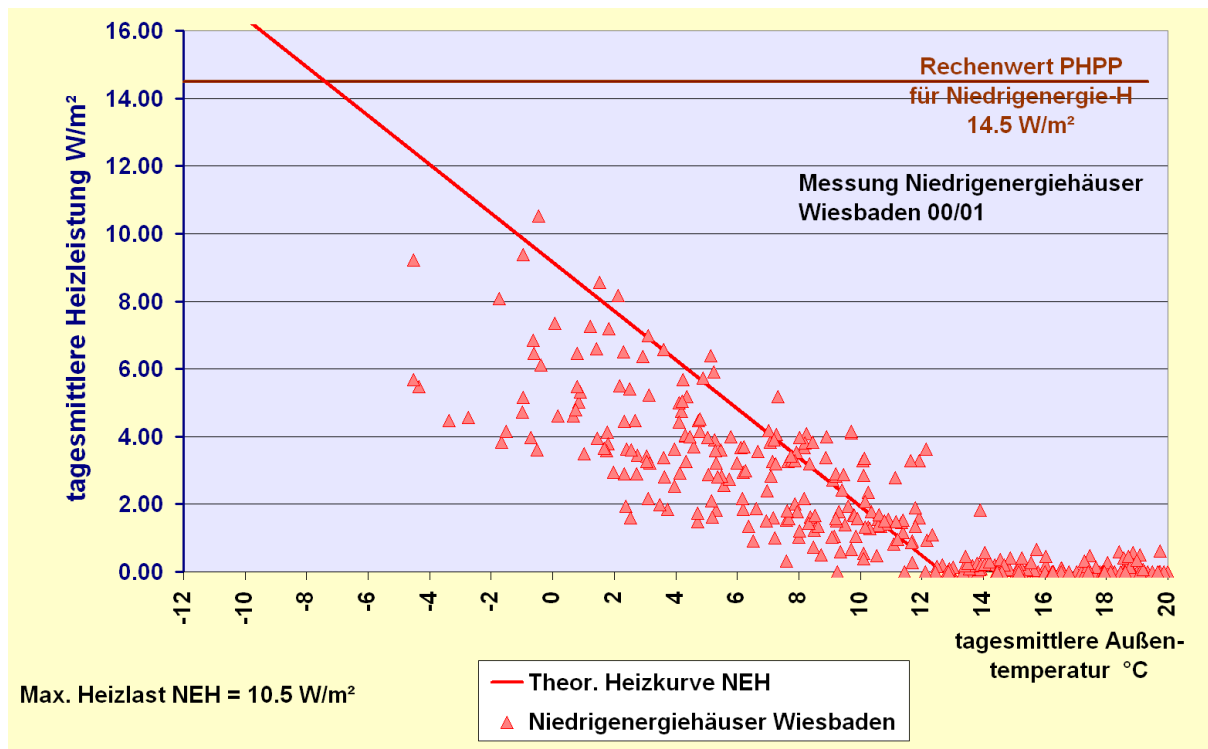


Abbildung 78: Acht Wohnungen in Niedrigenergiehäusern der Siedlung in Wiesbaden: Heizkurvendarstellung der Messwerte für den Winter 2000/01.

Bei den hier behandelten Niedrigenergiehäusern handelt es sich um einen Baustandard, der weit besser gedämmt ist als Objekte nach der EnEV; es handelt sich um "Fast-Passivhäuser", nur die hochgedämmten Fenster und die Lüftungswärmerückgewinnung wurden nicht verwendet.

Die bereits seit 4 Jahren kontinuierlich ausgewerteten Heizleistungs-Messdaten aus der Passivhaus-Siedlung Wiesbaden bestätigen die aus der Simulation abgeleiteten Ansätze vollständig:

- Die rechnerisch nach dem PHPP-Heizlastverfahren ermittelten maximalen Heizlasten wurden in den gesamten vier Messjahren nur an einem Tag (offensichtlicher Ausreißer) überschritten.
- Die Messwerte ordnen sich generell in das Heizkurven-Diagramm ein. Nur einzelne Werte liegen geringfügig oberhalb dieser Geraden und auch dies nur bei höheren Außenlufttemperaturen.
- Die Regressionsanalyse zeigt, dass die spezifischen Heizleistungen bei diesen Häusern unter  $-2\text{ °C}$  Außentemperaturen nicht mehr zunehmen, so wie es die Simulation mit den deutschen Testreferenzjahren zeigt.

Die Überprüfung der Funktion des Heizsystems durch die Korrelationsanalyse zwischen Außen- und Innentemperatur zeigt auch bei diesen Gebäuden, dass die vorhandene Heizleistung offenbar immer ausgereicht hat; dies war allerdings beim vorhandenen System mit an den Innenwänden montierten Heizkörpern und einer hohen Leistungsreserve auch nicht anders zu erwarten. Die empirisch ermittelte obere Begrenzung der aufgetretenen Heizleistungen ist daher nicht etwa durch technische Grenzen des Systems bedingt.

## 4.2 Sozialer Geschosswohnungsbau Kassel Marbachshöhe (23 WE)

Das zweite Betriebsjahr im sozialen Geschosswohnungsbau Kassel Marbachshöhe (2001/02) ist innerhalb des IEA-Projektes Task 28 mit kontinuierlicher Datenerfassung messtechnisch begleitet worden. Die aus diesem Projekt erhaltenen Messdaten werden hier in Bezug auf die Heizleistung ausgewertet. Das Projekt wird an anderer Stelle ausführlich dokumentiert. Der Vollständigkeit wegen ist in Tabelle 9 eine Kurzzusammenstellung der entscheidenden Projektdaten wiedergegeben.

Eine Besonderheit bei diesem Bauprojekt ist, dass die rechnerische Heizlast nach PHPP nur etwa  $8 \text{ W/m}^2$  beträgt, die installierte Leistung in den Wohnungen über Zuluftwärmübertrager und Badheizkörper aber mehr als  $15 \text{ W/m}^2$  beträgt. Damit besteht hier eine dauerhaft hohe Leistungsreserve. Im Verlauf der hier dokumentierten 2. Heizperiode wurde jedoch die verfügbare Leistung keinesfalls ausgenutzt; der maximale gemessene Wert der mittleren Leistung liegt bei  $9.8 \text{ W/m}^2$  (vgl. Abbildung 79). Die gemessenen mittleren Raumtemperaturen liegen immer oberhalb von  $21 \text{ °C}$ . Die Temperaturen zeigen sowohl in kurzen Perioden Schwankungen um etwa  $0.3 \text{ K}$  als auch deutliche Temperaturzunahmen (z. B. ab 19. Januar) um mehr als  $1.5 \text{ K}$ . Solche Temperaturänderungen in einem massiv gebauten Gebäude sind für Passivhäuser eigentlich untypisch. Die höheren Temperaturen Ende Januar und im Februar sind mit hoher Wahrscheinlichkeit auch nicht auf Nutzerwünsche zurückzuführen, denn sie hätten von der verfügbaren Leistung her auch im Dezember/Januar ohne weiteres gehalten oder erreicht werden können. Die sichtbaren Temperaturänderungen sind nach unserer Analyse auf regelungstechnischen Besonderheiten bei diesen Wohnungen zurückzuführen.

Spürbare Temperaturschwankungen in einem sehr massiven und daher auch mit einer hohen inneren Wärmekapazität versehenen Gebäude können nur durch vergleichsweise hohe Schwankungen der zugeführten Energieströme zurückzuführen sein. Für die internen Wärmequellen ist das Angebot stabil und auch die passiv solaren Energieeinträge sind in diesen sehr kompakten Gebäuden mit hauptsächlich west- und ostorientierten Fenstern weder im Gesamtumfang noch bei den Schwankungen entscheidend. Tatsächlich zeigt sich nach Abbildung 80 in der gewohnten Heizkurvendarstellung, dass die tagesmittleren Gesamtleistungen der zugeführten Heizwärme über das gesamte Außentemperaturspektrum stark schwanken, und zwar im Hauptfeld unabhängig von der Außentemperatur (Intervall  $0 \text{ °C}$  bis  $11 \text{ °C}$ ) zwischen ungefähr  $0$  und der Maximalleistung von etwa  $8 \text{ W/m}^2$ .

Das Diagramm ist am ehesten noch vergleichbar mit dem in Abschnitt 3.3.4 dokumentierten "großzügig beheizten Einzelhaus". Dort war das Ergebnis auf ein Nutzerverhalten mit einer Ähnlichkeit zur Zweipunktregelung zurückzuführen - hier handelt es sich jedoch um die Mittelwerte der Leistungen von 23 Nutzern, aus denen sich solche Besonderheiten normalerweise herausmitteln.

Trotz dieses untypischen Ergebnisses wird die nach dem PHPP-Verfahren bestimmte Heizlast nur an einem Tag überschritten und auch an diesem werden trotz verfügbarer höherer Leistungen  $10 \text{ W/m}^2$  nicht erreicht.

Tabelle 9: CEPHEUS Projekt 02 -Kassel nach [Schnieders 2001], überarbeitet und ergänzt.

			
Baulos 1: Projekt HHS/ASP			
Projektbeschreibung			
Adresse	D-34131 Kassel, Hessen		
Generalunternehmer	HOCHTIEF AG, Fuldabrück		
Bauherr	Gemeinnützige Wohnungsbaugesellschaft der Stadt Kassel (GWG)		
Architekt	Baulos 1: Hegger/Hegger/Schleif (HHS), Kassel und ASP Planungs- und Bauleitungs-GmbH, Kassel Baulos 2: Prof. Dr. Schneider, Detmold		
Fachingenieure	Statik: Klute & Klute, Kassel Haustechnik: Fa. InnoVaTec Energiesysteme GmbH, Kassel		
Bauzeit	Baubeginn: 28.4.99, Bezug im Mai/Juni 2000		
Gebäudetyp	Geschosswohnungsbau		
Nutzung	Sozialwohnungen		
Zahl der Wohneinheiten	40 (Baulos 1: 23, Baulos 2: 17)		
Wohnnutzfläche	3164 m <sup>2</sup>		
Konstruktion			
Konstruktionsart	Massivbau (Kalksandstein mit Wärmedämmverbundsystem)		
Fenster u. Verglasung	Drei-Scheiben-Wärmeschutzverglasung, g-Wert: 42 %, Fensterrahmen: PVC-Profil mit zusätzlicher Dämmschale innen und außen		
U-Werte (W/(m <sup>2</sup> K))	Außenwand: 0.13; Boden/Kellerdecke: 0.11; Dach: 0.11; Verglasung: 0.6; Fensterrahmen: 0.8; Fenster gesamt: 0.82		
Haustechnik			
Heizung	Dezentrale Zuluftnacherwärmung über Heizregister, Badheizkörper, Wärmeversorgung durch Fernwärme		
Lüftung	Semizentrale Lüftung mit Wärmerückgewinnung aus der Abluft (Zentrale Wärmeübertrager, dezentrale Ventilatoren)		
Warmwasser	Zentrale Warmwasserbereitung, 800 l TWW-Speicher im Technikraum, Wärmeversorgung Fernwärme		
Elektrogeräte	Energiesparberatung für die Bewohner		
Energetische Kenngrößen			
Energiebezugsfl. (TFA)	Baulos 1: 1802 m <sup>2</sup>		
Jahresheizwärmeverbrauch (gemessen)	17.4 kWh/(m <sup>2</sup> a), (zweites Jahr, bei 21.5°C)	Maximale Heizlast (gemessen)	9.8 W/m <sup>2</sup> (verfügbar: > 15 W/m <sup>2</sup> )
Heizwärmebedarf (berechnet nach PHPP, gemäß Baudaten, bei 21.5°C Innentemperatur)	15.7 kWh/(m <sup>2</sup> a)	Maximale Heizlast nach PHPP; bei 21.5°C Innentemperatur	7.9 W/m <sup>2</sup>

Tabelle 10: Heizlastberechnung für das CEPHEUS-Projekt Kassel-Marbachshöhe.

## Passivhaus-Projektierung HEIZWÄRMELAST

Objekt: <b>Passiv-Häuser Marbachshöhe</b>		Gebäudetyp/Nutzung: <b>Mehrfamilienhaus.23 Wohneinhe</b>					
Standort: <b>Kassel</b>		Energiebezugsfläche AEB: <b>1802 m²</b>					
Wetterregion (01 - 12): <b>6</b> <small>Nördlicher Oberrheingraben, z.B. Frankfurt am Main</small>							
Auslegungstemperatur Strahlung: Ost Süd West Nord Horizontal							
Wetter 1: <b>-6.0</b> °C		15	50				
Wetter 2: <b>-1.0</b> °C		5	5				
Innentemp. <b>21</b> °C							
Bauteile	Fläche m²	U-Wert W/(m²K)	Faktor immer 1.0	TempDiff 1 K	TempDiff2 K	<b>P<sub>T</sub> 1</b> Watt	<b>P<sub>T</sub> 2</b> Watt
1. Außenwände	1158.2	0.126	1.0	27.2 bzw. 22.2	=	3969	bzw. 3240
2. Erdgeschoßboden ASP	324.3	0.114	1.0	11.2 bzw. 11.2	=	414	bzw. 414
3. Dach ASP	316.6	0.109	1.0	27.2 bzw. 22.2	=	939	bzw. 766
4.			1.0	27.2 bzw. 22.2	=		bzw.
5. Erdgeschoßboden HHS	417.1	0.114	1.0	11.2 bzw. 11.2	=	532	bzw. 532
6. Dach HHS	417.1	0.109	1.0	27.2 bzw. 22.2	=	1236	bzw. 1009
7. Türen zu Dachterasse	6.0	0.770	1.0	27.2 bzw. 22.2	=	126	bzw. 103
8. Fenster	336.6	0.818	1.0	27.2 bzw. 22.2	=	7490	bzw. 6113
<b>Transmissionswärmelast P<sub>T</sub></b>						Summe =	<b>14707</b> bzw. <b>12177</b>
<b>Lüftungsanlage:</b>				A <sub>EB</sub> m²	lichte Raumhöhe m	m³	
wirksames Luftvolumen V <sub>L</sub>				1801.6	2.50	= 4504	
Wärmebereitstellungsgrad des Plattenwärmetauschers		η <sub>WRG</sub>	87%	1/h			
Wärmebereitstellungsgrad des Erdreichwärmetauschers		η <sub>EWRT</sub>	0%	η <sub>L,Anlage</sub> 1/h	Φ <sub>WRG</sub>	η <sub>L,Rest</sub> 1/h	1/h
energetisch wirksamer Luftwechsel n <sub>L</sub>				0.526	(1 - 0.87)	+ 0.023	= 0.091
<b>Lüftungswärmelast P<sub>L</sub></b>		V <sub>L</sub> m³	n <sub>L</sub> 1/h	c <sub>Luft</sub> Wh/(m³K)	TempDiff 1 K	TempDiff2 K	<b>P<sub>L</sub> 1</b> W <b>P<sub>L</sub> 2</b> W
		4504.0	0.091	0.33	26.0 bzw. 21.0	=	3517 bzw. 2841
<b>Summe Wärmelast P<sub>V</sub></b>						P <sub>T</sub> + P <sub>L</sub> =	<b>18223</b> bzw. <b>15018</b>
<b>Wärmeangebot Solarlast P<sub>S</sub></b>		Fläche m²	g-Wert (senkr. Einstrahlung)gl. Blatt Fenster	Reduktionsfaktor	Strahlung 1 W/m²	Strahlung 2 W/m²	<b>P<sub>S</sub> 1</b> W <b>P<sub>S</sub> 2</b> W
		131.96	0.42	0.45	15 bzw. 5	=	371 bzw. 124
		57.59	0.42	0.36	50 bzw. 5	=	440 bzw. 44
		139.37	0.42	0.36	15 bzw. 5	=	313 bzw. 104
		0.00	0.42	0.45	5 bzw. 5	=	0 bzw. 0
		7.65	0.42	0.45	5 bzw. 5	=	7 bzw. 7
					bzw.	=	0 bzw. 0
<b>Wärmeangebot Solarlast P<sub>S</sub></b>						Summe =	<b>1131</b> bzw. <b>279</b>
<b>Interne Wärmelast P<sub>I</sub></b>				spez. Leistung W/m²	A <sub>EB</sub> m²	<b>P<sub>I</sub> 1</b> W	<b>P<sub>I</sub> 2</b> W
				1.6	1802	=	2883 bzw. 2883
<b>Wärmegewinne P<sub>G</sub></b>						P <sub>S</sub> + P <sub>I</sub> =	<b>4013</b> bzw. <b>3162</b>
						P <sub>V</sub> - P <sub>G</sub> =	<b>14210</b> bzw. <b>11856</b>
<b>Heizwärmelast P<sub>H</sub></b>						=	<b>14210</b> W
						=	<b>7.9</b> W/m²
Zulufttemperatur ohne Nachheizung		θ <sub>zu,Min</sub>	17 °C	Zulufttemperatur Max.	θ <sub>zu,Max</sub>	52 °C	Watt
<b>Wärmelast, von Zuluft transportiert P<sub>Zuluft,Max</sub></b>						=	<b>27671</b> bzw. <b>15.4</b> W/m²

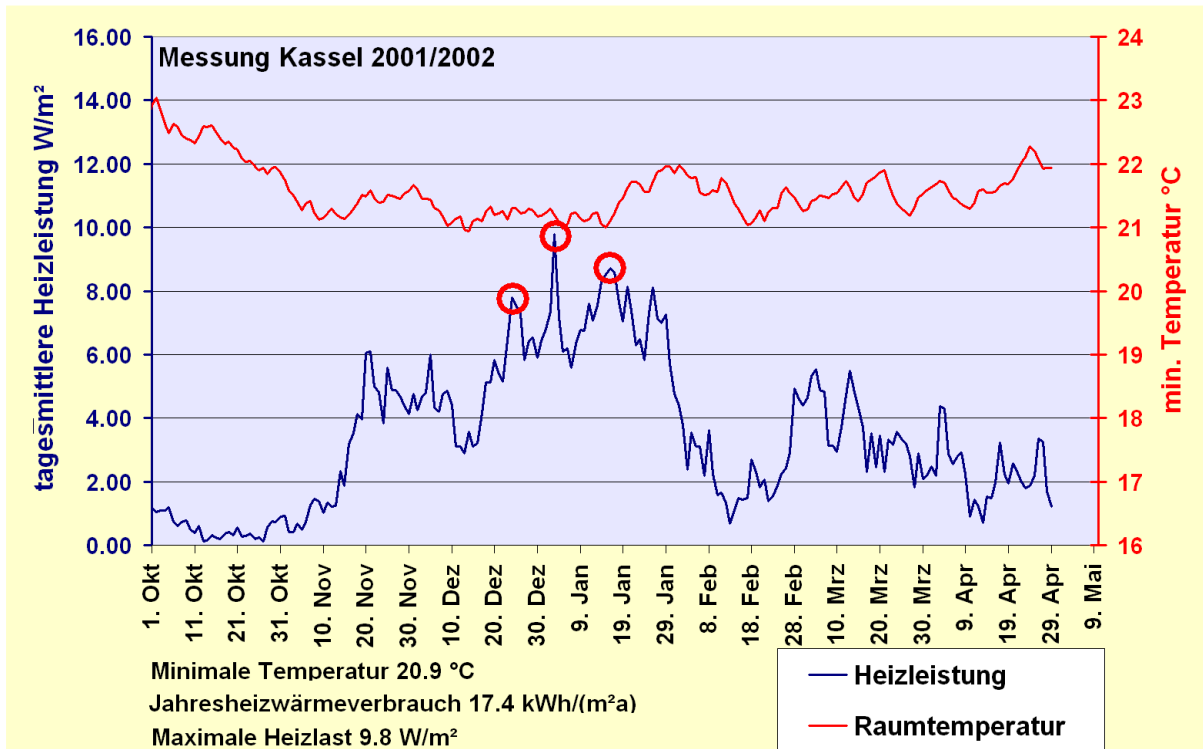


Abbildung 79: Zeitverlauf von mittlerer Raumtemperatur und Heizlast / MFH Kassel-Marbachshöhe, zweiter Betriebswinter 2001/02, Messung: PHI / IEA Task 28.

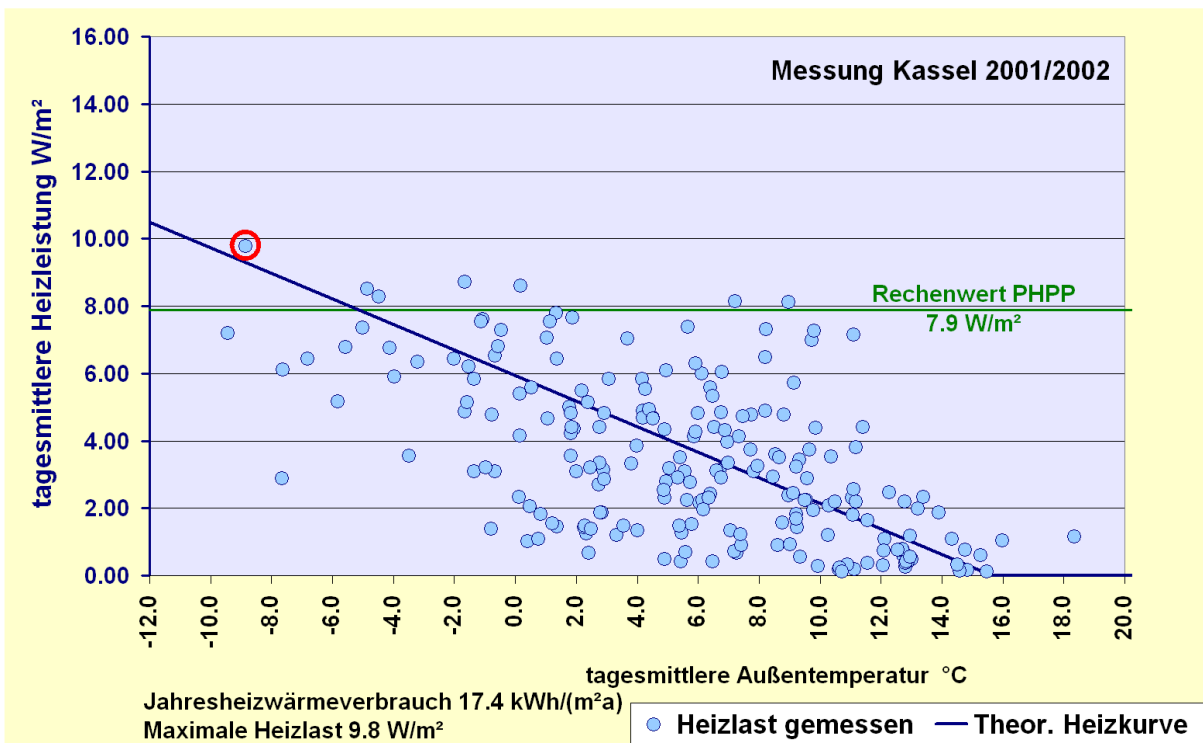


Abbildung 80: Heizkurvendarstellung für das Projekt Kassel-Marbachshöhe (23 WE in einem Geschosswohnungsbau), Winter 2001/02.

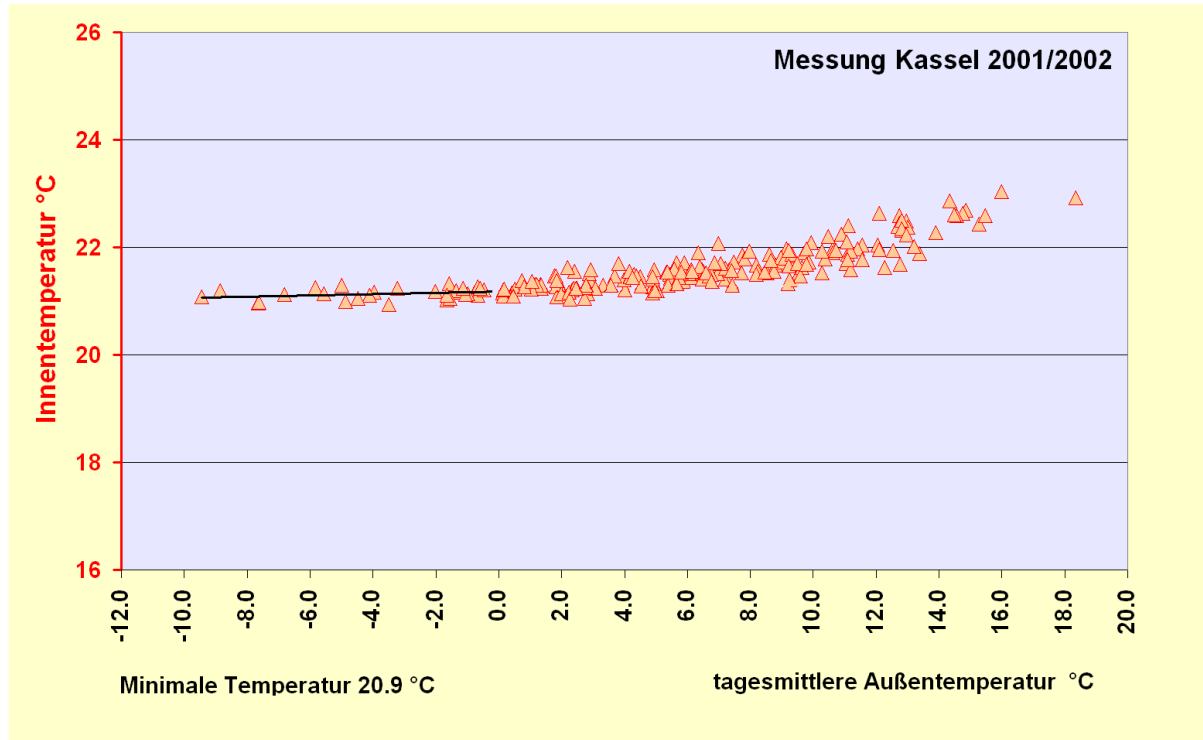


Abbildung 81: Korrelation zwischen Innen- und Außentemperatur (für Außentemperaturwerte kleiner 4 °C) im zweiten Winter (2000/01). Die Steigung der Ausgleichsgeraden beträgt 0.012 °C/°C, der Zusammenhang ist nicht signifikant.

Abbildung 81 zeigt die Korrelation zwischen Innen- und Außentemperatur für die Mehrfamilien-Passivhäuser auf der Marbachshöhe. Klar ist der unterhalb von 3 °C sehr stabile Sollwert von 21 °C erkennbar; die auftretenden Schwankungen um  $\pm 0.2$  K sind von den Nutzern nach der Fanger'schen Behaglichkeitsgleichung nicht wahrnehmbar; sie sind aber die Ursache für die starke Schwankung der Heizlastwerte. Eine Korrelation zwischen Innen- und Außentemperatur besteht im Kernwinter nicht; die gemessenen Heizleistungen waren daher immer ausreichend. Von der installierten Leistung her ist sogar bekannt, dass eine weit höhere Leistung dauerhaft zur Verfügung stand.

Zusammenfassend kann für das Mehrfamilienpassivhaus Kassel Marbachshöhe festgestellt werden, dass die rechnerisch nach PHPP bestimmte Heizleistung ausgereicht hat; wegen regelungstechnischer Besonderheiten sind der Zeitverlauf der Heizleistungen und die empirisch bestimmte Heizkurve aber untypisch für Passivhaus-Projekte.



### 4.3 Mehrfamilienhaus in alpiner Lage: Egg, Vorarlberg (4 WE)

Beim CEPHEUS-Projekt in Egg handelt es sich um ein Mehrfamilienhaus mit vier Wohneinheiten, das als Massivbau in alpiner Lage in 635 m (ü. N.N.) errichtet wurde. Die baulichen Besonderheiten dieses Gebäudes sind die Verwendung einer Holzverschalung des Wärmedämmverbundsystems ("Holzputz") und der Einsatz von nicht speziell gedämmten Fensterrahmen aus Holz, die allerdings weitgehend mit dem Wärmedämmverbundsystem überdämmt wurden. Tabelle 11 können die wesentlichen Charakteristika dieses Gebäudes entnommen werden.

Aus den Thermographieuntersuchungen wurde ermittelt, dass die Fortlufttemperatur einem praktisch erreichten Wärmebereitstellungsgrad der Wärmerückgewinnung von 55% entspricht [Schnieders 2001].

Dieses Gebäude wird über eine Fußbodenheizung mit Hilfe einer Solewärmepumpe beheizt, die als Wärmequelle ein Erdregister verwendet.

In Tabelle 12 wird das PHPP-Heizlastblatt für diesen Bauprojekt dokumentiert; eingesetzt wurden die aus der Baubegleitung bekannten Kennwerte für den Wärmeschutz der Hülle, die Luftdichtheit, der gemessene Wärmebereitstellungsgrad der Lüftung und die gemessenen winterliche Innenraumtemperatur. Es ergibt sich eine maximale rechnerische Heizlast von  $13.5 \text{ W/m}^2$ , wobei der Auslegungsfall in der strahlungsamen Periode auftritt.

Der Zeitverlauf der im ersten Jahr (2000/01) gemessenen tagesmittleren Heizlast ist in Abbildung 82 dargestellt. Diese Daten sind noch bis Ende Januar vom Aufheizbetrieb bestimmt, da das Gebäude in diesem ersten Betriebswinter kalt bezogen wurde. Für die Darstellung der Heizkurve in wurden die Messdaten für die tagesmittlere gemessene Heizleistung über der tagesmittleren Außentemperatur vom 1. Februar 2001 bis zum 30. September 2001 verwendet Abbildung 83. Die gemessenen Heizleistungen liegen fast alle wie erwartet unter der theoretischen Heizgeraden. Kleinere Abweichungen nach oben bei hohen Außentemperaturen sind unbedeutend. Der einzige erkennbare Ausreißer mit  $14.4 \text{ W/m}^2$  fällt auf den 2. Februar 2001 und kann noch zur "Aufheizphase" gehörig angesehen werden. Von diesem Ausreißer abgesehen liegen alle übrigen Messwerte unter dem mit dem PHPP-Heizlastblatt berechneten Maximalwert. Wegen der hier installierten Fußbodenheizung ist die tatsächlich verfügbare Heizleistung erheblich höher (um  $25 \text{ W/m}^2$ ), als der gemessene maximal in Anspruch genommene Wert. Zu bedenken ist außerdem, dass es sich um den ersten Betriebswinter in einem gerade fertiggestellten Massivbau handelt, in welchem zusätzliche Leistung für die Trocknung der Bauteile benötigt wird. Das PHPP-Heizlastverfahren bietet auch dafür offenbar genügend Sicherheit.

Dass das vorhandene Heizsystem tatsächlich ausreicht, im Winterauslegungsfall die thermische Behaglichkeit sicherzustellen, zeigt Abbildung 84. Die Regelung ist hier offenbar sogar so eingestellt, dass der Außentemperaturgang "überkompensiert" wird ( $-0.021 \text{ K/K}$ , jedoch nicht signifikant).

Tabelle 11: CEPHEUS Projekt 04-Austria, Egg; nach [Schnieders 2001], überarbeitet.



Ansicht: Südost (Foto: EIV)



Ansicht: Nord (Foto: EIV)

<b>Projektbeschreibung</b>			
<b>Adresse</b>	A-6863 Egg, Vorarlberg		
<b>Bauträger/Bauherr</b>	Kohler Wohnbau GmbH, Andelsbuch		
<b>Architekt</b>	Fink & Thurnher, Bregenz		
<b>Fachingenieure</b>	Haustechnik: Michael Gutbrunner, Dornbirn		
<b>Bauzeit</b>	Baubeginn: Dez. 1999, Fertigstellung: Sept. 2000		
<b>Gebäudetyp</b>	Mehrfamilienhaus		
<b>Nutzung</b>	Eigentumswohnungen		
<b>Zahl der Wohneinheiten</b>	4		
<b>Wohnnutzfläche</b>	400 m <sup>2</sup>		
<b>Konstruktion</b>			
<b>Konstruktionsart</b>	Massivbau (Ziegelmauerwerk mit Wärmedämmverbundsystem)		
<b>Fenster u. Verglasung</b>	3-Scheiben-Wärmeschutzverglasung, g-Wert: 53 %, Standard-Holz-Fensterrahmen		
<b>U-Werte (W/(m<sup>2</sup>K))</b>	Außenwand: 0.12; Boden: 0.14; oberste Decke: 0.10; Verglasung: 0.7; Fensterrahmen: 1.25; Fenster gesamt: 0.85		
<b>Haustechnik</b>			
<b>Heizung</b>	Vorwärmung der Frischluft durch Erdreichwärmetauscher, Fußbodenheizung mittels Wärmepumpe (Erdreichabsorber)		
<b>Lüftung</b>	Dezentrale kontrollierte Be- und Entlüftung mit Wärmerückgewinnung aus der Abluft: WRG im praktischen Betrieb um 55%		
<b>Warmwasser</b>	Solarkollektor (35 m <sup>2</sup> ), zwei 1000 l Speicher		
<b>Elektrogeräte</b>	Beratung der Bewohner, energiesparende Haushaltsgeräte kamen nur teilweise zum Einsatz		
<b>Energetische Kenngrößen</b>			
<b>Energiebezugsfläche (TFA)</b>	310 m <sup>2</sup>		
<b>Jahresheizwärmeverbrauch (gemessen)</b>	29 kWh/(m <sup>2</sup> a), (Im ersten Jahr)	<b>Maximale Heizlast (gemessen, erstes Jahr, ab II 2001)</b>	14.4 W/m <sup>2</sup>
<b>Heizwärmebedarf (berechnet nach PHPP, gemäß Baudaten, bei 23.2 °C Innentemperatur)</b>	29 kWh/(m <sup>2</sup> a)	<b>Maximale Heizlast nach PHPP; bei 23.2 °C Innentemperatur</b>	13.5 W/m <sup>2</sup>

Tabelle 12: PHPP-Heizlastblatt für Egg (bei den gemessenen Innentemperaturen).

## Passivhaus-Projektierung HEIZWÄRMELAST

Objekt: <b>Passivhaus Egg Wieshalde</b>		Gebäudetyp/Nutzung: <b>Mehrfamilienwohnhaus</b>	
Standort: <b>Egg</b>		Energiebezugsfläche AEB: <b>310 m<sup>2</sup></b>	
Wetterregion (01 - 12): <b>9</b> <span style="border: 1px solid black; padding: 2px;">Alpenvorland von ca. 600-1000 m Höhe, nordwestlicher Schwarzwald, z.B. München</span>			
Auslegungstemperatur			
Wetter 1: <b>-8.0 °C</b>		Ost: <b>15</b>	Süd: <b>60</b>
Wetter 2: <b>-4.0 °C</b>		West: <b>15</b>	Nord: <b>5</b>
Innentemp. °C: <b>23.2</b>		Horizontal: <b>5 W/m<sup>2</sup></b>	
Bauteile	Fläche m <sup>2</sup>	U-Wert W/(m <sup>2</sup> K)	Faktor immer 1.0
1. Außenwand 1 Außen	207.1	0.120	1.0
2. OD zu Dachboden	93.6	0.096	1.0
3. OD zu Technikraum	93.6	0.149	1.0
4. NO Außenwand 2 Erde	102.7	0.124	1.0
5. Innenwand DG	26.5	0.149	1.0
6. Fußboden EG	203.4	0.135	1.0
7. Schrägdach	15.1	0.172	1.0
8. Fenster	81.9	0.858	1.0
			TempDiff 1 K
			TempDiff 2 K
			<b>P<sub>T</sub> 1</b> Watt
			<b>P<sub>T</sub> 2</b> Watt
<b>Transmissionswärmelast P<sub>T</sub></b>			<b>Summe = 4168 bzw. 3725</b>
A <sub>EB</sub> m <sup>2</sup> lichte Raumhöhe m    m <sup>3</sup>			
<b>Lüftungsanlage:</b> wirksames Luftvolumen V <sub>L</sub> 309.7 * 2.35 = 728			
Wärmebereitstellungsgrad des Plattenwärmetauschers	η <sub>WRG</sub> 55%		1/h
Wärmebereitstellungsgrad des Erdreichwärmetauschers	η <sub>EW</sub> 20%	η <sub>L,Anlage</sub> 1/h	Φ <sub>WRG</sub> η <sub>L,Rest</sub> 1/h
energetisch wirksamer Luftwechsel n <sub>L</sub> 0.412 * (1 - 0.64) + 0.038 = 0.186			
	V <sub>L</sub> m <sup>3</sup>	n <sub>L</sub> 1/h	Q <sub>Luft</sub> Wh/(m <sup>2</sup> K)
<b>Lüftungswärmelast P<sub>L</sub></b>			TempDiff 1 K    TempDiff 2 K <b>P<sub>L</sub> 1</b> W <b>P<sub>L</sub> 2</b> W
	727.8	0.186	0.33 * 28.0 bzw. 24.0 = 1251 bzw. 1073
<b>Summe Wärmelast P<sub>V</sub></b>			<b>P<sub>V</sub> 1</b> W <b>P<sub>V</sub> 2</b> W
			<b>P<sub>T</sub> + P<sub>L</sub> = 5420 bzw. 4798</b>
Ausrichtung der Fläche	Fläche m <sup>2</sup>	g-Wert (senkr. Einstrahlung)	Reduktionsfaktor (gl. Blatt Fenster)
1. Ost	3.09	0.53	0.38
2. Süd	49.35	0.53	0.55
3. West	3.09	0.53	0.38
4. Nord	24.65	0.53	0.47
5. Horizontal	1.76	0.53	0.47
6.			
			Strahlung 1 W/m <sup>2</sup> Strahlung 2 W/m <sup>2</sup> <b>P<sub>S</sub> 1</b> W <b>P<sub>S</sub> 2</b> W
			15 bzw. 5 = 9 bzw. 3
			60 bzw. 5 = 858 bzw. 72
			15 bzw. 5 = 9 bzw. 3
			5 bzw. 5 = 31 bzw. 31
			5 bzw. 5 = 2 bzw. 2
			bzw.    = 0 bzw. 0
<b>Wärmeangebot Solarlast P<sub>S</sub></b>			<b>Summe = 910 bzw. 111</b>
spez. Leistung W/m <sup>2</sup> A <sub>EB</sub> m <sup>2</sup>			
<b>Interne Wärmelast P<sub>I</sub></b>			1.6 * 310 = 496 bzw. 496
<b>Wärmegewinne P<sub>G</sub></b>			<b>P<sub>I</sub> 1</b> W <b>P<sub>I</sub> 2</b> W
			<b>P<sub>S</sub> + P<sub>I</sub> = 1406 bzw. 606</b>
			<b>P<sub>V</sub> - P<sub>G</sub> = 4014 bzw. 4192</b>
<b>Heizwärmelast P<sub>H</sub></b>			<b>= 4192 W</b>
			<b>= 13.5 W/m<sup>2</sup></b>

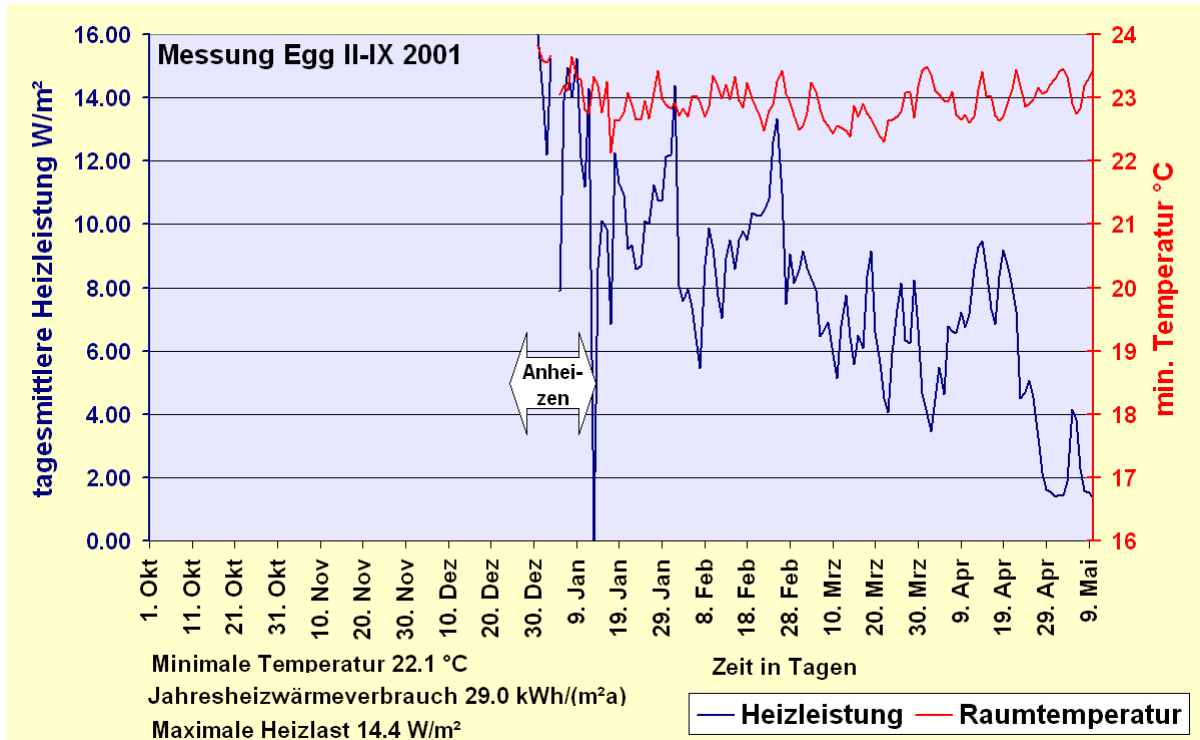


Abbildung 82: Zeitverlauf der gemessenen spezifischen Heizlast im ersten Betriebswinter; bis Mitte Januar herrscht Anheizbetrieb in diesem im Winter bezogenen Haus.

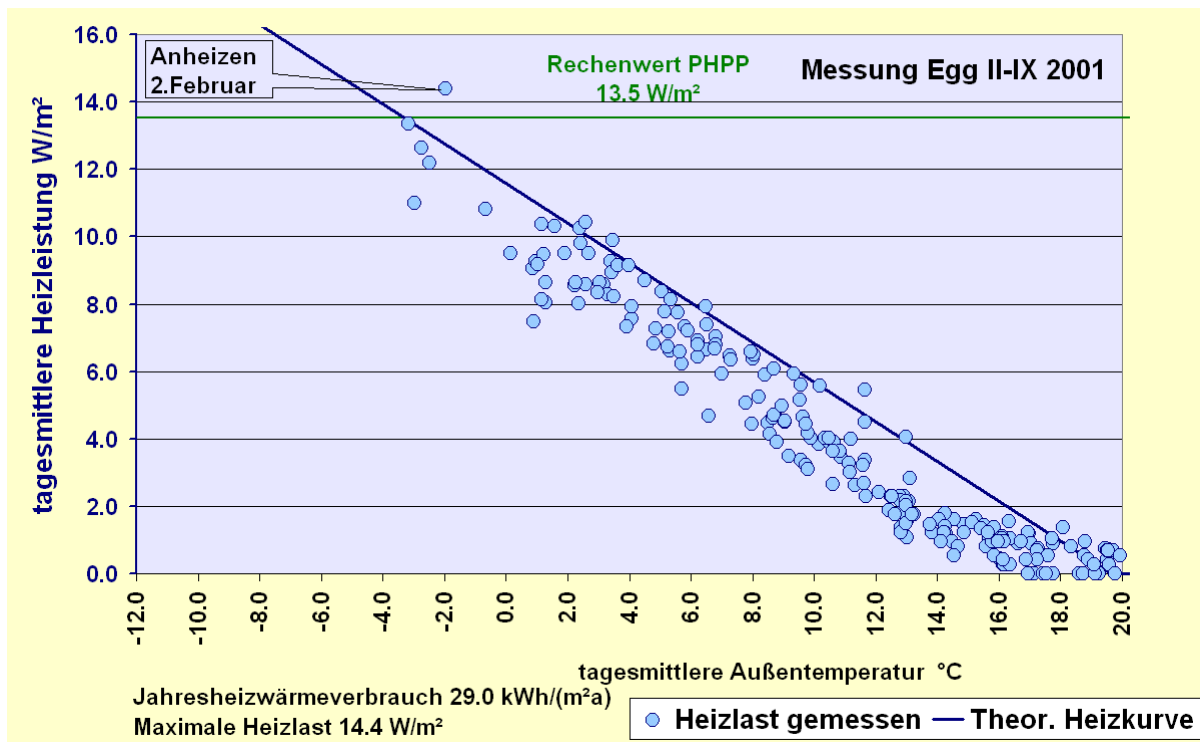


Abbildung 83: Gemessene Heizleistung über der tagesmittleren Außentemperatur; Projekt Egg.

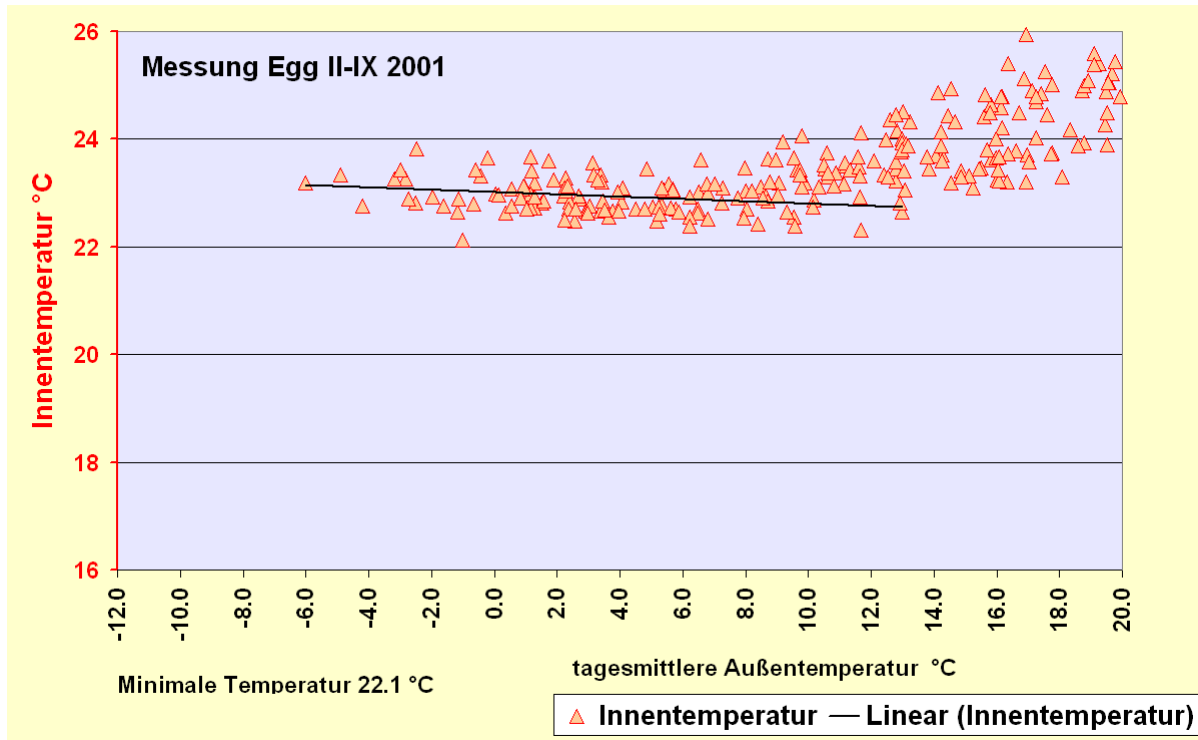


Abbildung 84: Winterkorrelation zwischen Innen- und Außentemperatur (Projekt Egg 2000/01); die Behaglichkeit war unter allen Randbedingungen sichergestellt.

Die Messergebnisse aus dem Projekt Egg bestätigen sowohl die erwartete charakteristische Form der Heizkurve als auch die mit dem PHPP-Heizlastverfahren ermittelte maximale Heizlast. Die Ergebnisse zeigen, dass das Verfahren auch bei "beinahe"-Passivhäusern mit Fußbodenheizungssystem anwendbar ist. Es zeigt darüber hinaus, dass in sehr gut wärmegeprägten Häusern Fußbodenheizungen mit gutem Erfolg eingesetzt werden können, ohne zu einer bedeutenden Steigerung des Wärmeverbrauchs zu führen (vgl. dazu auch [AkkP 28]).

#### 4.4 Reihenhäuser am Bodensee: Hörbranz, Vorarlberg (3 WE)

Beim CEPHEUS-Projekt in Hörbranz handelt es sich um eine Reihenhauszeile mit drei Einheiten; es wurde Wert auf die Verwendung von nachwachsenden Rohstoffen als Baumaterialien gelegt: Z.B. hat das Gebäude ein Wärmedämmverbundsystem aus Kork. Die U-Werte der opaken Hüllflächenbauteile sind auch im Vergleich zu anderen CEPHEUS-Projekten sehr gering ( $0.1 \pm 0.01$ )  $W/(m^2K)$ ; Angaben gehen aus Tabelle 13 hervor. Das Reihenhäuser mit Pultdach weist ein günstiges *AV*-Verhältnis auf, die großen Fensterflächen der Hauptfassade (52% Fensterflächenanteil) sind mit nur  $8^\circ$  Westabweichung nach Süden orientiert. Ein weiterer Teil der Südfassade ist mit einem fassadenintegrierten thermischen Solarkollektor für die Warmwasserbereitung belegt, wodurch auch bei diffuser Einstrahlung eine weitere Verringerung der Wärmeverluste durch die Fassade entsteht.

Tabelle 14 zeigt die mit den nach Baubegehung aktualisierten Daten berechnete maximale Heizlast, bestimmt nach PHPP. Bei diesem offensiv passiv solar konzipierten Gebäude tritt die maximale Last tatsächlich nicht am kältesten Tag, sondern an strahlungsamen, mäßig kalten Tagen der Winterperiode auf. Allerdings unterscheiden sich beim zugrundeliegenden Bodenseeklima die Heizlastwerte für die Auslegung am "strahlungsreichen Tag" und am "trüber Tag" nur wenig, da durch den Nebel auch in Hochdruckwetterlagen die Strahlungsgewinne begrenzt werden. Zu erwarten sind daher nach der PHPP-Heizlastberechnung in etwa konstante Wärmeverbrauchswerte in den kälteren Perioden des Winterzeitraumes.

Abbildung 85 zeigt den Zeitverlauf der Messwerte von Innentemperatur und tagesmittlerer Heizlast im zweiten Betriebsjahr (2000/01) der Hörbranz-Reihenhäuserzeile. Erstjahresaufheizeffekte gibt es bei diesem Projekt auf Grund der zügigen Fertigstellung nicht. Die Heizlast schwankt sehr stark, bleibt aber unter allen Bedingungen unter  $8 W/m^2$ . Die Tagesmitteltemperaturen liegen im Minimum bei  $22^\circ C$ ; an sonnenreichen Tagen haben sie auch im Januar über  $24^\circ C$  erreicht.

Die für unsere Untersuchung entscheidende Heizlastkurve ist in Abbildung 86 dargestellt. Für das Hörbranz-Projekt ergibt sich ein Diagramm, das den Erwartungen in vollem Ausmaß entspricht: Bis auf zwei Punkte mit Abweichungen von weniger als  $0.5 W/m^2$  (geringer als die Messgenauigkeit) liegen alle gemessene Werte unter der theoretisch bestimmten Heizgeraden. Die Maximallast wird bei einer eher mäßig kalten Außentemperatur von  $3.2^\circ C$  erreicht und beträgt  $8 W/m^2$ . Sie ist deutlich geringer als die rechnerische Maximallast nach dem PHPP-Heizwärmeblatt; dies zeigt die bestehenden Reserven, die auch dieses Verfahren noch aufweist. Wie erwartet sinken die Werte der tagesmittleren Heizlast bei diesem offensiv solaren Gebäude bei noch niedrigeren Außentemperaturen wieder ein wenig, da dann i.A. ein höheres solares Strahlungsangebot vorliegt. Die Zusammenhänge werden durch das PHPP-Verfahren mit zwei Auslegungstagen treffend wiedergespiegelt. Die von den Kompaktgeräten verfügbaren Leistungen sind höher als die dokumentierten Messwerte, es handelt sich daher nicht um Effekte einer evtl. einschränkenden Leistungsbegrenzung.



Tabelle 13: CEPHEUS Projekt 05 - Austria, Hörbranz; nach [Schnieders 2001], überarbeitet.


			
<p>Ansicht: Süd (Fotos: Martinez)</p>			
<p>Ansicht: Ost</p>			
<b>Projektbeschreibung</b>			
<b>Adresse</b>	A- 6912 Hörbranz, Voralberg		
<b>Bauherrngemeinschaft</b>	Hofer/Österle/Amann		
<b>Architekt</b>	Ing. Richard Caldonazzi, Frastanz		
<b>Fachingenieure</b>	Haustechnik: Ing. Christof Drexel, Bregenz		
<b>Bauzeit</b>	Baubeginn: Okt. 1998, Fertigstellung: Juni 1999		
<b>Gebäudetyp</b>	Reihenhaus		
<b>Nutzung</b>	Eigentumswohnungen		
<b>Zahl der Wohneinheiten</b>	3		
<b>Wohnnutzfläche</b>	394 m <sup>2</sup>		
<b>Konstruktion</b>			
<b>Konstruktionsart</b>	Massivbau (Ziegelmauerwerk mit Wärmedämmverbundsystem aus Kork)		
<b>Fenster u. Verglasung</b>	3-Scheiben-Wärmeschutzverglasung, g-Wert: 47%, Holz-Fensterrahmen		
<b>U-Werte (W/(m<sup>2</sup>K))</b>	Außenwand: 0.10; Kellerdecke: 0.11; Dach: 0.09; Verglasung: 0.6; Fensterrahmen: 1.12; Fenster gesamt: 0.83		
<b>Haustechnik</b>			
<b>Heizung</b>	Vorwärmung der Frischluft durch Erdreichwärmetauscher, Nachheizung der Zuluft über einen Wasser/Luft-Wärmetauscher, Wärmepumpe bzw. Gastherme als Notheizung		
<b>Lüftung</b>	Kontrollierte Be- und Entlüftung mit Wärmerückgewinnung aus der Abluft		
<b>Warmwasser</b>	Fassadenintegrierter Solarkollektor (18 m <sup>2</sup> pro Haus) mit ca. 3000 l Pufferspeicher		
<b>Elektrogeräte</b>	Es werden überwiegend Stromspargeräte eingesetzt		
<b>Energetische Kenngrößen</b>			
<b>Energiebezugsfläche (TFA)</b>	381 m <sup>2</sup>		
<b>Jahresheizwärmeverbrauch (gemessen, bei 22°C Innentemp.)</b>	13.8 kWh/(m <sup>2</sup> a)	<b>Maximale Heizlast (gemessen, zweites Jahr, 2000/01)</b>	8 W/m <sup>2</sup>
<b>Heizwärmebedarf (berechnet nach PHPP)</b>	13.8 kWh/(m <sup>2</sup> a)	<b>Maximale Heizlast nach PHPP</b>	11 W/m <sup>2</sup>

Tabelle 14: PHPP-Heizlastblatt für Hörbranz.

## Passivhaus-Projektierung HEIZWÄRMELAST

Objekt: <b>RH Hörbranz-Herrenmühle</b>		Gebäudetyp/Nutzung: <b>Reihenhaus - gesamt</b>	
Standort: <b>Herrenmühle</b>		Energiebezugsfläche A <sub>EB</sub> : <b>381</b> m <sup>2</sup>	
Wetterregion (01 - 12): <b>12</b> Bodensee mit Umgebung, z.B. Friedrichshafen			
Auslegungstemperatur: Ost Süd West Nord Horizontal			
Wetter 1: <b>-6.0</b> °C		<b>5</b>	<b>25</b>
Wetter 2: <b>-5.0</b> °C		<b>5</b>	<b>5</b>

Bauteile	Fläche m <sup>2</sup>	U-Wert W/(m <sup>2</sup> K)	Faktor immer 1.0	TempDiff 1 K	TempDiff2 K	P <sub>T 1</sub> Watt	P <sub>T 2</sub> Watt
1. Außenwand	354.3	0.104	1.0	26 bzw. 25	=	958	921
2. Dach	254.3	0.092	1.0	26 bzw. 25	=	608	585
3. Fußboden zu Keller	252.8	0.106	1.0	10 bzw. 10	=	268	268
4. Rollos Südfassade	7.5	0.150	1.0	26 bzw. 25	=	29	28
5. Eingangstüren	9.4	1.000	1.0	26 bzw. 25	=	244	235
6.			1.0	26 bzw. 25	=		
7.			1.0	26 bzw. 25	=		
8. Fenster	92.2	0.834	1.0	26 bzw. 25	=	1998	1921

**Transmissionswärmelast P<sub>T</sub>** Summe = **4106** bzw. **3958**

Lüftungsanlage:		A <sub>EB</sub> m <sup>2</sup>	lichte Raumhöhe m	m <sup>3</sup>
wirksames Luftvolumen V <sub>L</sub>		<b>381.3</b>	<b>2.50</b>	<b>953</b>
Wärmebereitstellungsgrad des Plattenwärmetauschers	η <sub>WRG</sub>	<b>75%</b>		1/h
Wärmebereitstellungsgrad des Endreichwärmetauschers	η <sub>EWR</sub>	<b>33%</b>	η <sub>L,Anlage</sub> 1/h	Φ <sub>WRG</sub>
energetisch wirksamer Luftwechsel n <sub>L</sub>		<b>0.518</b>	<b>(1 - 0.83)</b>	<b>+ 0.034</b>
		<b>= 0.121</b>		1/h

Lüftungswärmelast P <sub>L</sub>	V <sub>L</sub> m <sup>3</sup>	n <sub>L</sub> 1/h	c <sub>Luft</sub> Wh/(m <sup>3</sup> K)	TempDiff 1 K	TempDiff2 K	P <sub>L 1</sub> W	P <sub>L 2</sub> W
	953.3	0.121	0.33	26.0 bzw. 25.0	=	<b>991</b>	<b>953</b>

**Summe Wärmelast P<sub>V</sub>** P<sub>T</sub> + P<sub>L</sub> = **5097** bzw. **4912**

Ausrichtung der Fläche	Fläche m <sup>2</sup>	g-Wert (senkr. Einstrahlung)	Reduktionsfaktor gl. Blatt Fenster	Strahlung 1 W/m <sup>2</sup>	Strahlung 2 W/m <sup>2</sup>	P <sub>S 1</sub> W	P <sub>S 2</sub> W
1. Ost	5.74	0.47	0.44	5	5	6	6
2. Süd	64.99	0.47	0.55	25	5	422	84
3. West	5.78	0.47	0.55	5	5	7	7
4. Nord	15.69	0.47	0.39	5	5	14	14
5. Horizontal	0.00		0.45	5	5	0	0
6.						0	0

**Wärmeangebot Solarlast P<sub>S</sub>** Summe = **450** bzw. **112**

Interne Wärmelast P <sub>I</sub>	spez. Leistung W/m <sup>2</sup>	A <sub>EB</sub> m <sup>2</sup>	P <sub>I 1</sub> W	P <sub>I 2</sub> W
	<b>1.6</b>	<b>381</b>	<b>610</b>	<b>610</b>

**Wärmegewinne P<sub>G</sub>** P<sub>S</sub> + P<sub>I</sub> = **1060** bzw. **722**

**P<sub>V</sub> - P<sub>G</sub> = **4038** bzw. **4189****

**Heizwärmelast P<sub>H</sub>** = **4189** W

**= **11.0** W/m<sup>2</sup>**

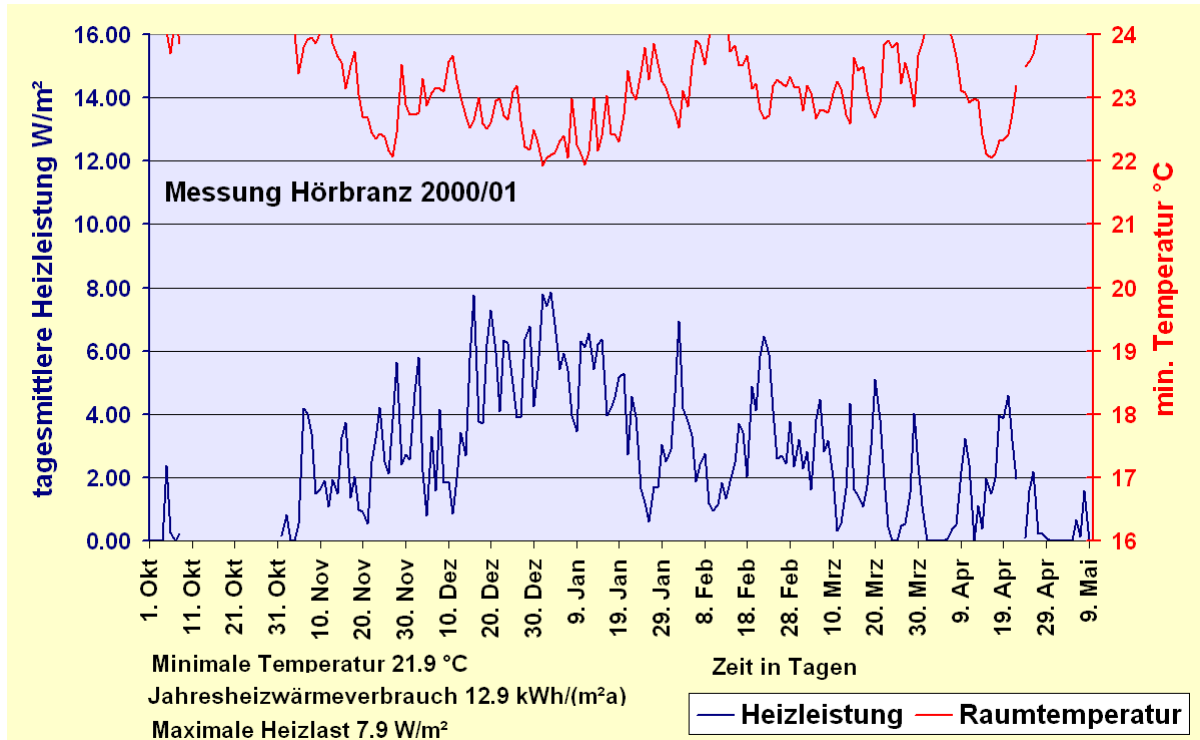


Abbildung 85: Gemessene Heizleistung und Innentemperatur im Zeitverlauf; Projekt Hörbranz.

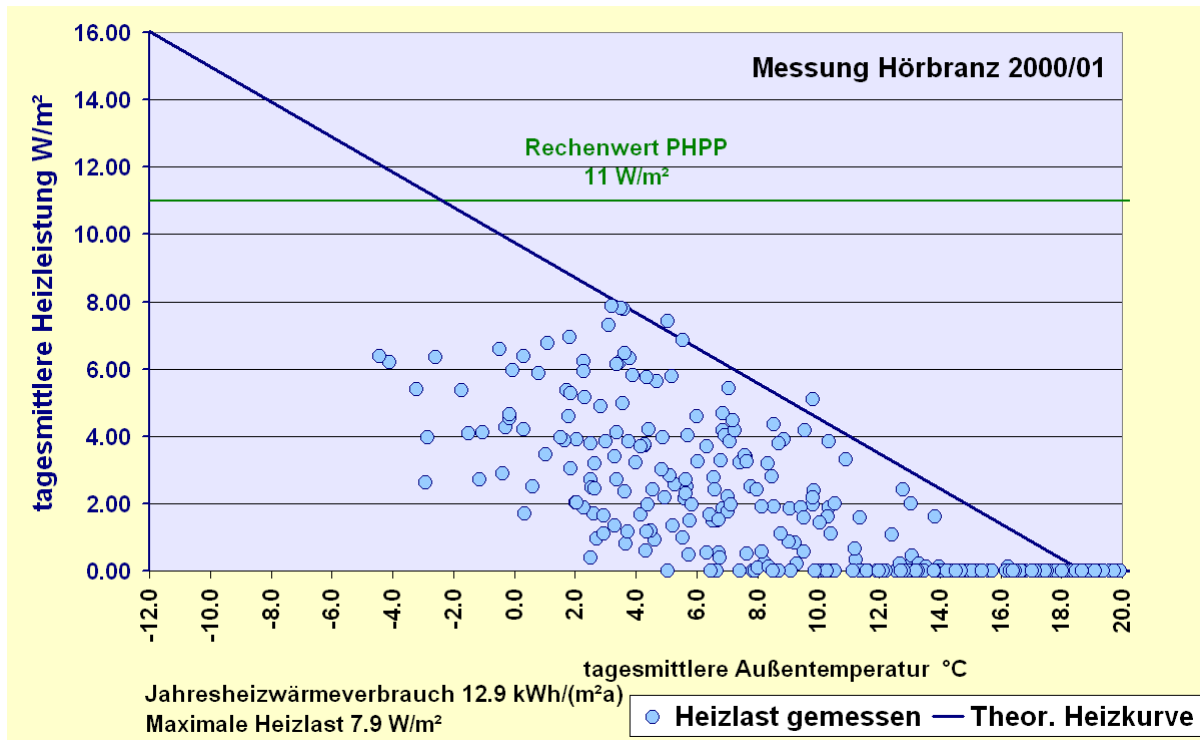


Abbildung 86: Gemessene Heizleistung über der tagesmittleren Außentemperatur; Projekt Hörbranz.

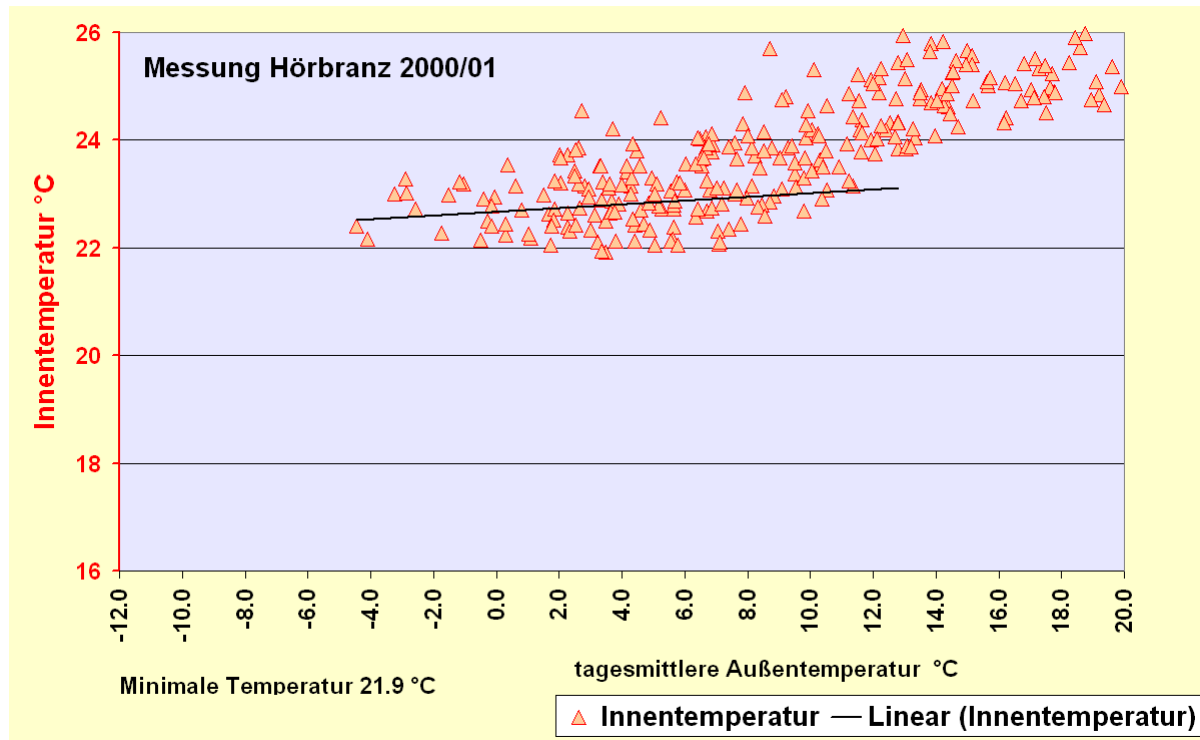


Abbildung 87: Winterkorrelation zwischen Innen- und Außentemperatur (Projekt Hörbranz 2000/01); die Behaglichkeit war unter allen Randbedingungen sichergestellt, die Innentemperaturen lagen immer über 21.9 °C.

Abbildung 87 zeigt die Korrelation zwischen Innen- und Außentemperatur für das Projekt Hörbranz. Im vorliegenden Fall hat die Ausgleichsgerade eine deutliche Steigung und die Korrelation ist signifikant, so dass man nach den vorausgehenden theoretischen Untersuchungen Leistungsdefizite vermuten könnte. Eine genaue Betrachtung der Messpunkte in der Abbildung zeigt aber, dass die jeweiligen Minima der Raumtemperaturen bei allen Außentemperaturen zwischen -6 und +8 °C nicht unter 21.9 °C liegen. Ein Leistungsdefizit liegt somit auch bei diesem Projekt zu keinem Zeitpunkt vor. Die Korrelation erklärt sich bei diesem Projekt wie folgt:

- Die Raumtemperaturen können an Tagen mit hohem Solargewinn infolge nicht nutzbarer Solarbeiträge über den Sollwert der Heizungsregelung hinaus zunehmen. Das ist eine Folge des offensiv passiv solaren Konzeptes bei diesem Reihenhaus, dessen Auswirkungen von den Bewohnern aber gut angenommen werden - die höheren Innentemperaturen wären leicht durch zusätzliches Fensteröffnen abzusenken, davon machen die Bewohner jedoch keinen erkennbaren Gebrauch. Der Effekt ist bei höheren Außentemperaturen stärker, weil dann das Solar / Last-Verhältnis höher ist.

Die Messungen im Hörbranz-Projekt zeigen genau den erwarteten Verlauf der Abhängigkeit zwischen Heizleistung und tagesmittlerer Außentemperatur. Sowohl die tangentielle Lage der theoretischen Heizgeraden als auch die Begrenzung der Heizleistung, wie sie sich aus dem Zweipunkte-Auslegungsverfahren des PHPP ergibt, wurden vollständig bestätigt. Die gemessenen Heizlastwerte liegen mit unter 8 W/m<sup>2</sup> bei diesem Projekt extrem gering. Dies ist eine Folge der idealen passiv solaren Konzeption, der sehr guten Wärmedämmung und Kompaktheit und der nahezu verschattungsfreien Lage dieses Gebäudes.

## 4.5 Wolfurt, Vorarlberg (10 WE)

Die Entwürfe der beiden kompakten Mehrfamilienhäuser in Wolfurt kommen aus der Feder des Architekten Zweier. Diese Gebäude sind in Bezug auf die passiv solare Konzeption vollkommen gegensätzlich zum zuvor behandelten Projekt in Hörbranz: Die Fensterflächen sind zu gleichen Teilen nach Nord (!) und Süd orientiert, auch die West- und Ostfassaden haben beim zu Grunde liegenden nahezu quadratischen Grundriss fast den gleichen Fensterflächenanteil. Die Fensterflächen sind in Bezug auf die Wohnfläche deutlich kleiner als beim Projekt in Hörbranz und es liegt eine spürbare Verschattung der beiden Gebäude untereinander und durch umgebende Nadelbäume vor (Fotos in Tabelle 1). Die geringeren passiv solaren Beiträge werden durch eine noch kompaktere Bauweise teilweise ausgeglichen. Es handelt sich hier also um ein stark "verlustreduzierendes" Architekturkonzept. Wie Tabelle 16 zeigt, wird das Kriterium der Zuluftbeheizbarkeit für das Wolfurt-Projekt erfüllt.

Abbildung 88 zeigt den Zeitverlauf von Raumtemperatur und der gemessenen tagesmittleren Heizleistung beim Projekt "Wolfurt" im Durchschnitt der zehn Wohneinheiten. Der Verlauf der Heizleistung zeigt ein wesentlich "ruhigeres" Bild als beim Projekt Hörbranz, in welchem regelmäßige starke Rückgänge durch passiv solare Gewinne zu verzeichnen sind. Die maximale Heizleistung bleibt mit  $9.1 \text{ W/m}^2$  unter dem PHPP-Rechenwert von  $10.9 \text{ W/m}^2$ . Fast alle Messwerte liegen wie erwartet unter der Heizgeraden; beim einzigen Ausreißer ( $7.85 \text{ °C} / 6.99 \text{ W/m}^2$ ) liegt sowohl ein instationäres Heizverhalten ( $22.5$  auf  $23 \text{ °C}$  Innentemperatur) als auch ein untypisch schneller Außentemperaturanstieg (von  $0$  auf  $8 \text{ °C}$ ) vor; nicht bei allen Projekten lassen sich Ausreißer unmittelbar aus den Messdaten erklären – wie es in diesem Fall gelingt. Entsprechend des geringeren passiv solaren Einflusses streuen beim Projekt die Messwerte der tagesmittleren Heizleistung weniger weit unterhalb der Heizgeraden wie beim Projekt Hörbranz.

Auch im Projekt Wolfurt reichte die verfügbare Heizleistung zu allen Zeiten für eine Beheizung auf behagliche Temperaturniveaus aus. Wie Abbildung 90 zeigt, sank die Raumtemperatur in der kalten Zeit nie unter  $21.8 \text{ °C}$ . Allerdings gibt es auffällig niedrigere Temperaturen um  $21.1$  bis  $21.5 \text{ °C}$  bei Außentemperaturen zwischen  $10$  und  $14 \text{ °C}$ . Die Zurückverfolgung dieser Daten zeigte, dass es sich um Messwerte zwischen 9. und 17. September 2001 handelt; die Heizung mit Holzpellets wurde in diesem Zeitraum nach der Sommerpause wieder in Betrieb genommen. Die Temperaturabnahme zwischen 28. August und 10. September erfolgt sehr schnell; hier wurden die Gebäude offenbar nach der Sommerzeit bewusst mit geöffneten Fenstern gekühlt, wodurch das plötzliche und relative frühe Eintreten des "Heizfalls" bereits im September erklärbar wird. Auch hier waren die Leistungsreserven offenbar groß genug. Die Ausgleichsgerade zum Verlauf Innen- über Außentemperatur zeigt in diesem Fall zwar eine (auch als signifikant bewertete) Steigung, dies ist aber, wie die beschriebene genaue Analyse der Daten zeigt, nicht auf eine fehlende Leistungsreserve zurückzuführen.

Auch die Messdaten aus dem CEPHEUS-Projekt Wolfurt bestätigen den Rechenansatz nach dem PHPP-Heizlastverfahren, in diesem Fall bei einem Projekt mit eher geringen solaren Wärmegegewinnen, dafür aber günstigem AV-Verhältnis. Die Funktion einer allein auf Zuluftnacherwärmung ausgelegten Heizung, wie sie in diesen Gebäuden auch vorliegt, war zu allen Zeitpunkten (mit verbliebenen Reserven) gewährleistet.



Tabelle 15: CEPHEUS Projekt 06 - Austria, Wolfurt; nach [Schnieders 2001], überarbeitet.



Ansicht: Süd



Ansicht: Ost (Fotos: EIV)

<b>Projektbeschreibung</b>			
<b>Adresse</b>	A-6922 Wolfurt, Vorarlberg		
<b>Bauträger/Bauherr</b>	Errichtergemeinschaft Passivhaus Wolfurt-Oberfeld		
<b>Architekt</b>	Dipl.-Ing. Gerhard Zweier, Wolfurt		
<b>Fachingenieure</b>	Haustechnik: GMI Gasser&Messner-Ingenieure, Dornbirn und Christof Drexel, Bregenz Bauphysik: Architekturbüro Dr. Lothar Künz, Hard		
<b>Bauzeit</b>	Baubeginn: Feb. 1999, Fertigstellung: Dez. 1999		
<b>Gebäudetyp</b>	Mehrfamilienhaus (2 baugleiche Gebäude)		
<b>Nutzung</b>	Eigentumswohnungen: 8 Wohnungen, ein Büro, ein Atelier		
<b>Zahl der Wohneinheiten</b>	10		
<b>Konstruktion</b>			
<b>Konstruktionsart</b>	Mischbauweise: Stahlskelettkonstruktion mit Stahlbetondecken und aussteifenden Betonscheiben, Außenwände aus vorgefert. Holzelementen		
<b>Fenster u. Verglasung</b>	3-Scheiben-Wärmeschutzverglasung, g-Wert: 53 %, Holz-Fensterrahmen mit innerer PU-Recyclingwerkstoff-Dämmschicht		
<b>U-Werte (W/(m²K))</b>	Außenwand 1: 0.12; Außenwand 2: 0.16; Kellerdecke: 0.10; Dach: 0.09; Verglasung: 0.70; Fensterrahmen: 1.0; Fenster gesamt: 0.82		
<b>Haustechnik</b>			
<b>Heizung</b>	Nachheizung über WW-Register aus dem zentralen Pufferspeicher, der von einem Pelletsheizkessel und einer Solaranlage beheizt wird		
<b>Lüftung</b>	Dezentrale kontrollierte Be- und Entlüftung mit Erdreichwärmetauscher und Wärmerückgewinnung aus der Abluft		
<b>Warmwasser</b>	Solarkollektor (gesamt: 62 m²), 2500 l Kombispeicher je Gebäude		
<b>Elektrogeräte</b>	Stromspargeräte sind vorgesehen		
<b>Energetische Kenngrößen</b>			
<b>Energiebezugsfl. (TFA)</b>	1296 m²		
<b>Jahresheizwärmeverbrauch (gemessen)</b>	21.3 kWh/(m²a), (Im ersten Jahr, bei 22.7°C Innentemperatur)	<b>Maximale Heizlast (gemessen, erstes Jahr, bis inkl. III 2001)</b>	9.1 W/m²
<b>Heizwärmebedarf (berechnet nach PHPP, gemäß Baudaten, bei 22.7 °C Innentemperatur)</b>	20.5 kWh/(m²a)	<b>Maximale Heizlast nach PHPP; bei 22.7 °C Innentemperatur</b>	10.9 W/m²



Tabelle 16: PHPP-Heizlastblatt für Wolfurt.

## Passivhaus-Projektierung

### HEIZWÄRMELAST

Objekt:	WOOF Passivhaus Oberfeld Haus A					Gebäudetyp/Nutzung:	Haus A mit EIGENVERSCHÄTTUNG					
Standort:	Wolfurt					Energiebezugsfläche AEB:	576	m <sup>2</sup>	Temp	20		
Wetterregion (01 - 12):	12	Bodensee mit Umgebung, z.B. Friedrichshafen										
Auslegungstemperatur Strahlung: Ost Süd West Nord Horizontal												
Wetter 1:	-6.0	°C	5	25	5	5	5	5	W/m <sup>2</sup>			
Wetter 2:	-5.0	°C	5	5	5	5	5	5	W/m <sup>2</sup>			

Bauteile	Fläche m <sup>2</sup>	U-Wert W/(m <sup>2</sup> K)	Faktor immer 1.0	TempDiff 1 K	TempDiff2 K	P <sub>T 1</sub> Watt	P <sub>T 2</sub> Watt
1. Aussenwand 1	353.2	0.119	1.0	26 bzw. 25	=	1093	bzw. 1051
2. Aussenwand 2	101.4	0.162	1.0	26 bzw. 25	=	427	bzw. 410
3. Türen	20.5	1.500	1.0	3 bzw. 3	=	92	bzw. 92
4. Dach	240.8	0.092	1.0	26 bzw. 25	=	576	bzw. 554
5. Terrasse	29.6	0.110	1.0	26 bzw. 25	=	85	bzw. 82
6. Kellerdecke	252.7	0.102	1.0	10 bzw. 10	=	258	bzw. 258
7. Innenwände 1,2,4,5	193.5	0.372	1.0	3 bzw. 3	=	216	bzw. 216
8. Innenwände 3	54.7	0.421	1.0	-2 bzw. -2	=	-46	bzw. -46
9. Fenster	175.9	0.824	1.0	26 bzw. 25	=	3768	bzw. 3623

**Transmissionswärmelast P<sub>T</sub>** Summe = 6468 bzw. 6239

Lüftungsanlage:	wirksames Luftvolumen V <sub>L</sub>	A <sub>EB</sub> m <sup>2</sup>	lichte Raumhöhe m	m <sup>3</sup>
Wärmebereitstellungsgrad des Plattenwärmetauschers	η <sub>WRG</sub> 75%	576.2	2.42	1395
Wärmebereitstellungsgrad des Erdeichwärmetauschers	η <sub>EWT</sub> 33%	η <sub>L-Anlage</sub> 1/h	Φ <sub>WRG</sub>	η <sub>L,Rest</sub> 1/h
	energetisch wirksamer Luftwechsel η <sub>L</sub>	0.489	(1 - 0.83)	+ 0.024 = 0.106

Lüftungswärmelast P <sub>L</sub>	V <sub>L</sub> m <sup>3</sup>	η <sub>L</sub> 1/h	c <sub>Luft</sub> Wh/(m <sup>3</sup> K)	TempDiff 1 K	TempDiff2 K	P <sub>L 1</sub> W	P <sub>L 2</sub> W
Lüftungswärmelast P <sub>L</sub>	1395.5	0.106	0.33	26.0 bzw. 25.0	=	1271	bzw. 1222

**Summe Wärmelast P<sub>V</sub>** P<sub>T</sub> + P<sub>L</sub> = 7739 bzw. 7461

Ausrichtung der Fläche	Fläche m <sup>2</sup>	g-Wert (senkr. Einstrahlung)	Reduktionsfaktor gl. Blatt Fenster	Strahlung 1 W/m <sup>2</sup>	Strahlung 2 W/m <sup>2</sup>	P <sub>S 1</sub> W	P <sub>S 2</sub> W
1. Ost	37.33	0.53	0.53	5 bzw. 5	=	52	bzw. 52
2. Süd	51.74	0.53	0.56	25 bzw. 5	=	381	bzw. 76
3. West	35.04	0.53	0.56	5 bzw. 5	=	52	bzw. 52
4. Nord	51.74	0.53	0.53	5 bzw. 5	=	72	bzw. 72
5. Horizontal	0.00	0.00	0.45	5 bzw. 5	=	0	bzw. 0
6.				bzw.	=	0	bzw. 0

**Wärmeangebot Solarlast P<sub>S</sub>** Summe = 557 bzw. 252

Interne Wärmelast P <sub>I</sub>	spez. Leistung W/m <sup>2</sup>	A <sub>EB</sub> m <sup>2</sup>	P <sub>I 1</sub> W	P <sub>I 2</sub> W
Interne Wärmelast P <sub>I</sub>	1.6	576	922	bzw. 922

Wärmegewinne P <sub>G</sub>	P <sub>S</sub> + P <sub>I</sub>	P <sub>G 1</sub> W	P <sub>G 2</sub> W
Wärmegewinne P <sub>G</sub>	P <sub>S</sub> + P <sub>I</sub>	1479	bzw. 1174

Heizwärmelast P <sub>H</sub>	P <sub>V</sub> - P <sub>G</sub>	6260	bzw. 6287
Heizwärmelast P <sub>H</sub>		6287	W

Wärmelast, von Zuluft transportiert P <sub>Zuluft:Max</sub>	Zulufttemperatur ohne Nachheizung θ <sub>zu,Min</sub> 16 °C	Zulufttemperatur Max. θ <sub>zu,Max</sub> 52 °C	Watt	
Wärmelast, von Zuluft transportiert P <sub>Zuluft:Max</sub>			8188	14.2 W/m <sup>2</sup>

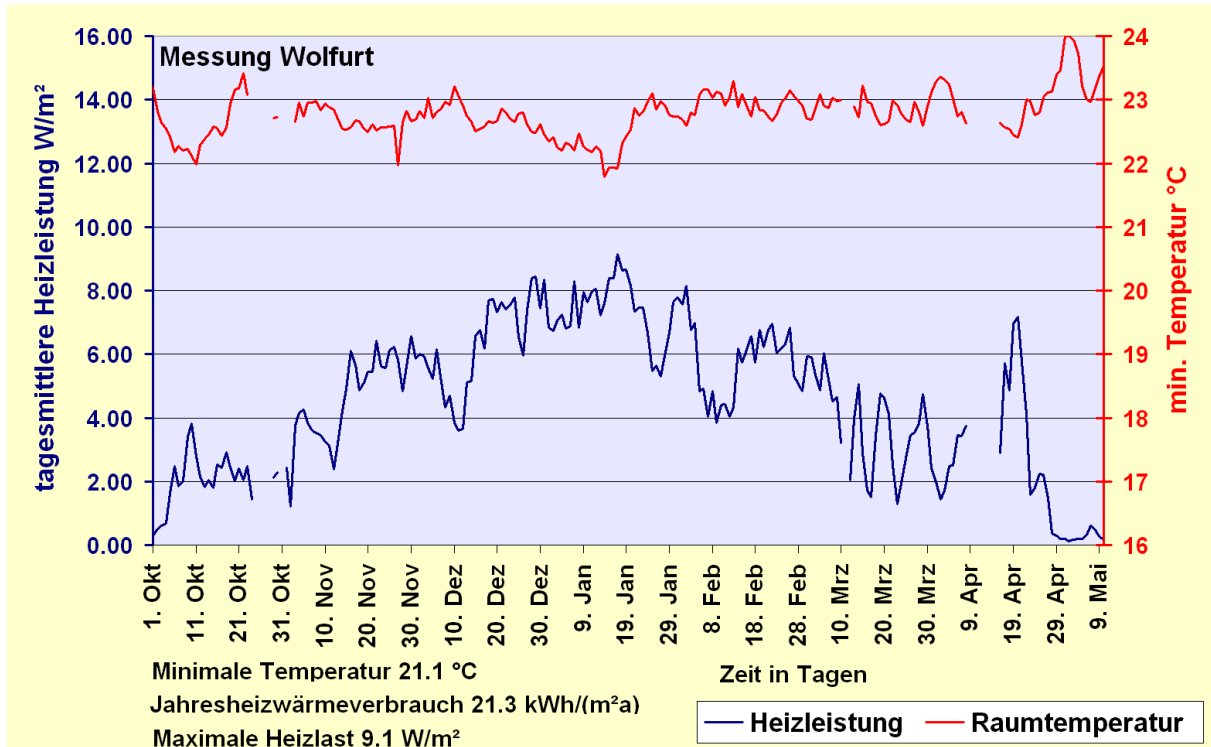


Abbildung 88: Gemessene Heizleistung und Innentemperatur im Zeitverlauf; Projekt Wolfurt.

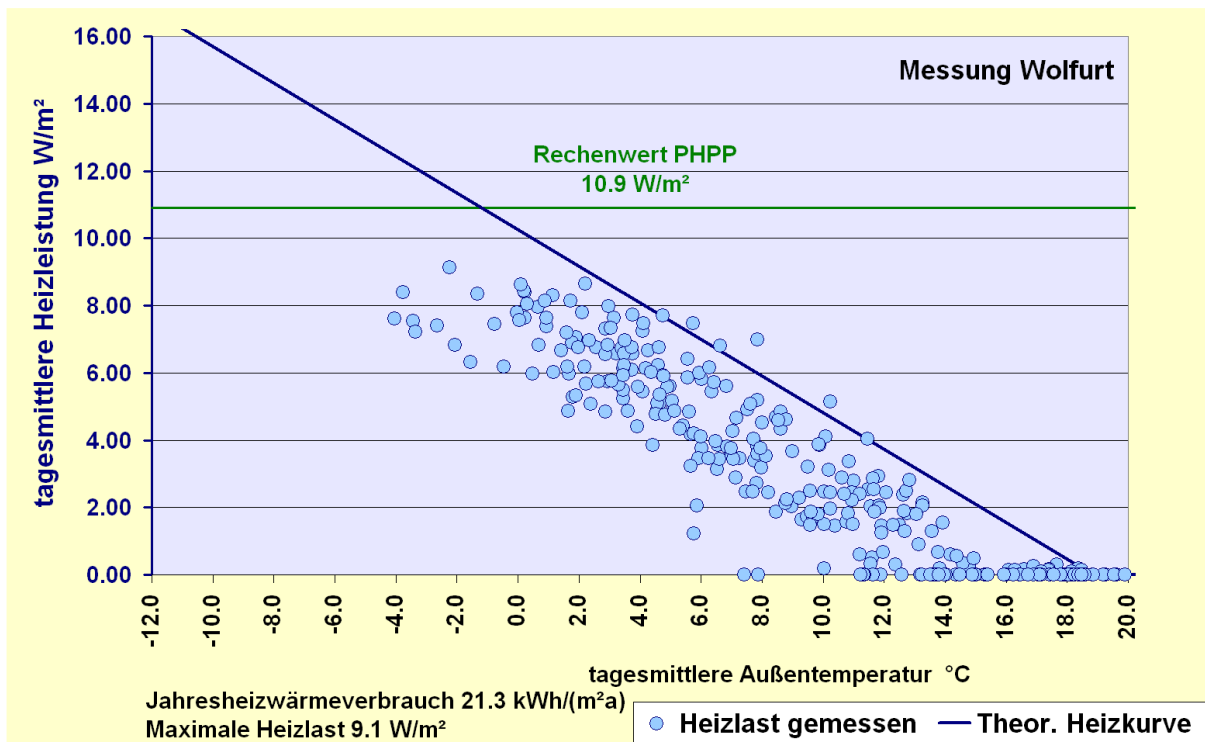


Abbildung 89: Heizgerade und gemessene tagesmittlere Heizleistungen beim CEPHEUS-Projekt Wolfurt (Messwinter 2000/01).

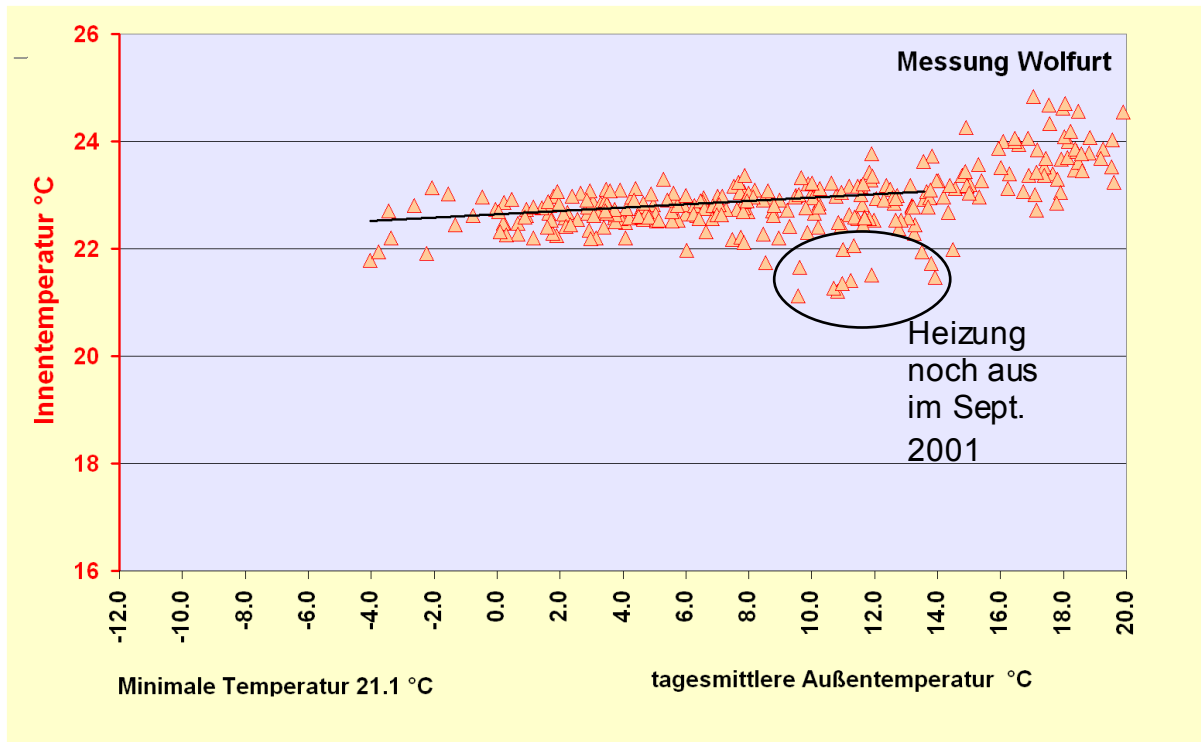


Abbildung 90: Winterkorrelation zwischen Innen- und Außentemperatur (Projekt Wolfurt 2000/01); die Behaglichkeit war unter allen Randbedingungen sichergestellt, die Innentemperaturen lagen bei niedrigen Außentemperaturen immer über 21.8 °C; die niedrigeren Temperaturen um 21.5 °C (Ellipse) traten vor Einschalten der Pelletsheizung im September 2001 auf.

## 4.6 Dornbirn-Knie, Vorarlberg (Einfamilienhaus)

In Dornbirn-Knie wurde im Rahmen des CEPHEUS-Projektes durch den Bauträger Fussenegger & Rümmele ein Einfamilienhaus in einem innovativen Bausystem errichtet (Lage: 550 m ü NN). Planer waren die Architekten Simon Rümmele und Gerhard Ströhle (Dornbirn)(vgl. Tabelle 17). Es handelt sich um eine Mischbauweise mit Betondecken und vorgefertigten Holz-Leichtbauteilen in der Gebäudehülle. Beheizt wird das Einfamilienhaus mit 125 m<sup>2</sup> Bezugsfläche (TFA) über ein Wärmepumpen-Kompaktaggregat und alleinige Zuluftnachheizung.

Gegenüber der im CEPHEUS-Bericht publizierten PHPP-Berechnung wurden für das in Tabelle 18 dokumentierte Heizlastblatt die Infiltration an den gemessenen  $n_{50}$ -Wert von 1.15 h<sup>-1</sup> angepasst und die Bemessungstemperatur auf den Messwert der mittleren Raumtemperatur im beheizten Betrieb von 21.5 °C heraufgesetzt. Mit den in [Krapmeier/Drössler 2001] und [Krapmeier, Müller 2001-28] publizierten energetischen Daten des Einfamilienhauses ergibt sich so nach dem PHPP-Heizlastblatt rechnerisch eine maximale Heizlast von 16.8 W/m<sup>2</sup>. Dieser Wert liegt eigentlich deutlich über der Passivhausgrenze; mit dem Auslegungsvolumenstrom können gleichwohl 13.5 W/m<sup>2</sup> durch Zuluftnacherwärmung in das Haus abgegeben werden; zusammen mit dem Bad-Handtuchheizkörper steht sogar eine noch etwas größere Leistung bereit.

In Abbildung 91 sind der zeitliche Verlauf der mittleren Innentemperatur und der gemessenen Heizleistungen im Jahr 2000/2001 dargestellt. Bis 19. Dezember 2000 war das System nicht in Betrieb. Darauf folgend ist die Anheizphase zu erkennen, in der mit maximal verfügbarer Leistung (16.8 W/m<sup>2</sup>) das Einfamilienhaus von 14° auf 21.5 °C erwärmt wurde. Ab etwa 19.1.2001 ist auch die massive Struktur vollständig durcherwärmt; nun kann man von einem annähernd regulären Betrieb ausgehen; die Leistungen liegen nun nur noch maximal bei 10 bis 12 W/m<sup>2</sup>, demnach sogar deutlich geringer, als nach den PHPP-Heizlast-Algorithmen. Die mit dargestellte Anheizphase ist eine Ausnahmesituation, wie sie in Passivhäusern eigentlich vermieden werden sollte. Es ist aber interessant zu sehen, dass mit der vorhandenen Ausstattung selbst diese Situation gemeistert werden kann.

Abbildung 92 zeigt die Heizkurvendarstellung für das Einfamilienhaus Dornbirn-Knie. Die Messwerte vor Bezug sind als helle Dreiecke dargestellt (nahe der Nulllinie). Die in der Anheizphase deutlich höheren Leistungen sind mit Quadratsymbolen gekennzeichnet. Selbst diese Werte liegen aber immer noch unter dem PHPP-Heizlastrechenwert von 16.8 W/m<sup>2</sup>. Die regulären Messwerte (Routen) ab dem 19.01.2001 betragen bis auf einzelne Ausreißer maximal 10 W/m<sup>2</sup>.

Dass die verfügbare Leistung für den normalen Betrieb auch ausreicht, zeigt die Korrelationsanalyse in Abbildung 93. Die Punkte mit unbeheiztem Haus bilden eine Gruppe für sich (eingekreist). Trotz teilweiser Außentemperaturen unter dem Gefrierpunkt fallen die Raumtemperaturen nicht unter 12 °C; auch diese empirische Erkenntnis stimmt mit der Theorie bei Passivhäusern überein. Ohne Heizung ist die Außentemperaturabhängigkeit aber ausgeprägt: Die Steigung einer Ausgleichgeraden für die Wolke der zum unbeheizten Zustand gehörenden Messpunkte beträgt etwa 0.5 °C/°C. Für die Messwerte bei eingeschaltetem Kompaktheizgerät ab 19.12.2000 ist die Außentemperaturabhängigkeit mit 0.0053 °C/°C nicht signifikant und in der Höhe vernachlässigbar.

Tabelle 17: Daten des CEPHEUS-Einfamilienhauses Dornbirn-Knie.

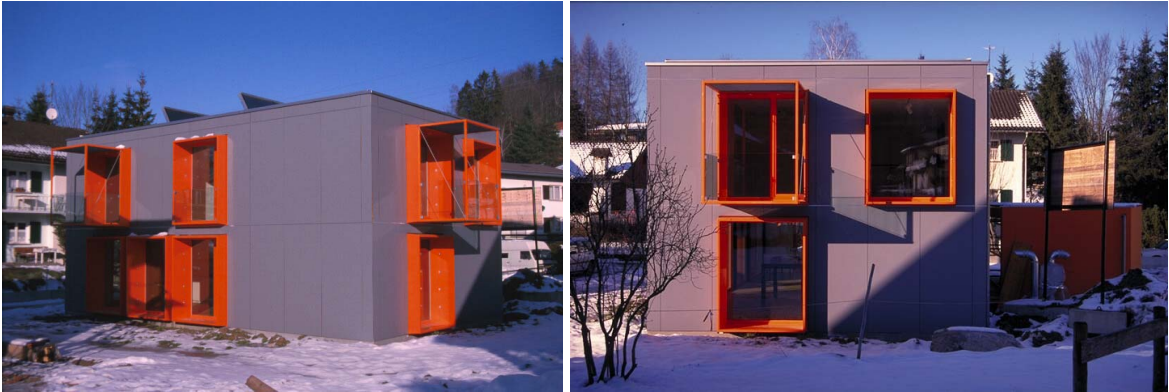
			
<p>Ansicht : Süd <span style="margin-left: 200px;">Ansicht: Südost (Fotos: EIV)</span></p>			
<b>Projektbeschreibung</b>			
<b>Adresse</b>	<b>A-6850 Dornbirn, Vorarlberg</b>		
<b>Bauherr</b>	Fussenegger & Rümmele GmbH, Dornbirn		
<b>Architekt</b>	Simon Rümmele und Gerhard Ströhle, Dornbirn		
<b>Fachingenieure</b>	Haustechnik: Drexel Solarlufttechnik und Lüftungsbau GmbH, Bregenz Bauphysik: Architekturbüro Dr. Lothar Künz, Hard		
<b>Bauzeit</b>	Baubeginn: April 1999, Fertigstellung: Okt. 1999		
<b>Gebäudetyp</b>	Einfamilienhaus		
<b>Nutzung</b>	Musterhaus		
<b>Zahl Wohneinheiten</b>	1		
<b>Wohnnutzfläche</b>	124.6 m <sup>2</sup>		
<b>Konstruktion</b>			
<b>Konstruktionsart</b>	Mischbauweise: Stahlskelett und Stahlbetondecken, vorgefertigte Holzleichtbau-Wandelemente		
<b>Fenster u. Verglasung</b>	3-Scheiben- Wärmeschutzverglasung, g-Wert: 53 %, Holz-Fensterrahmen		
<b>U-Werte (W/(m<sup>2</sup>K))</b>	Außenwand 1: 0.12; Außenwand 2: 0.09; Boden: 0.14; Dach: 0.10; Verglasung: 0.70; Fensterrahmen: 1.5; Fenster gesamt: 0.89		
<b>Haustechnik</b>			
<b>Heizung</b>	Vorwärmung der Frischluft durch Erdreichwärmetauscher, Zuluft-nachheizung durch die Luft-Luft/Wasser-Wärmepumpe des Lüftungs-Kompaktgerätes		
<b>Lüftung</b>	Kontrollierte Be- und Entlüftung mit Wärmerückgewinnung aus der Abluft		
<b>Warmwasser</b>	Solarkollektor (6 m <sup>2</sup> ), 190 l Brauchwasserspeicher (integriert in das Lüftungs-Kompaktgerät) gespeist von der Luft-Luft/Wasser-Wärmepumpe bzw. direkt elektrisch (falls erforderlich)		
<b>Elektrogeräte</b>	Keine Angaben		
<b>Energetische Kenngrößen</b>			
<b>Energiebezugsfl. (TFA)</b>	125 m <sup>2</sup>		
<b>Jahresheizwärme- verbrauch (gemessen)</b>	22.3 kWh/(m <sup>2</sup> a), (Im ersten Jahr, bei 21.5°C inkl. Anheizphase: nicht repräsentativ)	<b>Maximale Heizlast (gemessen, erstes Jahr)</b>	16.3 W/m <sup>2</sup> mit Anheizen 14.7 W/m <sup>2</sup> ohne Anheizen
<b>Heizwärmebedarf (berechnet nach PHPP, gemäß Baudaten, bei 21.5 °C Innentemperatur)</b>	27 kWh/(m <sup>2</sup> a)	<b>Maximale Heizlast nach PHPP; bei 21.5 °C Innen- temperatur</b>	16.8 W/m <sup>2</sup>

Tabelle 18: PHPP-Heizlastberechnung für das Einfamilienhaus Dornbirn-Knie.

## Passivhaus-Projektierung HEIZWÄRMELAST

Objekt: Flex-Bausystem, EFH Knie		Gebäudetyp/Nutzung: EFH	
Standort: Dornbirn		Energiebezugsfläche AEB: 125 m <sup>2</sup>	
Wetterregion (01 - 12): 12 Bodensee mit Umgebung, z.B. Friedrichshafen			
Auslegungstemperatur Strahlung: Ost Süd West Nord Horizontal			
Wetter 1: -6.0 °C		5	25
Wetter 2: -5.0 °C		5	5
Innentemp. °C: 21.50			

Bauteile	Fläche m <sup>2</sup>	U-Wert W/(m <sup>2</sup> K)	Faktor immer 1.0	TempDiff 1 K	TempDiff 2 K	P <sub>T</sub> 1 Watt	P <sub>T</sub> 2 Watt
1. Außenwand 1	125.9	0.121	1.0	27.5 bzw. 26.5	=	419	bzw. 404
2. Außenwand 2	64.2	0.091	1.0	27.5 bzw. 26.5	=	161	bzw. 155
3. Dach	89.7	0.101	1.0	27.5 bzw. 26.5	=	249	bzw. 240
4. Kellerdecke	89.7	0.143	1.0	11.5 bzw. 11.5	=	148	bzw. 148
5.			1.0	27.5 bzw. 26.5	=		bzw.
6.			1.0	27.5 bzw. 26.5	=		bzw.
7.			1.0	27.5 bzw. 26.5	=		bzw.
8. Fenster	42.3	0.894	1.0	27.5 bzw. 26.5	=	1040	bzw. 1002

**Transmissionswärmelast P<sub>T</sub>** Summe = 2016 bzw. 1949

Lüftungsanlage:		wirksames Luftvolumen V <sub>L</sub>	A <sub>EB</sub> m <sup>2</sup>	lichte Raumhöhe m	m <sup>3</sup>
Wärmebereitstellungsgrad des Plattenwärmetauschers	η <sub>WRG</sub> 75%		124.6	2.33	290
Wärmebereitstellungsgrad des Erdreichwärmetauschers	η <sub>EWRT</sub> 33%				
energetisch wirksamer Luftwechsel n <sub>L</sub>		0.482	(1 - 0.83)	+ 0.081	= 0.161

Lüftungswärmelast P <sub>L</sub>		V <sub>L</sub> m <sup>3</sup>	n <sub>L</sub> 1/h	c <sub>Luft</sub> Wh/(m <sup>3</sup> K)	TempDiff 1 K	TempDiff 2 K	P <sub>L</sub> 1 W	P <sub>L</sub> 2 W
		290.4	0.161	0.33	27.5	bzw. 26.5	425	bzw. 409

**Summe Wärmelast P<sub>V</sub>** P<sub>T</sub> + P<sub>L</sub> = 2441 bzw. 2358

Ausrichtung der Fläche	Fläche m <sup>2</sup>	g-Wert (senkr. Einstrahlung)gl. Blatt Fenster	Reduktionsfaktor	Strahlung 1 W/m <sup>2</sup>	Strahlung 2 W/m <sup>2</sup>	P <sub>S</sub> 1 W	P <sub>S</sub> 2 W
1. Ost	16.00	0.53	0.53	5	5	23	bzw. 23
2. Süd	20.20	0.53	0.57	25	5	153	bzw. 31
3. West	4.07	0.53	0.53	5	5	6	bzw. 6
4. Nord	2.03	0.53	0.53	5	5	3	bzw. 3
5. Horizontal	0.00	0.53	0.45	5	5	0	bzw. 0
6.						0	bzw. 0

**Wärmeangebot Solarlast P<sub>S</sub>** Summe = 184 bzw. 62

Interne Wärmelast P <sub>I</sub>		spez. Leistung W/m <sup>2</sup>	A <sub>EB</sub> m <sup>2</sup>	P <sub>I</sub> 1 W	P <sub>I</sub> 2 W
		1.6	125	199	bzw. 199

**Wärmegewinne P<sub>G</sub>** P<sub>S</sub> + P<sub>I</sub> = 383 bzw. 261

**Heizwärmelast P<sub>H</sub>** P<sub>V</sub> - P<sub>G</sub> = 2058 bzw. 2097

**Wärmelast, von Zuluft transportiert P<sub>Zuluft;Max</sub>** = 2097 W  
= 16.8 W/m<sup>2</sup>  
= 1680 bzw. 13.5 W/m<sup>2</sup>



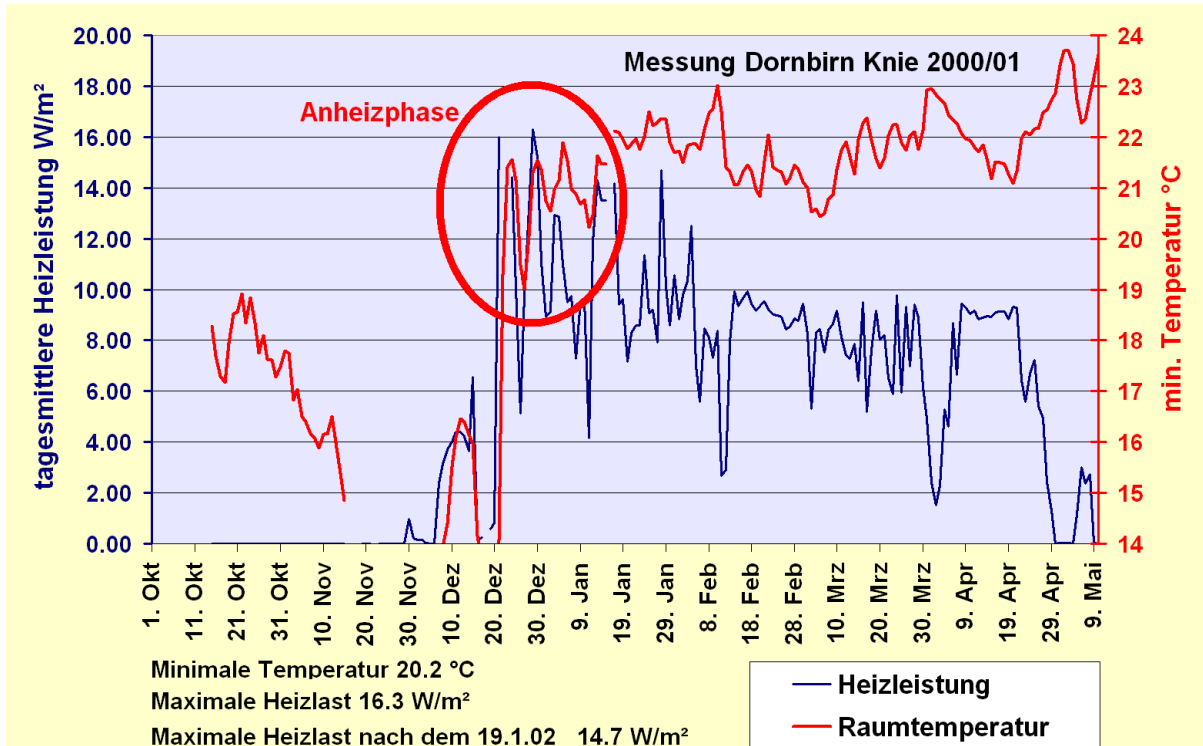


Abbildung 91: Zeitverlauf von Heizlast und mittlerer Raumtemperatur im CEPHEUS-Projekt Dornbirn-Knie; Messungen aus dem ersten Winter inkl. Anheizphase.

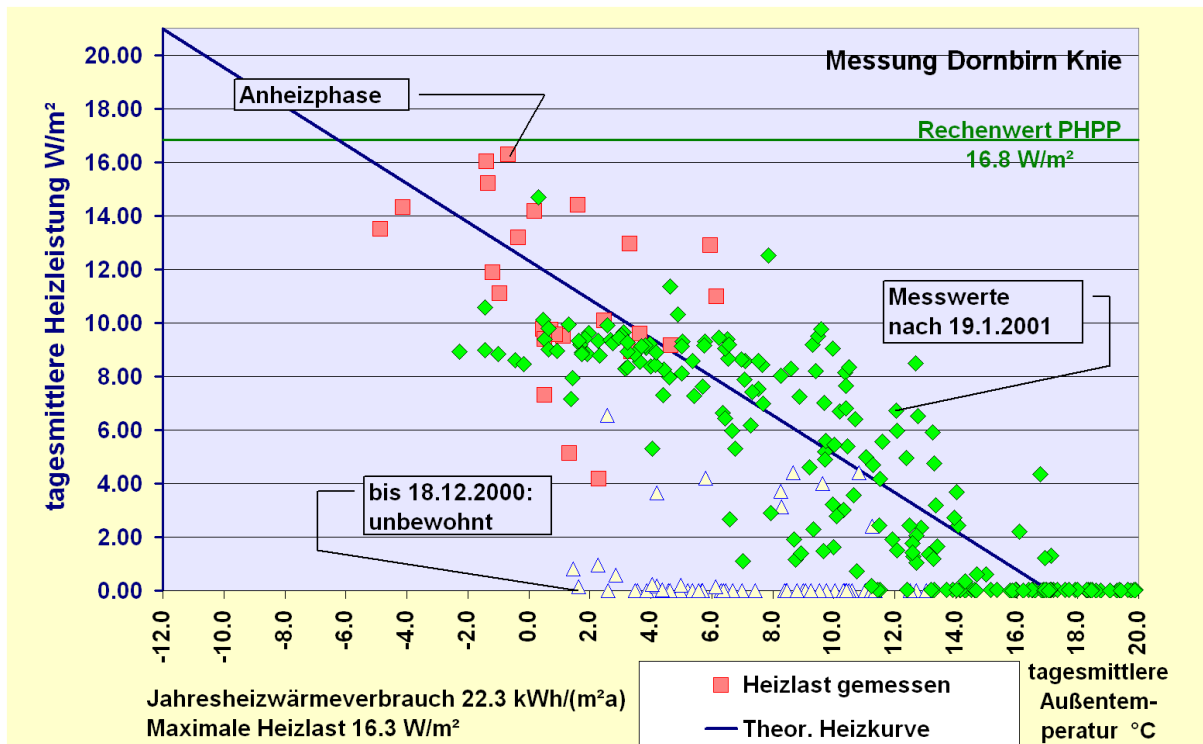


Abbildung 92: Heizkurvendarstellung für die gemessenen Heizlastwerte aus dem Projekt Dornbirn-Knie, erster Winter 2000/01, inkl. Anheizphase.

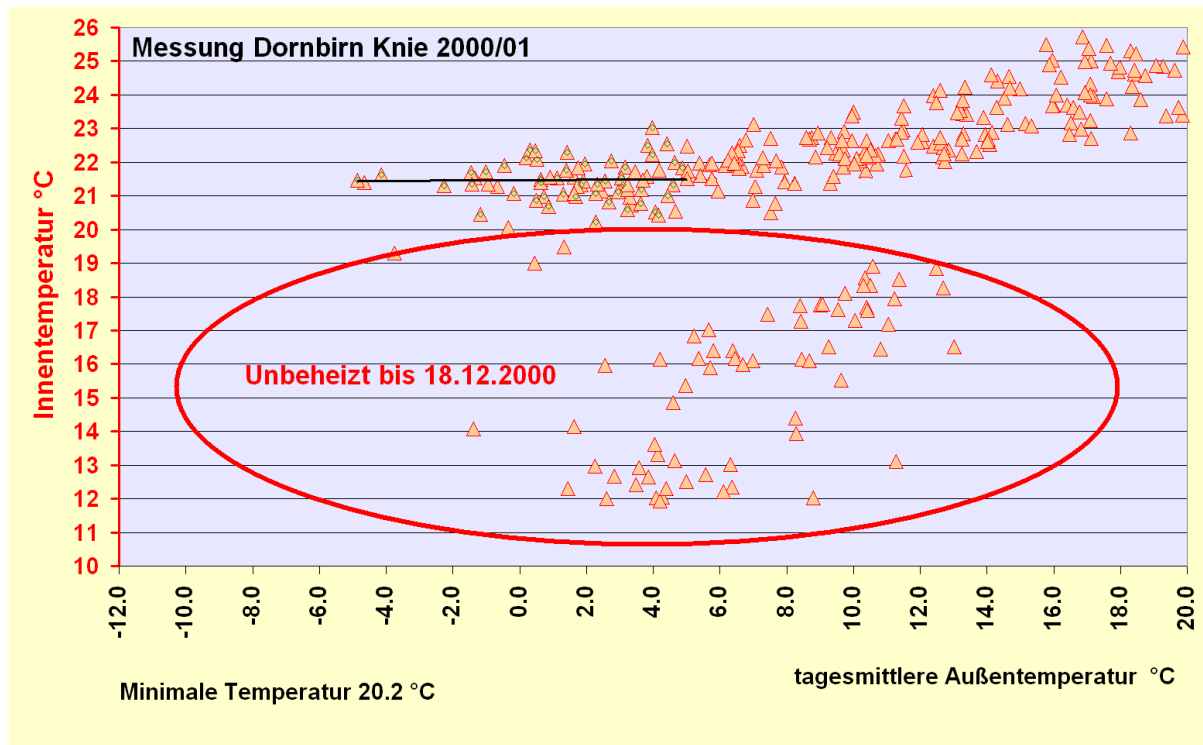


Abbildung 93: Korrelation zwischen Innen- und Außentemperatur beim Einfamilienhaus Dornbirn-Knie im ersten Winter 2000/01, inkl. unbeheiztem Zeitraum und Anheizphase.

Die Analyse der Messdaten aus dem ersten Betriebswinter des Einfamilienhauses in Dornbirn-Knie zeigt:

- Selbst in der Anheizphase nach wochenlangem Nichtbetrieb des Kompaktgerätes reicht die verfügbare Zuluftheizleistung ( $16.8 \text{ W/m}^2$ ) aus, den Wohnraum auf akzeptable Temperaturen zu bringen; die massive Struktur benötigt einen etwas längeren Zeitraum, bis sie auch im Kern durcherwärmt ist.
- Die regulären maximalen Heizleistungen liegen mit um  $12 \text{ W/m}^2$  deutlich unter dem PHPP-Heizlastrechenwert.
- Im regulären Betrieb ist die Raumtemperatur räumlich und zeitlich sehr gleichmäßig.
- Die Streuung um die theoretische Heizgerade herum ist wie bei jedem Einfamilienhaus (wegen  $N=1$ ) hoch.

Das Heizlastverfahren hat sich auch in diesem extremen Fall bewährt.

## 4.7 Gnigl, Salzburg (6 WE)

Das CEPHEUS-Projekt in Salzburg-Gnigl ist ein Mehrfamilien-Wohnhaus mit sechs Mietwohneinheiten. Die Gebäudehülle wurde mit hochwärmedämmenden Passivhaus-Komponenten ausgeführt; die Hauptfassade ist vollständig verglast, konnte jedoch auf Grund der Situation am Bauplatz nicht nach Süden ausgerichtet werden, sondern ist um  $48^\circ$  nach Westen gedreht. Darüber hinaus ist der Bauplatz sehr stark verschattet - sowohl durch die Topographie (Berg im Südosten) als auch durch die nahe stehende Nachbarbebauung. Das Projekt würde in einer ähnlichen Lage wie das unter 4.4 beschriebene Projekt in Hörbranz einen Heizwärmebedarf unter  $15 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$  aufweisen. In der vorliegenden konkreten Situation am Bauplatz liegt der zu  $20^\circ\text{C}$  Innentemperatur ermittelte Jahresheizwärmebedarf nach PHPP jedoch bei  $24 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ . Mit diesem Projekt wird damit die Anwendbarkeit des Heizlastverfahrens auch bei guten Niedrigenergiehäusern auf die Probe gestellt.

Tabelle 19 dokumentiert wesentliche Daten des Projektes, in Tabelle 20 wird die PHPP-Heizlastberechnung wiedergegeben; mit den Daten aus der Projektbeschreibung und dem im ersten Winter gemessenen mittleren Temperaturniveau in den Wohnungen ergibt sich rechnerisch eine maximale Heizlast von etwa  $17 \text{ W}/\text{m}^2$ . Diese liegt deutlich über dem üblichen Grenzwert für Passivhäuser, wegen der hohen Belegungsdichte des Gebäudes und dem damit verbundenen hohen Luftwechsel wäre eine Beheizung über die Zuluft aber auch hier möglich. Im Gebäude wurde allerdings zusätzlich zur Zulufterwärmung eine Flächenheizung installiert. Die Wärmeversorgung erfolgt über einen zentralen Holzpelletskessel; damit besteht praktisch keine Begrenzung der verfügbaren Heizleistung nach oben.

Wie Abbildung 94 zeigt, wurde die rechnerisch ermittelte maximale Heizlast im ersten Betriebswinter zu drei im Zeitverlauf gekennzeichneten Zeitabschnitten deutlich überschritten: Der gemessene Maximalwert lag mit  $22.9 \text{ W}/\text{m}^2$  um 38% über der Projektierung. Die Gründe für die höheren abgenommen Leistungen können der Grafik allerdings direkt entnommen werden:

- Hohe Leistungen traten in der Zeit vom 12. bis 16. Oktober 2000 bei Außentemperaturen zwischen  $15$  und  $19^\circ\text{C}$  auf. Es handelt sich um die Aufheizphase und den Probetrieb vor Bezug des Gebäudes. Die Raumtemperaturen steigen dabei zeitweise über  $24^\circ\text{C}$  und sinken in der Folge allmählich wieder auf  $21^\circ\text{C}$ .
- In der Zeit vom 17. bis 24. Dezember 2000 steigen die mittleren Raumtemperaturen im Gebäude von  $21.8$  auf  $23.5^\circ\text{C}$ . Dieser instationäre Heizbetrieb führt Spitzenheizlastwerten bis  $22.9 \text{ W}/\text{m}^2$ . Es handelt sich um einen regeltechnisch bedingten Artefakt, der mit den verfügbaren hohen Leistungen erzeugt werden kann.
- Eine weitere Leistungsspitze gibt es vom 14. bis 17. Januar 2001, nachdem an kalten Tagen des 12. und 13. Januar eine unzureichend niedrige Wärmezufuhr erfolgt war (um  $5 \text{ W}/\text{m}^2$ ), die zu einem Temperaturabfall auf ca.  $21.7^\circ\text{C}$  geführt hatte. Nach der erneuten Anheizphase mit erhöhter Leistung wird das vorherrschende Temperaturniveau von  $22.6$  bis  $23^\circ\text{C}$  wieder erreicht.

Bei den Phasen hoher Leistung handelt es sich nach der vorliegenden Analyse um Ausnahmephänomene des Betriebes im ersten Jahr.

Tabelle 19: CEPHEUS Projekt 08 - Austria, Gnigl; nach [Schnieders 2001], überarbeitet.



			
Ansicht: Nordwest		Ansicht: Südost	
<b>Projektbeschreibung</b>			
<b>Adresse</b>	A-5020 Salzburg-Gnigl, Salzburg		
<b>Bauherr</b>	Heimat Österreich, Salzburg		
<b>Architekt</b>	Atelier 14, Mag. Erich Wagner, Mag. Walter Scheidher, Salzburg		
<b>Fachingenieure</b>	Haustechnik: Eco Energie-Systeme, Dornbirn Bauphysik: Energie und Bau Institut, Dr. Georg Stahl, Salzburg		
<b>Bauzeit</b>	Baubeginn: Nov. 99, Fertigstellung: Sept. 2000		
<b>Gebäudetyp</b>	Mehrfamilienhaus		
<b>Nutzung</b>	Sozialwohnungen		
<b>Zahl der Wohneinheiten</b>	6		
<b>Wohnnutzfläche</b>	332 m <sup>2</sup>		
<b>Konstruktion</b>			
<b>Konstruktionsart</b>	Stahlbetonschottenbauweise, Außenwände als selbsttragende Leichtbaukonstruktion		
<b>Fenster u. Verglasung</b>	Spezialverbundglas mit Kryptonfüllung, Glasfassade ist schall- und wärmetechnisch optimiert, g-Wert: 47 %, Orientierung 48° gegen Süd mit Kork gedämmter Holz-Aluminium-Fensterrahmen		
<b>U-Werte (W/(m<sup>2</sup>K))</b>	Außenwand: 0.11; Kellerdecke: 0.13; Dach: 0.10; Verglasung: 0.6; Fensterrahmen: 0.8; Fenster gesamt: 0.77		
<b>Haustechnik</b>			
<b>Heizung</b>	Kombiniertes Luft- und Flächenheizsystem, zentraler 3200 l Pufferspeicher gespeist von Pelletskessel und Solarkollektor (20 m <sup>2</sup> )		
<b>Lüftung</b>	Dezentrale kontrollierte Lüftung mit Wärmerückgewinnung aus der Abluft		
<b>Warmwasser</b>	Solarkollektor und Pelletskessel speisen den zentralen Pufferspeicher		
<b>Elektrogeräte</b>	Keine Angaben vorhanden		
<b>Energetische Kenngrößen</b>			
<b>Energiebezugsfl. (TFA)</b>	328 m <sup>2</sup>		
<b>Jahresheizwärmeverbrauch (gemessen, ohne Anheizphase)</b>	30 kWh/(m <sup>2</sup> a), (Im ersten Jahr, bei 22.6°C Innentemperatur)	<b>Maximale Heizlast (gemessen, erstes Jahr, bis inkl. III 2001)</b>	22.9 W/m <sup>2</sup> a)
<b>Heizwärmebedarf (berechnet nach PHPP, gemäß Baudaten, bei 22.6 °C Innentemperatur)</b>	33 kWh/(m <sup>2</sup> a)	<b>Maximale Heizlast nach PHPP; bei 22.6 °C Innentemperatur</b>	16.6 W/m <sup>2</sup> a)

Tabelle 20: PHPP-Heizlastberechnung für das CEPHEUS-Projekt Salzburg-Gnigl.

## Passivhaus-Projektierung HEIZWÄRMELAST

Objekt: Salzburg-Gnigl		Gebäudetyp/Nutzung: Mehrfamilienhaus	
Standort: Salzburg-Gnigl		Energiebezugsfläche AEB: 329 m <sup>2</sup>	
Wetterregion (01 - 12): 9 Alpenvorland von ca. 600-1000 m Höhe, nordwestlicher Schwarzwald, z.B. München			
Auslegungstemperatur Strahlung: Ost Süd West Nord Horizontal			
Wetter 1:	-8.0 °C	15	60 15 5 5 W/m <sup>2</sup>
Wetter 2:	-4.0 °C	5	5 5 5 5 W/m <sup>2</sup>
Innentemperatur °C	22.6		

Bauteile	Fläche m <sup>2</sup>	U-Wert W/(m <sup>2</sup> K)	Faktor immer 1.0	TempDiff 1 K	TempDiff 2 K	P <sub>T 1</sub> Watt	P <sub>T 2</sub> Watt
1. AW	236.5	0.112	1.0	30.64 bzw. 26.64	=	812	bzw. 706
2. Dach	203.1	0.100	1.0	30.64 bzw. 26.64	=	622	bzw. 541
3. Kellerdecke	203.1	0.133	1.0	12.64 bzw. 12.64	=	341	bzw. 341
4. Türen	12.0	0.350	1.0	30.64 bzw. 26.64	=	129	bzw. 112
5.			1.0	30.64 bzw. 26.64	=		bzw.
6. Wbrücken außen (Länge/m)	584.5	0.022	1.0	30.64 bzw. 26.64	=	396	bzw. 345
7. Wbrücken Boden (Länge/m)	91.7	0.093	1.0	30.64 bzw. 26.64	=	261	bzw. 227
8. Fenster+Fassade	121.0	0.719	1.0	30.64 bzw. 26.64	=	2666	bzw. 2318
<b>Transmissionswärmelast P<sub>T</sub></b>						<b>Summe =</b>	<b>5227 bzw. 4589</b>

Lüftungsanlage:		wirksames Luftvolumen V <sub>L</sub>	A <sub>EB</sub> m <sup>2</sup>	lichte Raumhöhe m	m <sup>3</sup>			
Wärmebereitstellungsgrad	η <sub>WRG</sub> 85%		328.5	2.50	821			
des Plattenwärmetauschers								
Wärmebereitstellungsgrad des	η <sub>EWRT</sub> 0%	η <sub>L,Anlage</sub> 1/h	Φ <sub>WRG</sub>	η <sub>L,Rest</sub> 1/h	1/h			
Erdreichwärmetauschers								
energetisch wirksamer Luftwechsel n <sub>L</sub> 0.609 * (1 - 0.85) + 0.041 = 0.132								
Lüftungswärmelast P <sub>L</sub>		V <sub>L</sub> m <sup>3</sup>	n <sub>L</sub> 1/h	c <sub>Luft</sub> Wh/(m <sup>3</sup> K)	TempDiff 1 K	TempDiff 2 K	P <sub>L 1</sub> W	P <sub>L 2</sub> W
		821.3	0.132	0.33	28.0	24.0	1005	bzw. 861
<b>Summe Wärmelast P<sub>V</sub></b>						<b>P<sub>T</sub> + P<sub>L</sub> =</b>	<b>6232 bzw. 5451</b>	

Ausrichtung der Fläche	Fläche m <sup>2</sup>	g-Wert (senkr. Einstrahlung)gl. Blatt Fenster	Reduktionsfaktor	Strahlung 1 W/m <sup>2</sup>	Strahlung 2 W/m <sup>2</sup>	P <sub>S 1</sub> W	P <sub>S 2</sub> W
1. Ost	11.16	0.42	0.22	15	5	16	bzw. 5
2. Süd	0.00	0.42	0.45	60	5	0	bzw. 0
3. West	109.80	0.42	0.35	15	5	243	bzw. 81
4. Nord	0.00	0.42	0.45	5	5	0	bzw. 0
5. Horizontal	0.00		0.45	5	5	0	bzw. 0
6.						0	bzw. 0
<b>Wärmeangebot Solarlast P<sub>S</sub></b>						<b>Summe =</b>	<b>258 bzw. 86</b>

Interne Wärmelast P <sub>I</sub>		spez. Leistung W/m <sup>2</sup>	A <sub>EB</sub> m <sup>2</sup>	P <sub>I 1</sub> W	P <sub>I 2</sub> W
		1.6	329	526	bzw. 526
<b>Wärmegewinne P<sub>G</sub></b>				<b>P<sub>S</sub> + P<sub>I</sub> =</b>	<b>784 bzw. 612</b>
<b>Heizwärmelast P<sub>H</sub></b>				<b>P<sub>V</sub> - P<sub>G</sub> =</b>	<b>5448 bzw. 4839</b>
<b>Wärmelast, von Zuluft transportiert P<sub>Zuluft:Max</sub></b>				<b>=</b>	<b>5448 W</b>
<b>Wärmelast, von Zuluft transportiert P<sub>Zuluft:Max</sub></b>				<b>=</b>	<b>16.6 W/m<sup>2</sup></b>
Zulufttemperatur ohne Nachheizung		ϑ <sub>zu,Min</sub> 16 °C	Zulufttemperatur Max. ϑ <sub>zu,Max</sub> 52 °C	Watt	
<b>Wärmelast, von Zuluft transportiert P<sub>Zuluft:Max</sub></b>				<b>=</b>	<b>18.2 W/m<sup>2</sup></b>

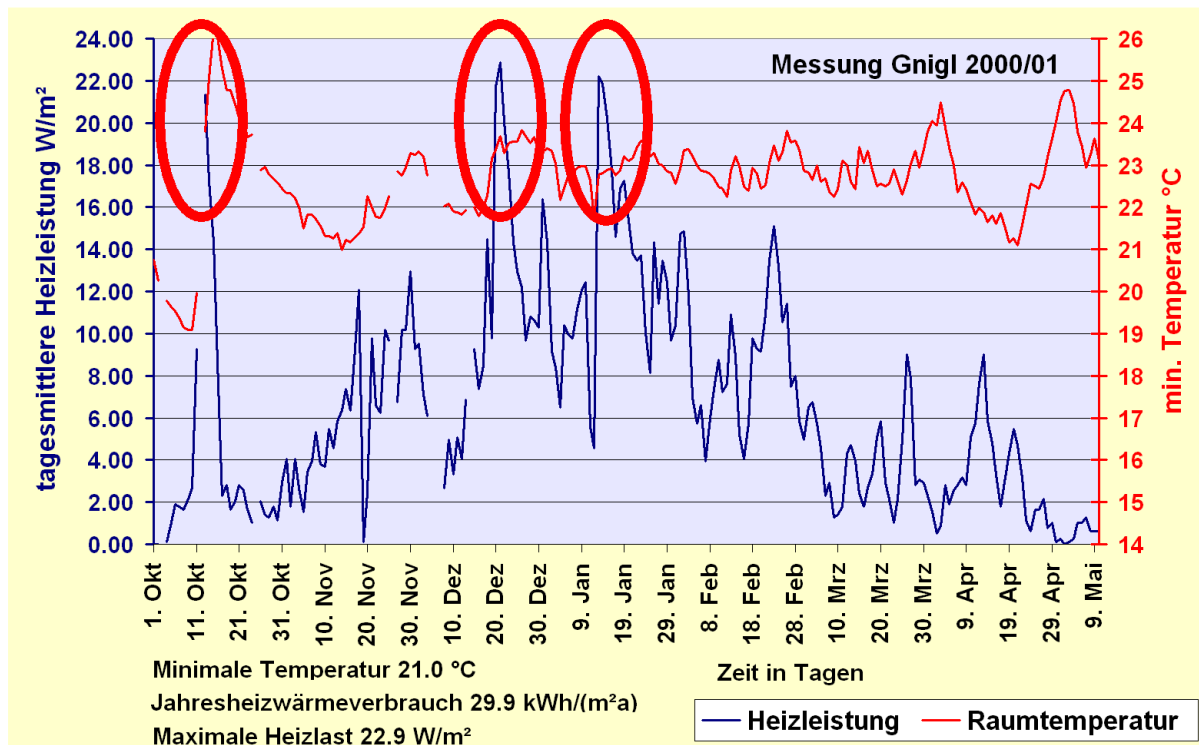


Abbildung 94: Zeitverlauf von Messwerten der tagesmittleren Heizleistung und der mittleren Raumtemperaturen im ersten Betriebsjahr des Mehrfamilienhauses in Salzburg-Gnigl. Ausreißerzeiträume sind hervorgehoben.

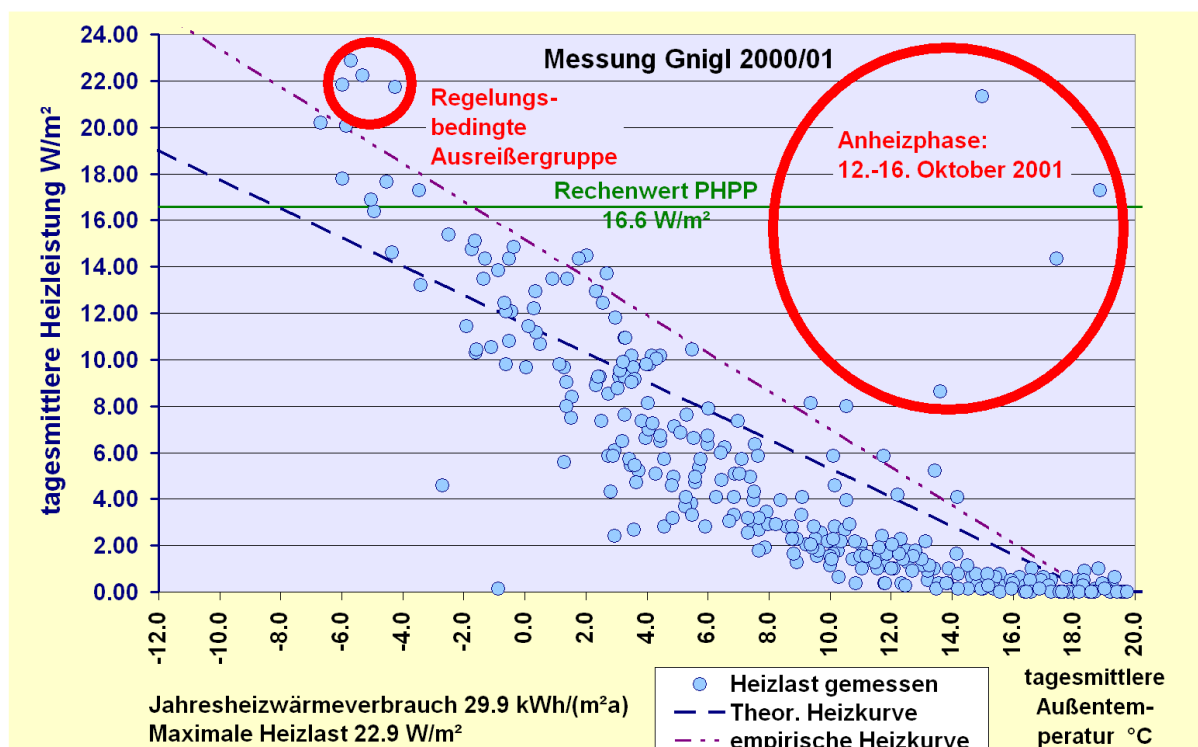


Abbildung 95: Heizkurve für das Mehrfamilienhaus Salzburg Gnigl, zusammengestellt aus den in Abbildung 94 gezeigten Messdaten. Klar als Ausreißer erkennbar sind die Werte in der Anheizphase. Verantwortlich für die weiteren über der Berechnung liegenden Heizlasten sind zwei Gründe: Höhere spezifische Wärmeverluste (naheliegender durch die empirische Heizkurve wiedergegeben) und Regelungseigenschaften der außentemperaturgeführten Regelung (Temperaturen im Gebäude werden bei niedrigen Außentemperaturen angehoben).



Abbildung 95 zeigt die gemessenen Heizleistungen in der Heizkurvendarstellung. Die bereits erklärten Ausreißer sind wieder hervorgehoben. Der Gesamtverlauf der Werte legt aber nahe, dass bei diesem Projekt die temperaturspezifischen Wärmeverluste (nach vorliegendem PHPP 204 W/K) in der Realität höher sind. Die empirisch ermittelte Heizkurve ist in Abbildung 95 strichpunktiert eingetragen. Hinweise auf höhere Wärmeverluste geben die inzwischen erfolgten Nachmessungen der Gebäudeluftdichtheit, nach denen der  $n_{50}$ -Wert für das Gebäude im fertig bezogenen Zustand eher um  $1 \text{ h}^{-1}$  liegt. Die signifikante Verschlechterung der Luftdichtheitskennwerte ist auf Anschlussdetails wie Silikonfugen und Kompribänder zurückzuführen [Krapmeier, Müller 2001a], (vgl. auch [Peper 1999] für alternative Lösungen).

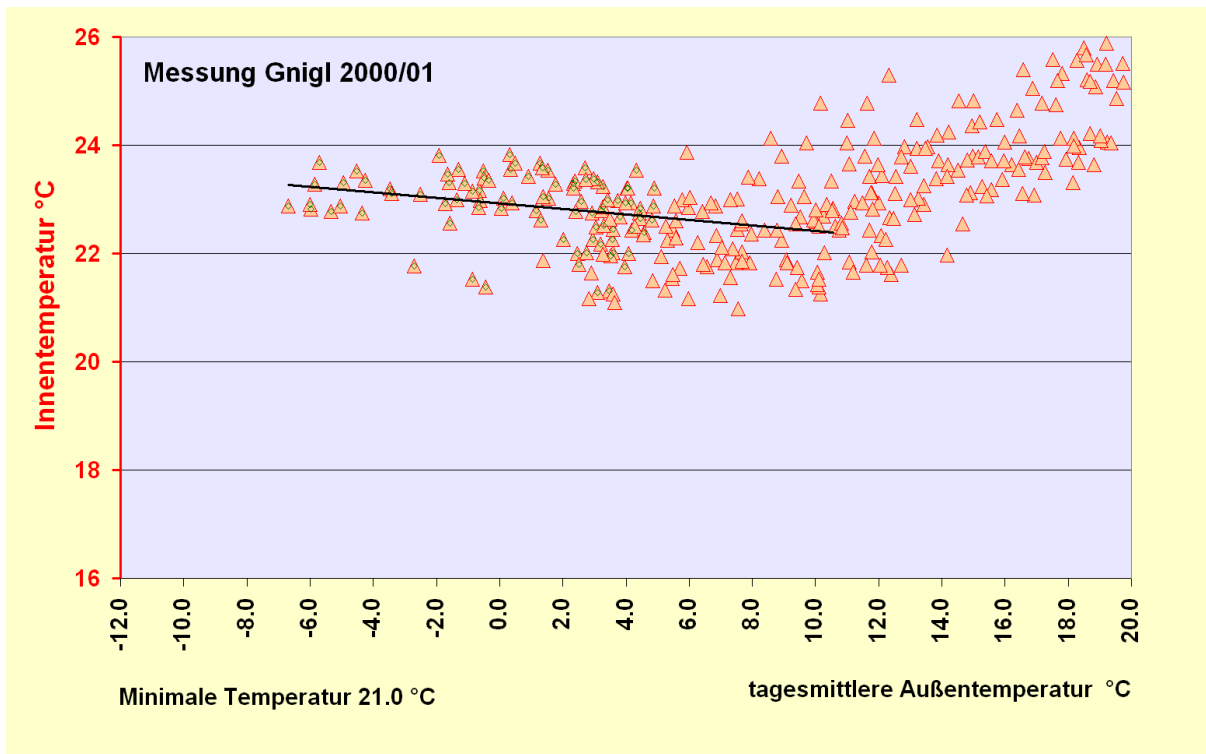


Abbildung 96: Korrelation zwischen Innen- und Außentemperatur beim CEPHEUS-Projekt Salzburg Gnigl. Auffällig ist die signifikant negative Steigung der Ausgleichsgeraden im Winter; es handelt sich um einen Regelungsartefakt.

Abbildung 96 zeigt eine weitere Besonderheit bei diesem Projekt: Die gemessenen Raumtemperaturen nehmen mit abnehmender Außentemperatur im Winter deutlich und signifikant zu. Dieses Regelverhalten ist für außentemperaturgeführte Vorlauftemperaturen in Heizsystemen bekannt; bei Gebäuden mit sehr niedrigem Wärmebedarf erzeugt dieses Regelverhalten zunehmende Heizleistungen nicht nur wegen der höheren Wärmeverluste, sondern auch wegen des instationären Aufheizwärmebedarfs für die thermisch angekoppelte innere Baukonstruktion. Auch dieser Effekt trägt zu den hohen Heizleistungen bei, die im ersten Betriebsjahr gemessen wurden.

Die Messdaten aus dem CEPHEUS-Projekt Salzburg-Gnigl liegen in nicht vernachlässigbaren Zeiträumen über dem Rechenansatz nach dem PHPP-Heizlastverfahren. Die Gründe dafür liegen einerseits in verschlechterten thermischen Kennwerten des Gebäudes (insbesondere Luftdichtheit), andererseits in Erstjahreseffekten wie temporären Aufheizevorgängen und einer Regelung, die zu einer Temperaturerhöhung im Gebäude bei abnehmenden Außentemperaturen führt.

## 4.8 Kuchl, Salzburg (25 WE)

In Salzburg-Kuchl wurde im Rahmen von CEPHEUS eine dreigeschossige Wohnanlage mit insgesamt 25 Sozialwohnungen gebaut. Es handelt sich um eine Mischbauweise mit massivem Kern und wärmedämmender Leichtbauhülle. Tabelle 21 zeigt eine aktualisierte Dokumentation für dieses Projekt, in Tabelle 22 wird der Rechengang des PHPP-Heizlastblattes wiedergegeben. Gegenüber den in den CEPHEUS-Dokumenten verwendeten Planungsdaten wurden im hier berechneten PHPP die neueren Messergebnisse der Luftdichtheitsprüfungen ( $n_{50} = 1.4 \text{ h}^{-1}$ ) verwendet. Dadurch ergeben sich höhere Rechenwerte sowohl für die maximale Heizlast als auch für den Jahresheizwärmebedarf gegenüber den CEPHEUS-Werten: Die maximale Heizlast beträgt  $11.6 \text{ W/m}^2$  und der Jahresheizwärmebedarf  $24.8 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$  bei der gemessenen mittleren Raumtemperatur von  $23.1 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Mit dem Projekt Salzburg-Kuchl wird ein Mehrgeschosswohnungsbau mit geringerer thermischer Kopplung zwischen den Wohnungen untersucht und damit das Spektrum der Testfälle erweitert.

Abbildung 97 zeigt den zeitlichen Verlauf von mittleren Raumtemperaturen und tagesmittlerer wohnflächenspezifischer Heizleistung im ersten Jahr beim Projekt Kuchl. Bezug und Beginn der Messungen lagen hier relativ spät. Die eigentliche Anheizphase ist in den aufgezeichneten Messdaten (im Gegensatz zu Gnigl) nicht enthalten. Die Raumtemperaturen liegen bis auf wenige Zeiträume im Durchschnitt über  $23 \text{ }^\circ\text{C}$ . Der Verlauf der gemessenen Heizleistung ist gleichmäßiger als beim Gnigl-Projekt. Eine Heizlast von  $9.9 \text{ W/m}^2$  wird zu keinem Zeitpunkt überschritten.

Genaueren Aufschluss liefert die Heizkurvendarstellung in Abbildung 98. Die eingezeichnete theoretische Heizgerade ist mit einer aktualisierten Fassung des PHPP bestimmt und berücksichtigt bereits die neue Messung der Gebäudedichtheit mit  $n_{50} = 1.4 \text{ h}^{-1}$ . Die gemessenen Werte für die tagesmittleren Heizlast liegen dennoch teilweise über der theoretischen Heizgeraden, insbesondere im Bereich der tagesmittleren Außenlufttemperaturen von  $1$  bis  $6 \text{ }^\circ\text{C}$ . Der Rechenwert nach PHPP für die maximale Heizlast von  $11.6 \text{ W/m}^2$  wird allerdings von keinem Messwert erreicht, das gemessene Maximum liegt bei  $9.9 \text{ W/m}^2$ . Das Gebäude in Kuchl hat keine ausgesprochen hohen passiv solaren Beiträge, da die Fenstergrößen eher normal sind. Daher streuen die gemessenen Heizleistungswerte auch nicht besonders ausgeprägt bei einem festen Wert der Außentemperatur.

Die Korrelation zwischen Innen- und Außentemperatur beim CEPHEUS-Projekt Kuchl im ersten Betriebswinter zeigt keinen signifikanten Zusammenhang, eher ist die Steigung im Winter leicht negativ (Abbildung 99). Das Heiz- und Wärmeverteilungssystem war zu allen Zeitpunkten problemlos in der Lage, thermisch behagliche Raumtemperaturen zu garantieren (die im Bereich von durchschnittlich  $23 \text{ }^\circ\text{C}$  lagen). Trotz der verfügbaren wesentlich höheren Leistung wurden  $9.9 \text{ W/m}^2$  zu keinem Zeitpunkt überschritten.

Die Messungen aus dem CEPHEUS-Projekt Kuchl bestätigen die Validität sowohl der Methodik der Heizlastermittlung als auch die Anwendbarkeit des Verfahrens mit zwei Auslegungsrandbedingungen nach dem PHPP-Heizlastblatt.

Tabelle 21: CEPHEUS Projekt 09 - Austria, Kuchl; nach [Schnieders 2001], überarbeitet.



			
Projektbeschreibung			
Adresse	A-5431 Kuchl, Salzburg		
Generalunternehmer	Spiluttini Bau GmbH, Schwarzach		
Bauträger/Bauherr	Bau Sparer Heim Siedlungsgemeinschaft, Salzburg		
Architekt	Eigenplanung Bau Sparer Heim, Salzburg		
Fachingenieure	Haustechnik: Team Pongau 3: Spiluttini-Kraner-Burgschwaiger Bauphysik: Dipl.-Ing. Erich Six, Salzburg		
Bauzeit	Baubeginn: Juli 1999, Fertigstellung: Juni 2000		
Gebäudetyp	Mehrfamilienhaus		
Nutzung	Sozialer Wohnungsbau		
Zahl der Wohneinheiten	25		
Wohnnutzfläche	1818 m <sup>2</sup>		
Konstruktion			
Konstruktionsart	Mischbau: Stahlbetondecken auf Stahlstützen, vorgestellte Außenwände in Holzleichtbaukonstruktion, Gebäude teilweise unterkellert		
Fenster u. Verglasung	3-Scheiben-Wärmeschutzverglasung, g-Wert: 50 %, Holz-Fensterrahmen mit Holzwerkstoffdämmung		
U-Werte (W/(m <sup>2</sup> K))	Außenwand: 0.13; Boden: 0.15; Dach: 0.10; Verglasung: 0.70; Fensterrahmen: 0.73; Fenster gesamt: 0.8		
Haustechnik			
Heizung	Holzpellets-Heizung und Solarkollektor (75 m <sup>2</sup> ) speisen einen zentralen 3000 l Pufferspeicher für Raumwärme und Warmwasser, Wärmeabgabe in den Wohnungen über Niedertemperaturradiatoren		
Lüftung	Kontrollierte Be- und Entlüftung mit Wärmerückgewinnung aus der Abluft		
Warmwasser	150 l Brauchwasserspeicher je Wohnung, versorgt vom zentralen Pufferspeicher		
Elektrogeräte	Energiesparende Haushaltsgeräte, PV-Anlage (300 Wp) für den Pumpstrom der thermischen Solaranlage		
Energetische Kenngrößen			
Energiebezugsfl. (TFA)	1798 m <sup>2</sup>		
Jahresheizwärmeverbrauch	17.8 kWh/(m <sup>2</sup> a), (Im ersten Jahr, bei 23.1°C Innentemperatur)	Maximale Heizlast (gemessen, erstes Jahr, bis inkl. III 2001)	9.9 W/m <sup>2</sup>
Heizwärmebedarf (berechnet nach PHPP, gemäß Baudaten, bei 23.1 °C Innentemperatur)	24.8 kWh/(m <sup>2</sup> a)	Maximale Heizlast nach PHPP; bei 22.4 °C Innentemperatur	11.6 W/m <sup>2</sup>

Tabelle 22: PHPP-Heizlastberechnung für das CEPHEUS-Projekt Salzburg-Kuchl.

## Passivhaus-Projektierung HEIZWÄRMELAST

Objekt: <b>Kuchl - BV Schörghofer - Block B</b>		Gebäudetyp/Nutzung: <b>MFH Block B</b>										
Standort: <b>8</b> Donaubekken und Alpenvorland bis ca. 600 m Höhe, z.B. Augsburg		Energiebezugsfläche AEB: <b>1079</b> m <sup>2</sup>										
Wetterregion (01 - 12): <b>8</b>												
Auslegungstemperatur: <b>22.40</b> °C												
Strahlung: Ost: 15, Süd: 60, West: 15, Nord: 5, Horizontal: 5 W/m <sup>2</sup>												
Wetter 1: -9.0 °C												
Wetter 2: -3.0 °C												
Innentemp °C: <b>22.40</b>												
Bauteile	Fläche m <sup>2</sup>	U-Wert W/(m <sup>2</sup> K)	Faktor immer 1.0	TempDiff 1 K	TempDiff 2 K	P <sub>T</sub> 1 Watt	P <sub>T</sub> 2 Watt					
1. AW verputzt	293.0	0.129	1.0	31.4 bzw. 25.4	=	1187	bzw. 960					
2. AW hinterlüftet	537.1	0.129	1.0	31.4 bzw. 25.4	=	2176	bzw. 1760					
3. Dachschräge	472.4	0.104	1.0	31.4 bzw. 25.4	=	1543	bzw. 1248					
4. FB gg Erde	290.7	0.158	1.0	12.4 bzw. 12.4	=	570	bzw. 570					
5. FB gg KG	148.8	0.140	1.0	12.4 bzw. 12.4	=	258	bzw. 258					
6.			1.0	31.4 bzw. 25.4	=		bzw.					
7.			1.0	31.4 bzw. 25.4	=		bzw.					
8. Fenster	194.9	0.801	1.0	31.4 bzw. 25.4	=	4900	bzw. 3964					
<b>Transmissionswärmelast P<sub>T</sub></b>						<b>Summe =</b>	<b>10633</b> bzw. <b>8760</b>					
<b>Lüftungsanlage:</b>				A <sub>EB</sub> m <sup>2</sup>	lichte Raumhöhe m	m <sup>2</sup>						
wirksames Luftvolumen V <sub>L</sub>				1079.1	2.50	= 2698						
Wärmebereitstellungsgrad des Plattenwärmetauschers	η <sub>WRG</sub>	80%				1/h						
Wärmebereitstellungsgrad des Erreichwärmetauschers	η <sub>EWRT</sub>	0%				1/h						
energetisch wirksamer Luftwechsel n <sub>L</sub>				0.534	(1 - 0.80)	+ 0.098	= 0.205					
<b>Lüftungswärmelast P<sub>L</sub></b>				V <sub>L</sub> m <sup>3</sup>	n <sub>L</sub> 1/h	c <sub>Luft</sub> Wh/(m <sup>3</sup> K)	TempDiff 1 K	TempDiff 2 K	P <sub>L</sub> 1 W	P <sub>L</sub> 2 W		
				2697.7	0.205	0.33	29.0 bzw. 23.0	=	5286	bzw. 4192		
<b>Summe Wärmelast P<sub>V</sub></b>						<b>P<sub>T</sub> + P<sub>L</sub> =</b>	<b>15920</b> bzw. <b>12952</b>					
<b>Wärmeangebot Solarlast P<sub>S</sub></b>				Ausrichtung der Fläche		Fläche m <sup>2</sup>	g-Wert (senkr. Einstrahlung) gl. Blatt Fenster	Reduktionsfaktor	Strahlung 1 W/m <sup>2</sup>	Strahlung 2 W/m <sup>2</sup>	P <sub>S</sub> 1 W	P <sub>S</sub> 2 W
				1. Ost		0.00	0.50	0.45	15 bzw. 5	=	0	bzw. 0
				2. Süd		111.78	0.50	0.47	60 bzw. 5	=	1583	bzw. 132
				3. West		0.00	0.50	0.45	15 bzw. 5	=	0	bzw. 0
				4. Nord		83.10	0.50	0.42	5 bzw. 5	=	87	bzw. 87
				5. Horizontal		0.00		0.45	5 bzw. 5	=	0	bzw. 0
						<b>Summe =</b>				<b>1670</b>	bzw.	<b>219</b>
<b>Interne Wärmelast P<sub>I</sub></b>				spez. Leistung W/m <sup>2</sup>	A <sub>EB</sub> m <sup>2</sup>	P <sub>I</sub> 1 W		P <sub>I</sub> 2 W				
				1.6	1079	= 1726		bzw. 1726				
<b>Wärmegewinne P<sub>G</sub></b>						<b>P<sub>S</sub> + P<sub>I</sub> =</b>	<b>3396</b> bzw. <b>1945</b>					
						<b>P<sub>V</sub> - P<sub>G</sub> =</b>	<b>12523</b> bzw. <b>11007</b>					
<b>Heizwärmelast P<sub>H</sub></b>						=	<b>12523</b> W					
						=	<b>11.6</b> W/m <sup>2</sup>					
Zulufttemperatur ohne Nachheizung θ <sub>zu,Min</sub> 14 °C				Zulufttemperatur Max. θ <sub>zu,Max</sub> 52 °C	Watt							
<b>Wärmelast, von Zuluft transportiert P<sub>Zuluft,Max</sub></b>						=	<b>17963</b> bzw. <b>16.6</b> W/m <sup>2</sup>					

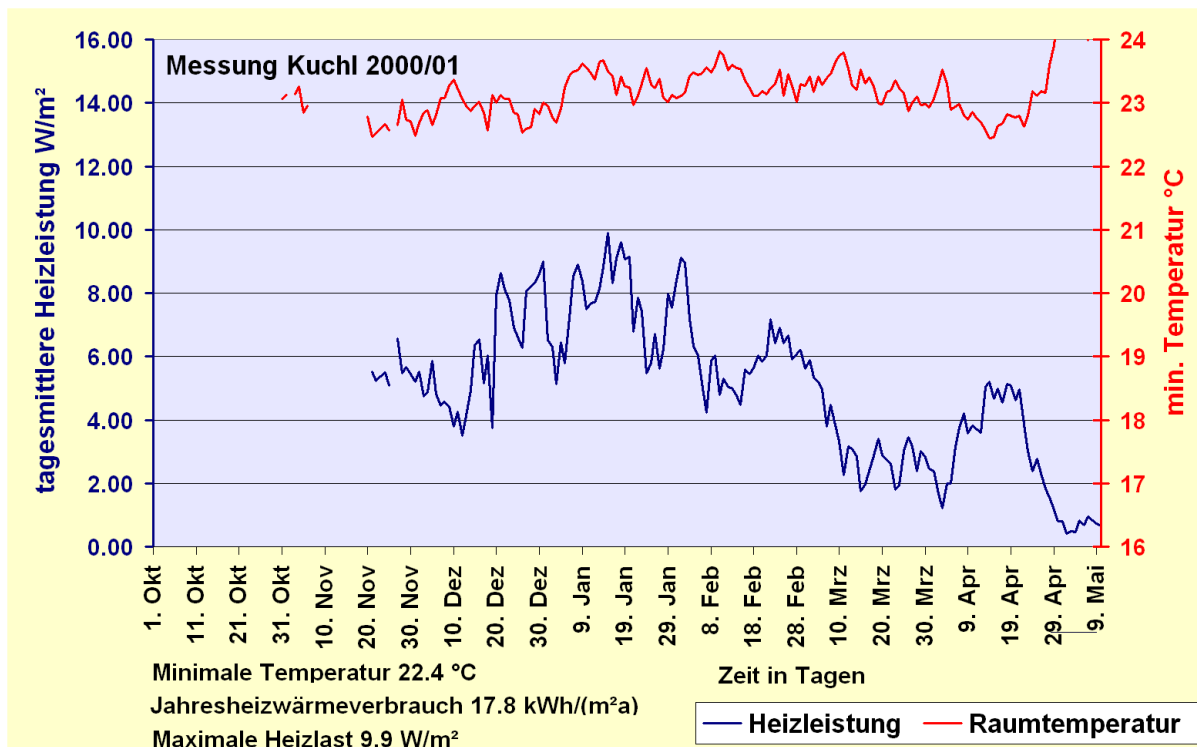


Abbildung 97: Zeitverlauf von mittleren Raumtemperaturen und tagesmittlerer wohnflächen-spezifischer Heizleistung beim CEPHEUS-Projekt Kuchl (erstes Jahr 2000/01).

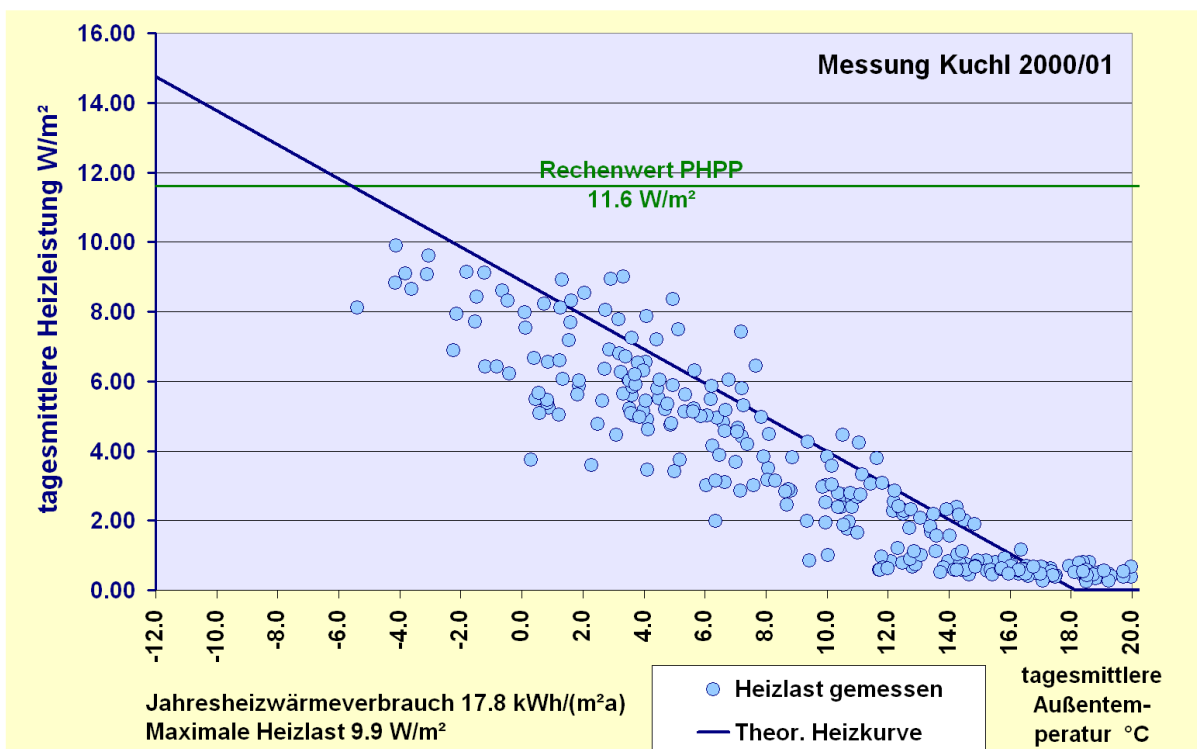


Abbildung 98: Heizkurvendarstellung der gemessenen tagesmittleren Heizlast über dem Tagesmittelwert der Außenlufttemperatur; eingezeichnet sind außerdem die theoretische Heizgerade nach PHPP und der Rechenwert nach dem PHPP-Heizlastblatt (neuere Messung der Gebäudedichtheit mit  $n_{50}=1.4 \text{ h}^{-1}$  berücksichtigt).

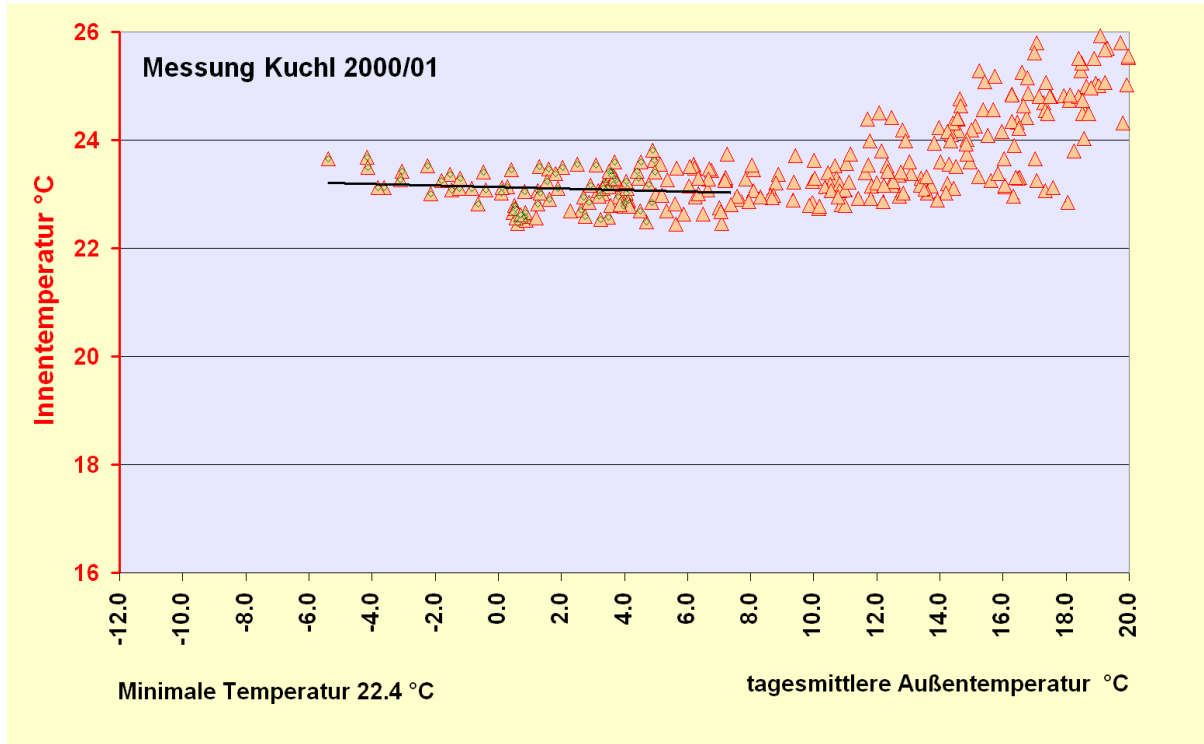


Abbildung 99: Korrelation zwischen Innen- und Außentemperatur beim CEPHEUS-Projekt Kuchl im ersten Betriebswinter (für Außentemperaturen < 8 °C). Es gibt keinen signifikanten Zusammenhang.



## 4.9 Horn, Niederösterreich (Einfamilienhaus)

In Horn/Niederösterreich wurde durch die Baufirma Buhl GmbH nach den Plänen von Architekt Treberspurg ein Einfamilien-Passivhaus errichtet. Es wurde in Mischbauweise realisiert: Die gesamte Innenstruktur ist massiv, die Südfassade und das Dach in Holzbauweise errichtet. Das Haus hat einen großzügigen Balkon, der sich über die gesamte Süd- und Westseite erstreckt; die Sommerverschattung ist im EG durch den Balkon und im Obergeschoss durch ein feststehendes horizontales Verschattungselement gelöst.

Tabelle 1 listet die wesentlichen Merkmale dieses Projektes auf. Es handelt sich um ein an die Tradition anknüpfendes, exakt südorientiertes, großzügiges Einfamilienhaus mit Satteldach. Die U-Werte der opaken Bauteile gegen Außenluft liegen um  $0.1 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ ; die Fenster haben Dreischeiben-Wärmeschutzverglasungen, aber nur in der Tiefe etwas verbesserte Holzrahmen, die jedoch beim Einbau fast bis über die gesamte Breite des Blockrahmens überdämmt wurden ( $U_w$ -Wert  $0.9 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ ). Tabelle 24 dokumentiert die Heizlastberechnung nach dem PHPP. Der ermittelte Heizlastwert von  $13.2 \text{ W}/\text{m}^2$  wäre unter Beibehaltung des Grundrisses durch den Einsatz von Passivhausfenstern und eine konsequentere Luftdichtheitskonzeption leicht auf um  $10 \text{ W}/\text{m}^2$  reduzierbar.

Das Gebäude war zum Bezugszeitpunkt im Herbst 2000 noch nicht in allen Details der thermischen Hülle vollständig fertiggestellt: es fehlten z.B. die inneren Fenster der Kastenfensterkonstruktion im Dach und die Wärmedämmung der Heizleitungen im Keller.

Abbildung 100 zeigt die Messwerte von mittlerer Innentemperatur und tagesmittlerer Heizleistung im ersten Betriebswinter 2000/01. Die Mitteltemperaturen im gesamten Gebäude liegen zwischen  $19$  und  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ . Die spezifischen Heizlasten erreichen vereinzelt Werte bis zu  $20 \text{ W}/\text{m}^2$  (am 25. Dezember), liegen aber, von Ausreißern abgesehen, sonst bei maximal etwa  $15 \text{ W}/\text{m}^2$ . Auch Abbildung 101 zeigt, dass die Rechenwerte der Heizlast einige Male um etwa  $10\%$  überschritten werden; dies leistet das Wärmebereitstellungssystem jedoch problemlos. Die höheren Leistungen sind zum größten Teil auf die noch nicht vollendete thermische Hülle zurückzuführen, zu einem weiteren Teil aber auch auf Austrocknungsvorgänge der massiven Bauteile im ersten Winter. Dies zeigt sich sehr deutlich, wenn die Messwerte vor dem 8. Februar 2001 und nach diesem Datum verglichen werden (in Abbildung 100 unmittelbar möglich, in Abbildung 101 wurden die Messpunkte ab 8. Februar als Routen dargestellt). Es zeigt sich ein deutlicher Rückgang der Leistungen bei gleichzeitig erhöhtem Innentemperaturniveau. Nach dem 8. Februar entsprechen die Messergebnisse sehr gut den Erwartungen nach den Planungsdaten dieses Einfamilienhauses. Dass die Einzelmesswerte in der Heizkurvendarstellung nicht gleichmäßig unter die Heizgerade fallen, ist allein auf die fehlende statistische Mittelung bei  $N=1$  zurückzuführen.

Tabelle 23: CEPHEUS Projekt 11 – Austria, Horn; nach [Schnieders 2001], überarbeitet.

			
Ansicht Süd		Ansicht Nordost (Fotos: Feist)	
<b>Projektbeschreibung</b>			
<b>Adresse</b>	A-3580 Horn, Niederösterreich		
<b>Bauherr</b>	Buhl Bauunternehmens GmbH		
<b>Architekt</b>	Dr. Dipl.-Ing. Martin Treberspurg, Wien		
<b>Fachingenieure</b>	Bauphysik: Dipl.-Ing. Wilhelm Hofbauer, Wien		
<b>Bauzeit</b>	Baubeginn: April 1999, Fertigstellung: Frühjahr 2000		
<b>Gebäudetyp</b>	Einfamilienhaus		
<b>Nutzung</b>	Eigentum		
<b>Zahl der Wohneinheiten</b>	1		
<b>Wohnnutzfläche</b>	179 m <sup>2</sup>		
<b>Konstruktion</b>			
<b>Konstruktionsart</b>	Fertigteilhaus in Mischbauweise, Teile der Außenwände (O,W,N) als Mauerwerk ausgeführt, sonst vorgefertigte Holzelemente mit Zellulosedämmung		
<b>Fenster u. Verglasung</b>	3-Scheiben-Wärmeschutzverglasung, g-Wert: 53 %, Holz-Fensterrahmen (weit überdämmt)		
<b>U-Werte (W/(m<sup>2</sup>K))</b>	Außenwand: 0.10; Kellerdecke: 0.13; Dach: 0.09; Fenster gesamt: 0.91		
<b>Haustechnik</b>			
<b>Heizung</b>	Vorwärmung der Frischluft durch Erdreichwärmetauscher, Holzpelletsofen und Solarkollektor (10 m <sup>2</sup> ) speisen einen 800 l Pufferspeicher (mit innenliegendem 200 l Brauchwasserspeicher), Zuluftnachheizung und Wandheizflächen (EG, OG, Bad) werden vom Pufferspeicher versorgt		
<b>Lüftung</b>	Kontrollierte Be- und Entlüftung mit Wärmerückgewinnung aus der Abluft		
<b>Warmwasser</b>	200 l Speicher (in den Pufferspeicher integriert)		
<b>Elektrogeräte</b>	Stromsparergeräte sind vorgesehen		
<b>Energetische Kenngrößen</b>			
<b>Energiebezugsfläche (TFA)</b>	173 m <sup>2</sup>		
<b>Jahresheizwärmeverbrauch</b>	28 kWh/(m <sup>2</sup> a), (Im ersten Jahr, bei 19.8°C Innentemperatur)	<b>Maximale Heizlast (gemessen, erstes Jahr)</b>	20 W/m <sup>2</sup>
<b>Heizwärmebedarf (berechnet nach PHPP, gemäß Baudaten, bei 20 °C Innentemperatur)</b>	18.6 kWh/(m <sup>2</sup> a)	<b>Maximale Heizlast nach PHPP; bei 20 °C Innentemperatur</b>	13.2 W/m <sup>2</sup>

Tabelle 24: PHPP-Heizlastblatt für das Einfamilienhaus Horn (Niederösterreich).

## Passivhaus-Projektierung HEIZWÄRMELAST

Objekt: CEPHEUS-Einfamilienhaus		Gebäudetyp/Nutzung: Einfamilienhaus	
Standort: Buhl Treberspurg Fertigteil-Passivhaus		Energiebezugsfläche AEB: 173 m <sup>2</sup>	
Wetterregion (01 - 12): 11 Hochlagen der nördlichen und westlichen Mittelgebirge, z.B. Hof			
Auslegungstemperatur Strahlung: Ost Süd West Nord Horizontal			
Wetter 1:	-9.0 °C	10	40 10 5 5 W/m <sup>2</sup>
Wetter 2:	-4.0 °C	5	5 5 5 5 W/m <sup>2</sup>
Int. °	20.00		

Bauteile	Fläche m <sup>2</sup>	U-Wert W/(m <sup>2</sup> K)	Faktor immer 1.0	TempDiff 1 K	TempDiff 2 K	=	P <sub>T</sub> 1 Watt	P <sub>T</sub> 2 Watt
1. Außenwand massiv	170.9	0.097	1.0	29 bzw. 24	24 bzw. 24	=	481	398
2. Außenwand m. hinterl.	34.3	0.102	1.0	29 bzw. 24	24 bzw. 24	=	101	84
3. Außenwand l. hinterl.	21.8	0.098	1.0	29 bzw. 24	24 bzw. 24	=	62	51
4. Außenwand leicht	27.0	0.093	1.0	29 bzw. 24	24 bzw. 24	=	73	60
5. Dach	135.2	0.085	1.0	29 bzw. 24	24 bzw. 24	=	333	276
6. Fußboden gegen Keller	119.1	0.129	1.0	10 bzw. 10	10 bzw. 10	=	154	154
7. Fenster	51.5	0.909	1.0	29 bzw. 24	24 bzw. 24	=	1358	1123

**Transmissionswärmelast P<sub>T</sub>** Summe = 2561 bzw. 2146

Lüftungsanlage:		wirksames Luftvolumen V <sub>L</sub>	A <sub>EB</sub> m <sup>2</sup>	lichte Raumhöhe m	=	m <sup>3</sup>
Wärmebereitstellungsgrad	η <sub>WRG</sub> 80%		172.8	2.50	=	432
des Plattenwärmetauschers						1/h
Wärmebereitstellungsgrad des	η <sub>EVV</sub> 33%	η <sub>Anlage</sub> 1/h	Φ <sub>WRG</sub>	η <sub>Rest</sub> 1/h		1/h
Erreichwärmetauschers		energetisch wirksamer Luftwechsel n <sub>L</sub>	0.324	(1 - 0.87)	+ 0.064	= 0.107

<b>Lüftungswärmelast P<sub>L</sub></b>	V <sub>L</sub> m <sup>3</sup>	n <sub>L</sub> 1/h	ρ <sub>Luft</sub> Wh/(m <sup>3</sup> K)	TempDiff 1 K	TempDiff 2 K	=	P <sub>L</sub> 1 W	P <sub>L</sub> 2 W
	431.9	0.107	0.33	29.0 bzw. 24.0	24.0 bzw. 24.0	=	443	366

**Summe Wärmelast P<sub>V</sub>** P<sub>T</sub> + P<sub>L</sub> = 3004 bzw. 2513

Ausrichtung der Fläche	Fläche m <sup>2</sup>	g-Wert (senkr. Einstrahlung) gl. Blatt Fenster	Reduktionsfaktor	Strahlung 1 W/m <sup>2</sup>	Strahlung 2 W/m <sup>2</sup>	=	P <sub>S</sub> 1 W	P <sub>S</sub> 2 W
1. Ost	3.25	0.53	0.28	10 bzw. 5	5 bzw. 2	=	5	2
2. Süd	34.56	0.53	0.55	40 bzw. 5	5 bzw. 51	=	407	51
3. West	7.92	0.53	0.54	10 bzw. 5	5 bzw. 11	=	23	11
4. Nord	4.25	0.53	0.32	5 bzw. 5	5 bzw. 4	=	4	4
5. Horizontal	1.53	0.40	0.62	5 bzw. 5	5 bzw. 2	=	2	2
6.				bzw.		=	0	0

**Wärmeangebot Solarlast P<sub>S</sub>** Summe = 440 bzw. 70

<b>Interne Wärmelast P<sub>I</sub></b>	spez. Leistung W/m <sup>2</sup>	A <sub>EB</sub> m <sup>2</sup>	=	P <sub>I</sub> 1 W	P <sub>I</sub> 2 W
	1.6	173	=	276	276

**Wärmegewinne P<sub>G</sub>** P<sub>S</sub> + P<sub>I</sub> = 716 bzw. 346

P<sub>V</sub> - P<sub>G</sub> = 2288 bzw. 2166

**Heizwärmelast P<sub>H</sub>** = 2288 W

= 13.2 W/m<sup>2</sup>

<b>Wärmelast, von Zuluft transportiert P<sub>Zuluft:Max</sub></b>	Zulufttemperatur ohne Nachheizung θ <sub>zu,Min</sub> 16 °C	Zulufttemperatur Max. θ <sub>zu,Max</sub> 52 °C	Watt	=	1658	9.6 W/m <sup>2</sup>
---	---	---	------	---	------	----------------------

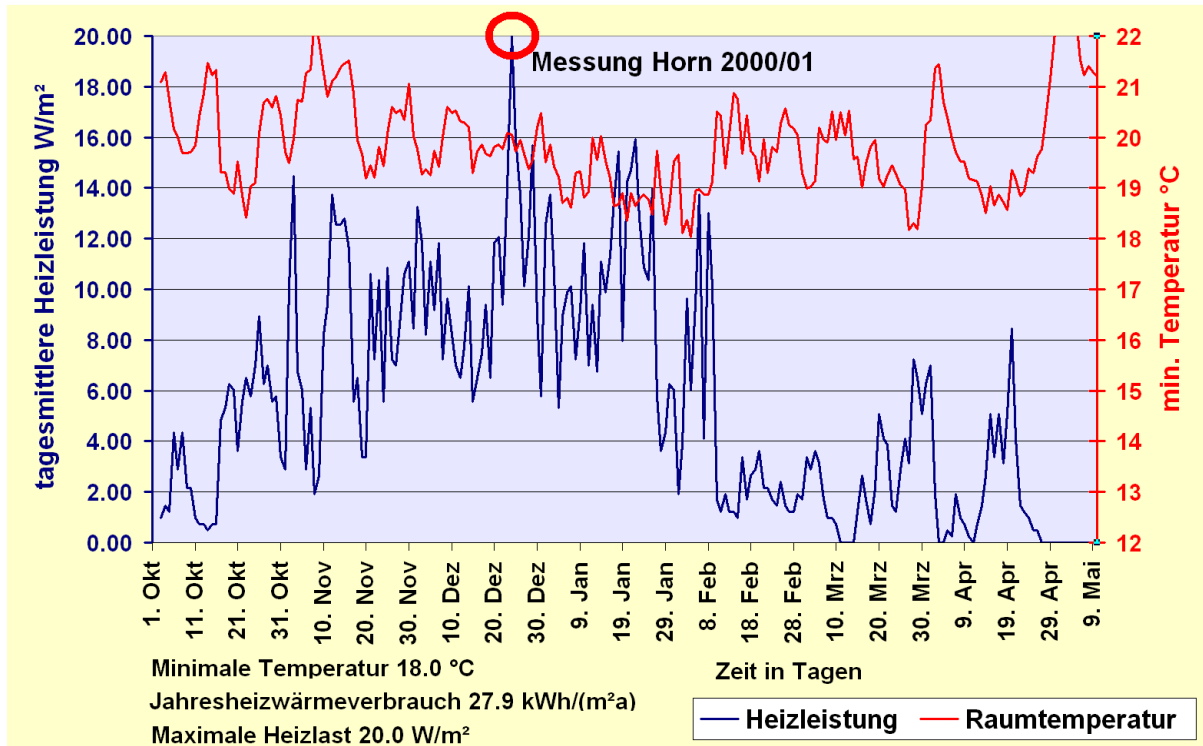


Abbildung 100: Zeitverlauf von Innentemperatur und Heizleistung für das CEPHEUS-Einfamilienhaus Horn/Niederösterreich im ersten Betriebswinter 2000/01.

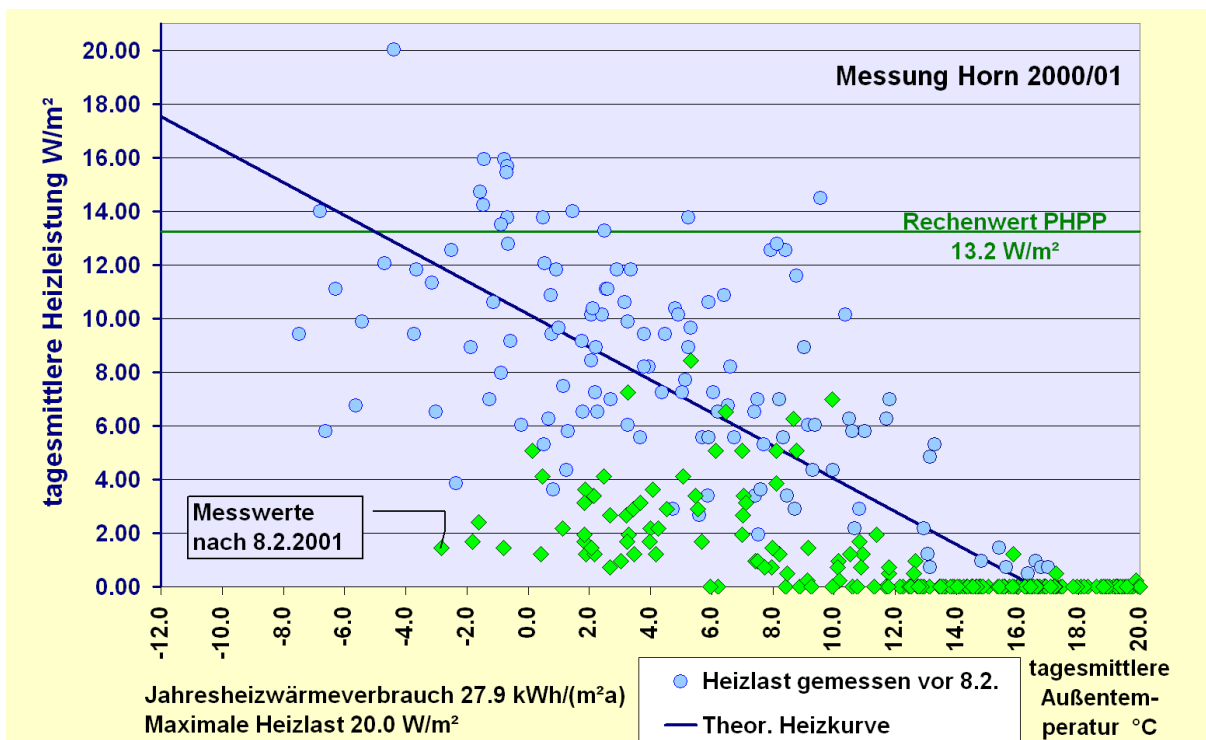


Abbildung 101: Heizkurvendarstellung für das Einfamilienhaus Horn im ersten Winter 2000/01. Messwerte vor dem 8.2.2001 sind als Kreise, danach als Routen dargestellt. Wie bei jedem Einzelhaus ist die Streuung der Messwerte sehr hoch (N = 1).

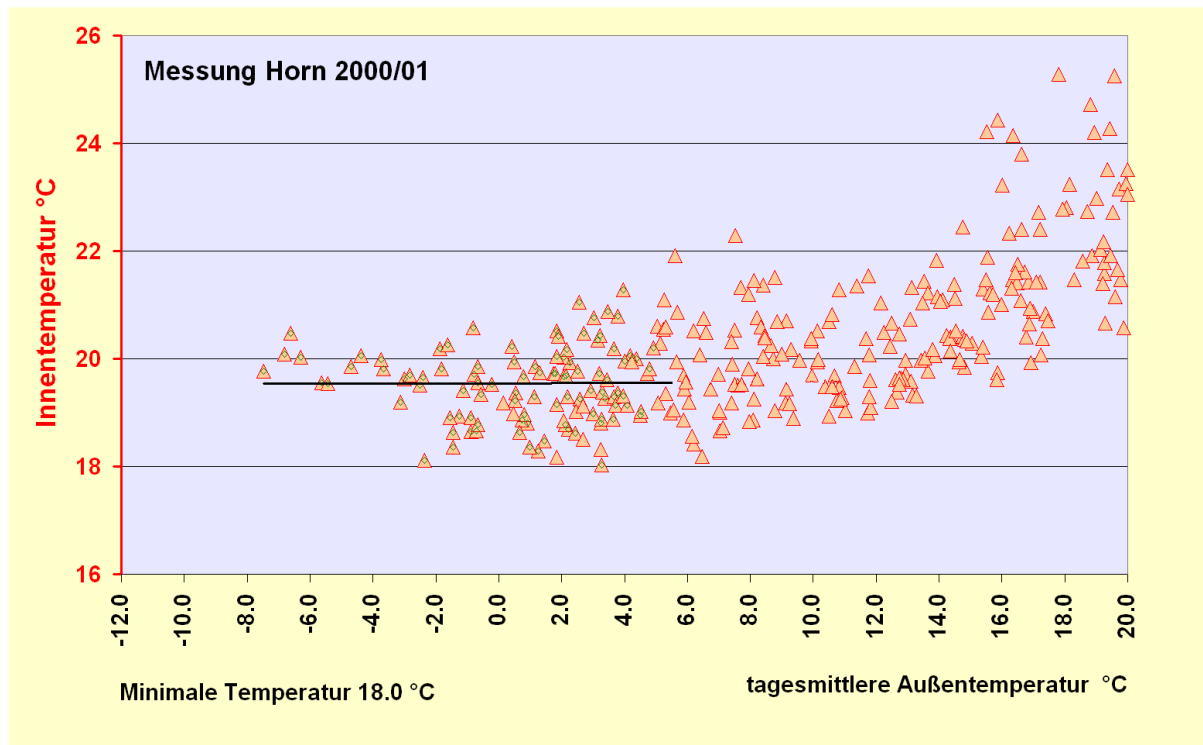


Abbildung 102 Korrelation zwischen Innen- und Außentemperatur im ersten Betriebsjahr des Einfamilienhauses Horn

Wie Abbildung 102 zeigt, gibt es keine Abhängigkeit der Raumtemperaturen von der Außenlufttemperatur: Die Ausgleichsgerade verläuft nahezu horizontal.

Die Messungen in Horn bestätigen im Grundsatz auch für das Einfamilienhaus die Heizlastberechnung nach dem hier behandelten Verfahren; es zeigt sich an den Ergebnissen, dass zu Anfang der ersten Heizperiode auf Grund noch nicht vollständiger Fertigstellungen und bei Massivbauten wegen der Trocknungsenthalpie mit zeitweise höherem Heizwärmebedarf zu rechnen ist. Im vorliegenden Gebäude ist das wegen der hohen vorhandenen Leistung des Holzpelletsofens kein Problem; bei leistungsbegrenzten Systemen (wie z.B. einer Kleinwärmepumpe) muss unter diesen Umständen im ersten Betriebswinter in geringem Umfang direkt elektrisch zugeheizt werden.

#### 4.10 Steyr-Dietach, Oberösterreich (3 WE)

Die Reihenhäuser in Steyr wurden in herkömmlichem Stil als Massivbauten von dem örtlichen Bauunternehmen Procon errichtet. Die Hauptfassade ist mit 28° Südabweichung Richtung Südwest orientiert und hat große, bis zum Boden reichende Fenstertüren. Es wurde ein traditionelles Satteldach mit einer großzügigen Schleppgaube realisiert.

Die opake Gebäudehülle ist in Kalksandsteinmauerwerk mit Wärmedämmverbundsystem errichtet ( $U=0.13 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ ), die Dachdämmung besteht aus Alu-kaschierten Dämmplatten (hier wurde die angestrebte Luftdichtheit nicht erreicht). Die Dämmung gegen den Keller wurde auf der Kellerdecke untergebracht, die thermische Trennung des aufsteigenden Mauerwerks erfolgt durch ein Schaumglasaufleger. Eine Übersicht zu den Baukonstruktionen gibt Tabelle 25.

Das oberösterreichische Baugesetz schreibt einen Notkamin vor; die damit verbundenen zusätzlichen Wärmeverluste durch Luftzirkulation sind bei der in Tabelle 26 dokumentierten Heizlastbilanz nicht enthalten. Das PHPP-Heizlastblatt ergibt eine maximale Heizlast von  $13.8 \text{ W}/\text{m}^2$ .

Die Raumwärmeversorgung des Passivhauses Steyr erfolgt ausschließlich über das Lüftungssystem. Der Wärmeerzeuger ist eine Gasbrennwerttherme mit einem Leistungsbereich von 3 bis 12 kW. Diese erwärmt im Bedarfsfall die Zuluft über ein 1.4 kW Nachheizregister je Reihenhauseinheit. In der hohen Volumenstromstufe erlaubt das Register auch einen Betrieb bis zu etwa  $14.4 \text{ W}/\text{m}^2$ . Im Bad gibt es zusätzlich ein Register aus vier Heizrohren für die kurzzeitige Erwärmung, die zugleich als Handtuchhalter dienen (150 Watt).

Der in Abbildung 103 dokumentierte Zeitverlauf von Innentemperatur und gemessener tagesmittlerer Heizleistung im ersten Betriebswinter zeigt, dass an einem Tag (24.12.2000) die volle verfügbare Leistung auch abgefordert wurde (eingekreist,  $14.3 \text{ W}/\text{m}^2$ ). Dieser Wert liegt nur geringfügig über dem Rechenwert. Die Heizlastkurven-Darstellung (Abbildung 104) verrät, dass es sich bei diesem Wert jedoch um einen Ausreißer handelt. Tatsächlich liegen die üblicherweise angeforderten Maximalwerte der Heizleistung bei um  $12 \text{ W}/\text{m}^2$  - und das bereits im ersten Winter. Da es sich um einen Massivbau handelt, sind hierin auch noch Trocknungsenthalpien enthalten.

Das Projekt ist bzgl. passiv solarer Nutzung ausgewogen: Die Heizlast ist über weite Bereiche (klare, kalte Wintertage und trübe, mäßig kalte Tage) praktisch konstant. Dass die Messwerte dennoch eine erkennbare Streuung aufweisen, die teilweise auch über die Heizgerade hinausreicht, liegt an der relativ kleinen statistischen Basis mit  $N=3$ .



Tabelle 25: CEPHEUS Projekt 12 - Austria, Steyr-Dietach; nach [Schnieders 2001], überarbeitet.



Ansicht Südost



Ansicht Nord (Fotos: Pfluger)

<b>Projektbeschreibung</b>			
<b>Adresse</b>	A-4407 Steyr-Dietach, Oberösterreich		
<b>Bauträger/Bauherr</b>	Procon Gesellschaft für Dorf- und Regionalentwicklung, Dietach		
<b>Architekt</b>	Procon, Ing. Ganglberger, Dietach		
<b>Fachingenieure</b>	Haustechnik: Energie-Institut, G. Baumgartner, P. Hausdörfer, Linz		
<b>Bauzeit</b>	Baubeginn: Sept. 1999, Fertigstellung: Feb. 2000		
<b>Gebäudetyp</b>	Reihenhaus		
<b>Nutzung</b>	Eigentum/Miete		
<b>Zahl der Wohneinheiten</b>	3		
<b>Wohnnutzfläche</b>	512 m <sup>2</sup>		
<b>Konstruktion</b>			
<b>Konstruktionsart</b>	Massivbau (Kalksandstein mit Wärmedämmverbundsystem)		
<b>Fenster u. Verglasung</b>	3-Scheiben-Wärmeschutzverglasung, g-Wert: 53 %, mit PU ausgeschäumter PVC-Fensterrahmen		
<b>U-Werte (W/(m<sup>2</sup>K))</b>	Außenwand: 0.13; Kellerdecke: 0.12; Dach: 0.09; Verglasung: 0.70; Fensterrahmen: 0.75; Fenster gesamt: 0.84		
<b>Haustechnik</b>			
<b>Heizung</b>	Gastherme und Solarkollektor (5.4 m <sup>2</sup> ) speisen einen 390 l Pufferspeicher, der ein Zuluftnachheizregister versorgt		
<b>Lüftung</b>	Kontrollierte Be- und Entlüftung mit Wärmerückgewinnung aus der Abluft und Vorwärmung durch Erdreichwärmetauscher		
<b>Warmwasser</b>	Versorgung durch den 390 l Pufferspeicher		
<b>Elektrogeräte</b>	Energiespargeräte vorgesehen		
<b>Energetische Kenngrößen</b>			
<b>Energiebezugsfläche (TFA)</b>	3 Wohneinheiten mit insgesamt 467 m <sup>2</sup>		
<b>Jahresheizwärmeverbrauch</b>	20.0 kWh/(m <sup>2</sup> a), (Im ersten Jahr, bei 21.5°C Innentemperatur)	<b>Maximale Heizlast (gemessen, erstes Jahr, bei 22°C Innent.)</b>	14.3 W/m <sup>2</sup>
<b>Heizwärmebedarf (berechnet nach PHPP, gemäß Baudaten, bei 21.5 °C Innentemperatur)</b>	21.4 kWh/(m <sup>2</sup> a)	<b>Maximale Heizlast nach PHPP; bei 21.5 °C Innentemperatur</b>	13.8 W/m <sup>2</sup>

Tabelle 26: Heizlastberechnung nach PHPP für das Projekt "Steyr - Dietach" (Drucktestergebnis bzgl. Bezugsvolumen korrigiert).

### Passivhaus-Projektierung

### HEIZWÄRMELAST

Objekt:	Passivhaus Heuberg - Gesamtgebäude					Gebäudetyp/Nutzung:	Reihenhaus																									
Standort:	Steyr / Dietach					Energiebezugsfläche AEB:	467 m <sup>2</sup>																									
Wetterregion (01 - 12):	8 Donaubecken und Alpenvorland bis ca. 600 m Höhe, z.B. Augsburg																															
Auslegungstemperatur Strahlung: Ost Süd West Nord Horizontal																																
Wetter 1:	-9.0 °C	15	60	15	5	5	W/m <sup>2</sup>																									
Wetter 2:	-3.0 °C	5	5	5	5	5	W/m <sup>2</sup>																									
Innentemp. °C	21.50	Fläche m <sup>2</sup>		U-Wert W/(m <sup>2</sup> K)		Faktor immer 1.0		TempDiff 1 K		TempDiff 2 K		P <sub>T</sub> 1 Watt		P <sub>T</sub> 2 Watt																		
Bauteile																																
1. AW		397.5	*	0.127	*	1.0	*	30.5	bzw.	30.5	=	1540	bzw.	1540																		
2. Dach		237.6	*	0.093	*	1.0	*	30.5	bzw.	30.5	=	674	bzw.	674																		
3. Kellerdecke		198.3	*	0.122	*	1.0	*	11.5	bzw.	11.5	=	278	bzw.	278																		
4.			*		*	1.0	*	30.5	bzw.	30.5	=		bzw.																			
5.			*		*	1.0	*	30.5	bzw.	30.5	=		bzw.																			
6. Wbrücken außen (Länge/m)		255.5	*	-0.02	*	1.0	*	30.5	bzw.	30.5	=	-134	bzw.	-134																		
7. Wbrücken Boden (Länge/m)		27.3	*	0.22	*	1.0	*	30.5	bzw.	30.5	=	183	bzw.	183																		
8. Fenster		85.9	*	0.838	*	1.0	*	30.5	bzw.	30.5	=	2197	bzw.	2197																		
<b>Transmissionswärmelast P<sub>T</sub></b>												Summe =		4738	bzw.	4738																
<b>Lüftungsanlage:</b>												wirksames Luftvolumen V <sub>L</sub>		466.8	*	2.50	=	1167														
Wärmebereitstellungsgrad des Plattenwärmetauschers												η <sub>WRG</sub>		75%																		
Wärmebereitstellungsgrad des Erdreichwärmetauschers												η <sub>EWT</sub>		22%																		
energetisch wirksamer Luftwechsel n <sub>L</sub>												0.463		*	(1 - 0.81)	+	0.174	=	0.264													
<b>Lüftungswärmelast P<sub>L</sub></b>												V <sub>L</sub> m <sup>3</sup>		1167.1	*	n <sub>L</sub> 1/h	0.264	*	c <sub>Luft</sub> Wh/(m <sup>3</sup> K)	0.33	*	TempDiff 1 K	30.5	bzw.	TempDiff 2 K	30.5	=	P <sub>L</sub> 1 W	3104	bzw.	P <sub>L</sub> 2 W	3104
<b>Summe Wärmelast P<sub>V</sub></b>												P <sub>T</sub> + P <sub>L</sub>		=	P <sub>V</sub> 1 W	7842	bzw.	P <sub>V</sub> 2 W	7842													
<b>Wärmeangebot Solarlast P<sub>S</sub></b>												Ausrichtung der Fläche		Fläche m <sup>2</sup>	g-Wert (senkr. Einstrahlung)gl. Blatt Fenster	Reduktionsfaktor	Strahlung 1 W/m <sup>2</sup>	Strahlung 2 W/m <sup>2</sup>	P <sub>S</sub> 1 W	P <sub>S</sub> 2 W												
1.	Ost	0.00	*	0.53	*	0.45	*	15	bzw.	5	=	0	bzw.	0																		
2.	Süd	67.54	*	0.53	*	0.52	*	60	bzw.	5	=	1122	bzw.	94																		
3.	West	1.32	*	0.53	*	0.41	*	15	bzw.	5	=	4	bzw.	1																		
4.	Nord	16.96	*	0.53	*	0.42	*	5	bzw.	5	=	19	bzw.	19																		
5.	Horizontal	0.00	*	0.53	*	0.45	*	5	bzw.	5	=	0	bzw.	0																		
6.			*		*		*		bzw.		=	0	bzw.	0																		
<b>Wärmeangebot Solarlast P<sub>S</sub></b>												Summe =		1146	bzw.	114																
<b>Interne Wärmelast P<sub>I</sub></b>												spez. Leistung W/m <sup>2</sup>		1.6	*	A <sub>EB</sub> m <sup>2</sup>	467	=	P <sub>I</sub> 1 W	747	bzw.	P <sub>I</sub> 2 W	747									
<b>Wärmegewinne P<sub>G</sub></b>												P <sub>S</sub> + P <sub>I</sub>		=	P <sub>G</sub> 1 W	1893	bzw.	P <sub>G</sub> 2 W	861													
												P <sub>V</sub> - P <sub>G</sub>		=	5949	bzw.	6981															
<b>Heizwärmelast P<sub>H</sub></b>														=	6981	W																
														=	15.0	W/m <sup>2</sup>																
Zulufttemperatur ohne Nachheizung ϑ <sub>zu,Min</sub> 14 °C												Zulufttemperatur Max. ϑ <sub>zu,Max</sub> 52 °C		Watt																		
<b>Wärmelast, von Zuluft transportiert P<sub>Zuluft:Max</sub></b>														=	6710	14.4	W/m <sup>2</sup>															

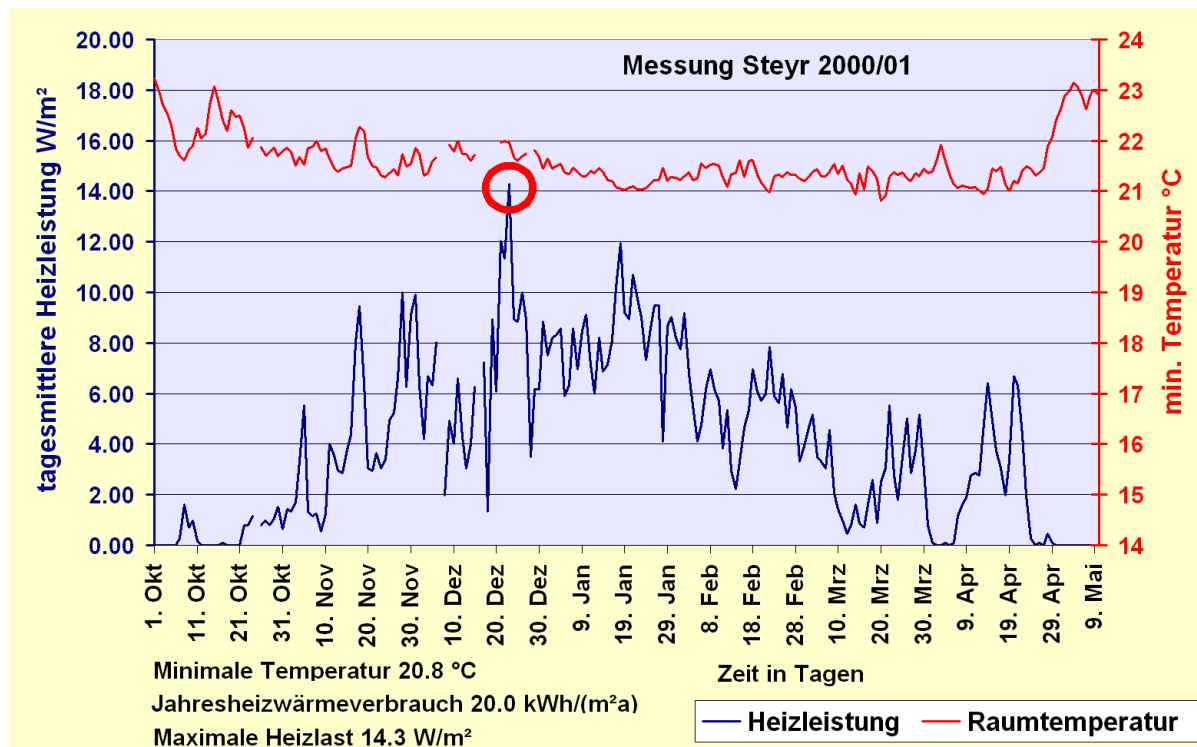


Abbildung 103: Zeitlicher Verlauf von mittlerer Raumtemperatur und flächenspezifischer Heizleistung beim Projekt Steyr-Dietach im ersten Betriebsjahr 2000/01.

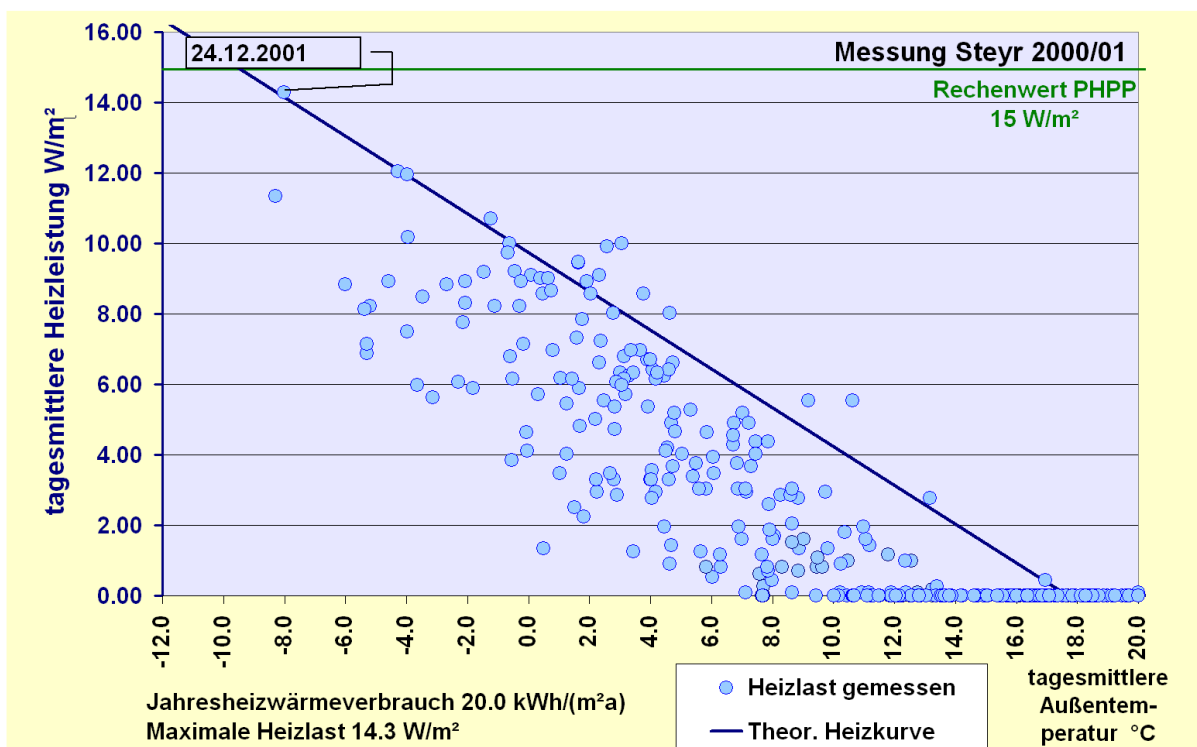


Abbildung 104: Heizkurve beim Projekt Steyr-Dietach mit der zur  $21.5^{\circ}C$  Raumtemperatur gehörenden theoretischen Heizgeraden und dem nach PHPP-Heizlastblatt (aktualisiert) ermittelten Rechenwert der maximalen Heizlast.

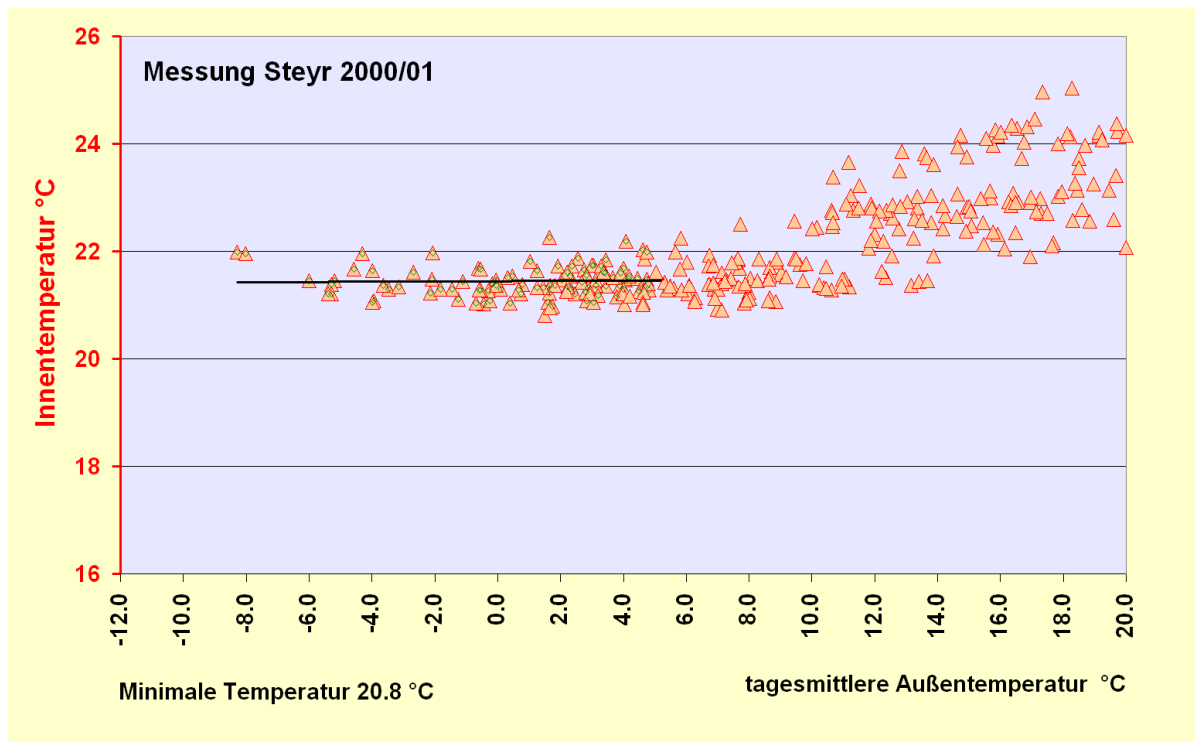


Abbildung 105: Korrelation zwischen Raum- und Außentemperatur im ersten Betriebswinter für das CEPHEUS-Projekt Steyr-Dietach (2000/01). Die Steigung der Ausgleichsgerade ist verschwindend gering ( $0.0028 \text{ °C/°C}$ ), der Zusammenhang nicht signifikant.

Wie Abbildung 105 zeigt, besteht keine signifikante Korrelation zwischen Raum- und Außentemperaturen. Die begrenzte verfügbare Heizleistung war somit unter allen Umständen ausreichend, um ein behagliches Temperaturniveau (hier im Mittel bei  $21.5 \text{ °C}$ ) aufrecht zu halten.

Das Projekt Steyr-Dietach zeigt, dass die Passivhaus-Zuluftnachheizung trotz der Leistungsbegrenzung in der Lage ist, auch im ersten Betriebsjahr eines Massivbaus mit Trocknungswärmebedarf garantiert behagliche Bedingungen zu erreichen. Dabei war in diesem Projekt ursprünglich von einer erheblich besseren Luftdichtheit ausgegangen worden. Die Kalkulationswerte wären mit einem konsequenten Konzept und einer stringenten Prüfung während des Bauprozesses erreichbar gewesen, wenn im CEPHEUS-Rahmenprogramm die baubegleitende Arbeitsgruppe nicht gestrichen worden wäre. Aber auch das durchgeführte Projekt mit den etwas ungünstigeren Werten liegt offensichtlich im Gültigkeitsrahmen des PHPP-Algorithmus und das Passivhaus-Konzept erweist sich als fehlertolerant genug, auch unter den gegebenen Umständen noch einwandfrei zu funktionieren. Größere als die hier vorhandenen Abweichungen müssen allerdings vermieden werden.

## 4.11 Nordorientiertes Passivhaus bei St. Jakob, Frankfurt (8 WE)

Das nordorientierte Passivhaus bei St. Jakob mit acht Wohneinheiten ist der östliche Teil eines Geschosswohnungsbauprojektes, das weitere elf weitgehend baugleiche Wohnungen, jedoch mit südorientierter Hauptfassade aufweist. Die Hauptfassade ist mit  $36^\circ$  Westabweichung Richtung Norden orientiert; an diesem Projekt wurde der Praxistest der Anwendbarkeit der Passivhaus-Prinzipien auf ungünstig orientierte und verschattete innerstädtische Gebäude durchgeführt.

Die opake Gebäudehülle ist an den Giebelseiten in Beton mit Wärmedämmverbundsystem ( $U=0.086 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ ), auf den Fassadenseiten mit vorgefertigten Holzelementen ( $U=0.12 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ ) ausgeführt. Das schwach geneigte Pultdach besteht aus Fertigbauelementen mit Doppel-T-Trägern ( $U=0.1 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ ). Das Gebäude ist nicht unterkellert, die Dämmung unter Bodenplatte aus Hartschaum führt auf einen U-Wert von  $0.11 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ . Die Streifenfundamente sitzen auf Betonhöckern auf. Eine Übersicht zu den Baukonstruktionen gibt Tabelle 25.

Das PHPP-Heizlastblatt (Tabelle 26) ergibt eine maximale Heizlast von  $9.0 \text{ W}/\text{m}^2$ .

Die Raumwärmeversorgung des Passivhauses bei St. Jakob erfolgt überwiegend über Zuluftnachheizregister in den Wohnungslüftungsanlagen. Diese können bis  $11.6 \text{ W}/\text{m}^2$  Wärmeleistung einringen; zusätzlich sind in allen Bädern Badheizkörper vorhanden, die weitere  $6.9 \text{ W}/\text{m}^2$  beitragen können. Der Wärmeerzeuger ist ein zentrales Gasbrennwertgerät für beide Gebäudeteile. In der hohen Volumenströmung erlaubt das Register einen Betrieb bis zu  $22 \text{ W}/\text{m}^2$  (inkl. Badheizkörper).

Der in Abbildung 103 dokumentierte Zeitverlauf der gemessenen tagesmittleren Heizleistung im Jahr 2003/04 zeigt, dass die gemessenen Leistungen mit maximal  $6.0 \text{ W}/\text{m}^2$  (inkl. der Wärmeabgabe der Rohrleitungen) deutlich unter dem Rechenwert nach PHPP liegen; dies ist z.T. auf die relativ milde Witterung im Messjahr zurückzuführen, allerdings zeigt die Heizkurvendarstellung, dass auch in einem strengen Winter mehr als  $9 \text{ W}/\text{m}^2$  nicht zu erwarten sein werden. Die Ursache für die Begrenzung der gemessenen Heizleistungen liegt nicht in einer Beschränkung der verfügbaren Leistung. Vielmehr stehen, wie die PHPP-Dokumentation zeigt, schon im Normalbetrieb der Lüftungsanlagen  $18.5 \text{ W}/\text{m}^2$  zur Verfügung, in der höchsten Lüftungsstufe sogar  $22 \text{ W}/\text{m}^2$ . Die tatsächlich abgenommenen Leistungen lagen dauerhaft sehr viel niedriger.

Die Heizkurvendarstellung findet sich in Abbildung 107. Der temperaturspezifische Wärmeverlust beträgt bei diesem Gebäudeteil  $0.402 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ , die Steigung der theoretischen Heizgeraden liegt passend tangential an den Messpaaren aus Außentemperatur und gemessener mittlerer Heizleistung (zu den Ausreißern vgl. weiter unten). Die Einzelwerte fallen bei diesem Projekt nicht extrem weit von der Geraden herunter und es ergibt sich auch keine auffällige Aufweitung der Streuung zu niedrigeren Außentemperaturen hin. Die Ursache liegt in den nur geringen passiv solaren Beiträgen, die aus der Nordorientierung resultieren. Die Messergebnisse lassen erwarten, dass die Werte auch für noch niedrigere Außentemperaturen den theoretischen Berechnungswert des PHPP von  $9 \text{ W}/\text{m}^2$  nicht überschreiten werden.



Tabelle 27: Wohnen bei St. Jakob, nach [Peper 2004].



Ansicht von Südost (rechts der nordorientierte Gebäudeteil "B")

Nordansicht des Teils "B" (Fotos: Feist)

<b>Projektbeschreibung</b>			
<b>Adresse</b>	D Frankfurt		
<b>Bauträger/Bauherr</b>	FAAG Frankfurter Aufbau AG		
<b>Architekt</b>	faktor 10, Darmstadt; Petra Grenz und Folkmer Rasch		
<b>Fachingenieure</b>	Haustechnik: Ingenieurbüro Baumgärtner (IBB) Mörlenbach		
<b>Bauzeit</b>	Fertigstellung: Dezember 2002		
<b>Gebäudetyp</b>	Mehrfamilienhaus		
<b>Nutzung</b>	Eigentumswohnungen		
<b>Zahl der Wohneinheiten</b>	8 (Hausteil B, hier behandelt) + 11 (Hausteil A)		
<b>Wohnnutzfläche</b>	758.91 m <sup>2</sup> (Hausteil B, hier behandelt) + 1083.05 m <sup>2</sup> (Hausteil A)		
<b>Konstruktion</b>			
<b>Konstruktionsart</b>	Mischbau (Betontragkonstruktion plus Holzleichtbauelemente)		
<b>Fenster u. Verglasung</b>	3-Scheiben-Wärmeschutzverglasung, g-Wert: 51 %, mit PU ausgeschäumter PVC-Fensterrahmen		
<b>U-Werte (W/(m<sup>2</sup>K))</b>	Außenwand: 0.086 und 0.12; Kellerdecke: 0.11; Dach: 0.1; Verglasung: 0.70; Fensterrahmen: 0.75; Fenster gesamt: 0.89		
<b>Haustechnik</b>			
<b>Heizung</b>	Gasbrennwertgerät auf Pufferspeicher, zentraler Heizwasserkreis, je Wohnung ein Zuluftnachheizregister und ein Badheizkörper		
<b>Lüftung</b>	Je Wohnung eine kontrollierte Be- und Entlüftung mit Wärmerückgewinnung aus der Abluft, Wärmebereitstellungsgrad 81%		
<b>Warmwasser</b>	Themische Durchlauferhitzer in jeder Wohnung		
<b>Elektrogeräte</b>	Energiespargeräte empfohlen, unbeheizte Trockenschränke in der Abluft		
<b>Energetische Kenngrößen</b>			
<b>Energiebezugsfläche (TFA)</b>	8 Wohneinheiten mit insgesamt 758.91 m <sup>2</sup>		
<b>Jahresheizwärmeverbrauch</b>	14.5 kWh/(m <sup>2</sup> a) Teil B 10.5 kWh/(m <sup>2</sup> a) Teil A (Im ersten Jahr, bei 21.6°C Innentemperatur)	<b>Maximale Heizlast (gemessen, erstes Jahr, bei 21.6°C Innentemp.)</b>	6.0 W/m <sup>2</sup>
<b>Heizwärmebedarf (berechnet nach PHPP, gemäß Baudaten, bei 21.5 °C Innentemperatur)</b>	14.8 kWh/(m <sup>2</sup> a) Teil B 10.4 kWh/(m <sup>2</sup> a) Teil A	<b>Maximale Heizlast nach PHPP; bei 20 °C Innentemperatur</b>	9.0 W/m <sup>2</sup>



Tabelle 28: Heizlastberechnung nach PHPP für das Projekt Hausteil "B" des Passivhauses bei St. Jakob, Frankfurt a.M.

Passivhaus-Projektierung  
HEIZWÄRMELAST

Objekt: **Frankfurt St. Jakob; Block B** Gebäudetyp/Nutzung: **Mehrfamilienhaus/Wohnung** Innentemperatur: **20** °C  
 Standort: **Frankfurt St. Jakob** Energiebezugsfläche A<sub>EB</sub>: **759** m²  
 Kenn-Nr. Heizlast-Region: **6** keine Auswahl Heizlastdaten zugeordnet Klima (Heizlast): **Nördlicher Oberrheingraben, z.B. Frankfurt am Main**

Bauteile	Temperaturzone	m²	U-Wert	Fläche	W/(m²K)	Faktor immer 1 (außer "X")	TempDiff 1	TempDiff 2	P <sub>T</sub>		
									Watt	Watt	
1. Außenwand Außenluft	A	747.1	0.103	1.00	26.0	bzw.	21.0	=	1998	bzw.	1614
2. Außenwand Erdreich	B		1.00	1.00	10.4	bzw.	10.4	=		bzw.	
3. Dach/Decken Außenluft	D	249.3	0.105	1.00	26.0	bzw.	21.0	=	683	bzw.	552
4. Bodenplatte	B	204.8	0.111	1.00	10.4	bzw.	10.4	=	236	bzw.	236
5.	A		1.00	1.00	26.0	bzw.	21.0	=		bzw.	
6.	A		1.00	1.00	26.0	bzw.	21.0	=		bzw.	
7.	X		0.75	1.00	26.0	bzw.	21.0	=		bzw.	
8. Fenster	A	135.9	0.885	1.00	26.0	bzw.	21.0	=	3127	bzw.	2526
9. Außentür	A		1.00	1.00	26.0	bzw.	21.0	=		bzw.	
10. Wbrücken außen (Länge/m)	A	227.2	0.029	1.00	26.0	bzw.	21.0	=	169	bzw.	137
11. Wbrücken Perimeter (Länge/m)	P		1.00	1.00	10.4	bzw.	10.4	=		bzw.	
12. Wbrücken Boden (Länge/m)	B	46.0	0.096	1.00	10.4	bzw.	10.4	=	46	bzw.	46
13. Haus/Wohnungstrennwand	I	0.0	1.00	1.00	3	bzw.	3	=		bzw.	

Transmissionswärmelast P<sub>T</sub> Summe = **6260** bzw. **5110**

Lüftungsanlage: A<sub>EB</sub> m²: **758.9** lichte Raumhöhe m: **2.50** m³: **1897**  
 wirksames Luftvolumen V<sub>L</sub> = **758.9** \* **2.50** = **1897**  
 Wärmebereitstellungsgrad des Wärmeübertragers η<sub>WRO</sub>: **81%**  
 Wärmebereitstellungsgrad des Erdreichwärmetauschers η<sub>EVW</sub>: **0%**  
 energetisch wirksamer Luftwechsel n<sub>L</sub>: **0.381** \* (1 - **0.81**) + **0.058** = **0.130**

Lüftungswärmelast P<sub>L</sub> V<sub>L</sub> m³: **1897.3** n<sub>L</sub> 1/h: **0.130** c<sub>Luft</sub> Wh/(m³K): **0.33** TempDiff 1 K: **26.0** bzw. TempDiff 2 K: **21.0**  
 P<sub>L</sub> 1 W: **2124** bzw. P<sub>L</sub> 2 W: **1715**

Summe Wärmelast P<sub>V</sub> P<sub>V</sub> 1 W: **8383** bzw. P<sub>V</sub> 2 W: **6826**

Ausrichtung der Fläche	Fläche m²	g-Wert (senkr. Einstrahlung)	Reduktionsfaktor (vgl. Blatt Fenster)	Strahlung 1 W/m²	Strahlung 2 W/m²	P <sub>S</sub> 1 W	P <sub>S</sub> 2 W
1. Ost	0.0	0.0	0.4	15.0	5	0	0
2. Süd	48.8	0.5	0.3	41.4	5	281	34
3. West	0.0	0.0	0.4	15.0	5	0	0
4. Nord	87.1	0.5	0.4	5.0	5	83	83
5. Horizontal	0.0	0.0	0.4	5.0	5	0	0

Wärmeangebot Solarlast P<sub>S</sub> Summe = **364** bzw. **117**

Interne Wärmelast P<sub>I</sub> spez. Leistung W/m²: **1.6** A<sub>EB</sub> m²: **759**  
 P<sub>I</sub> 1 W: **1214** bzw. P<sub>I</sub> 2 W: **1214**

Wärmegewinne P<sub>G</sub> P<sub>S</sub> + P<sub>I</sub> = **1578** bzw. **1331**

Heizwärmelast P<sub>H</sub> P<sub>V</sub> - P<sub>G</sub> = **6805** bzw. **5494**

wohnlächenspezifische Heizwärmelast P<sub>H</sub> / A<sub>EB</sub> = **9.0** W/m²

Zulufttemperatur ohne Nachheizung: **52** °C  
 zum Vergleich: Wärmelast, die von der Zuluft transportierbar ist P<sub>Zu,Max</sub> ϑ<sub>Zu,Min</sub> 15 °C Zulufttemperatur Max. ϑ<sub>Zu,Max</sub> 52 °C  
 = **8809** W spezi.: **11.6** W/m²  
 = **5200** W spezi.: **6.9** W/m²  
 Zusätzliche, über die Badheizkörper verfügbare Heizleistung = **14009** W spezi.: **18.5** W/m²  
 Gesamte verfügbare Heizleistung = **14009** W spezi.: **18.5** W/m²

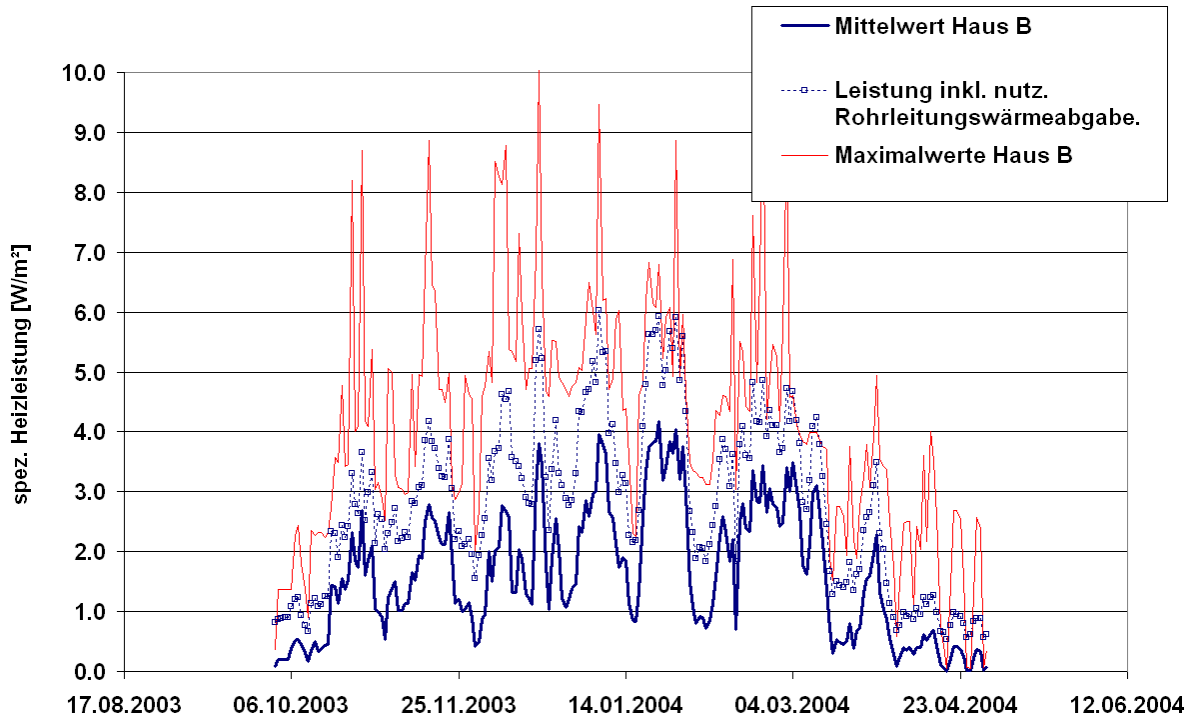


Abbildung 106: Zeitlicher Verlauf der flächenspezifischen Heizleistung beim Projekt Passivhaus bei St. Jakob, nordorientierter Hausteil "B" im Winter 2003/04 (oberste Kurve: Maximalwerte aus allen acht Einzelwohnungen).

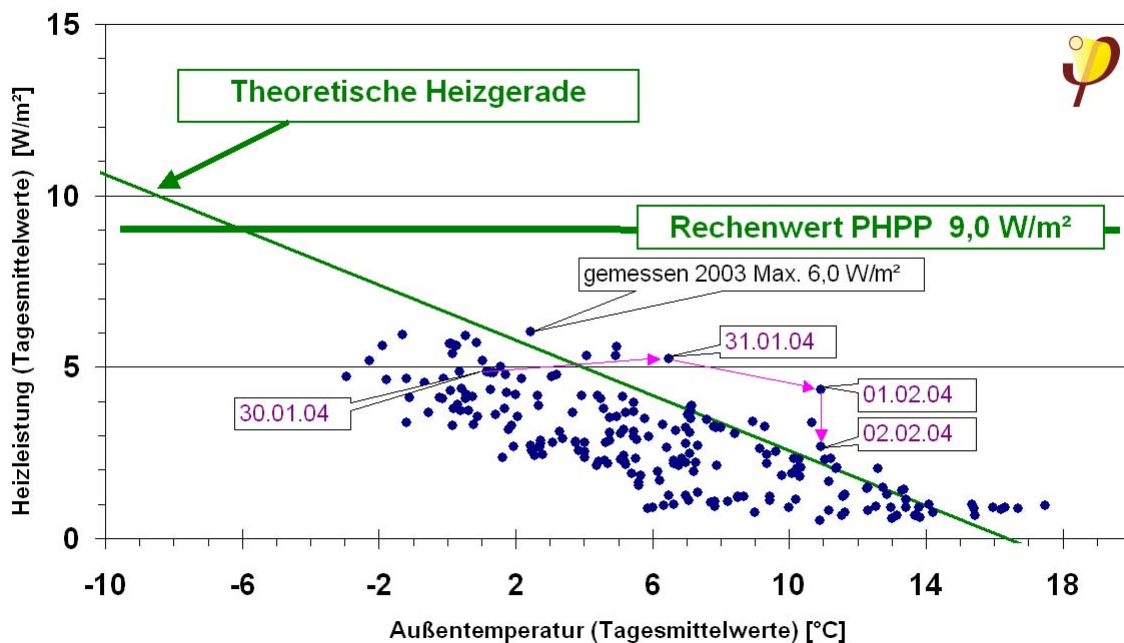


Abbildung 107: Heizkurve beim Projekt Passivhaus bei St. Jakob mit der zu  $21,6^{\circ}\text{C}$  Raumtemperatur gehörenden theoretischen Heizgeraden und dem nach PHPP-Heizlastblatt ermittelten Rechenwert der maximalen Heizlast. Gekennzeichnet ist eine Zeitfolge von auffälligen Messwerten, vgl. Text.

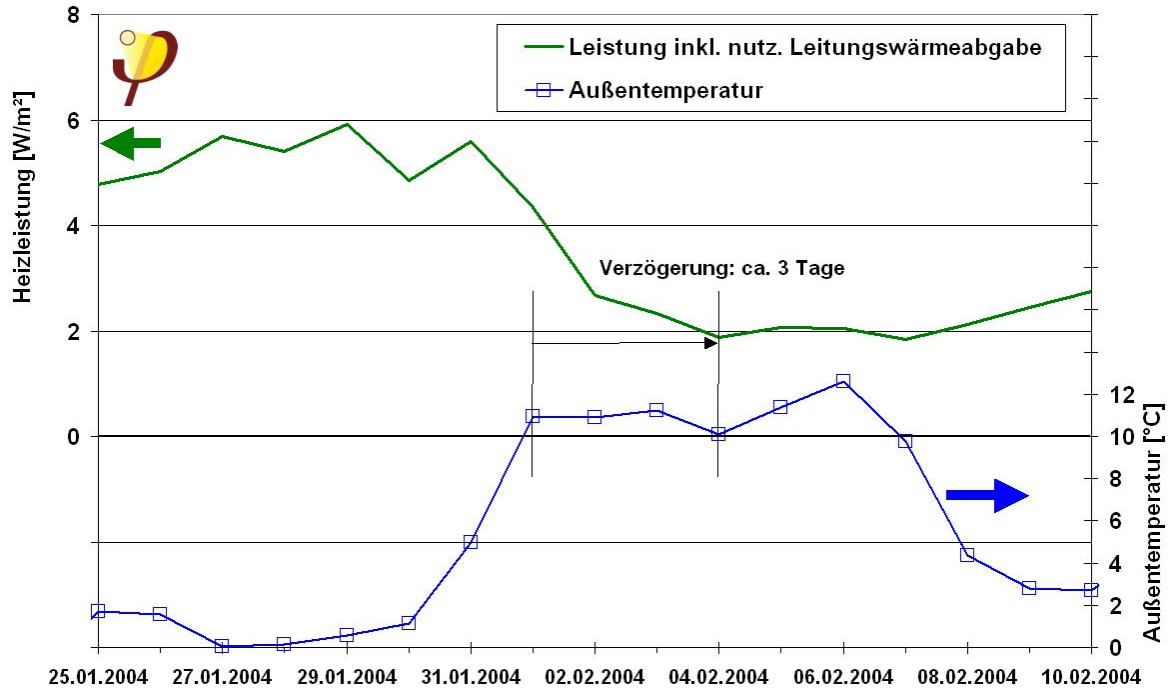


Abbildung 108: Zeitverlauf der Außentemperatur (unten, Quadrat-Symbol) und der spezifischen Heizleistung zwischen 25.01.2004 und 10. Februar. Dieser Zeitraum enthält einen abrupten Temperaturanstieg, welcher erst zeitverzögert in den Leistungsdaten erkennbar wird. Das erklärt unerwartet "hohe" Heizleistungen an einigen milden Tagen (z.B. 01. Februar 2004).

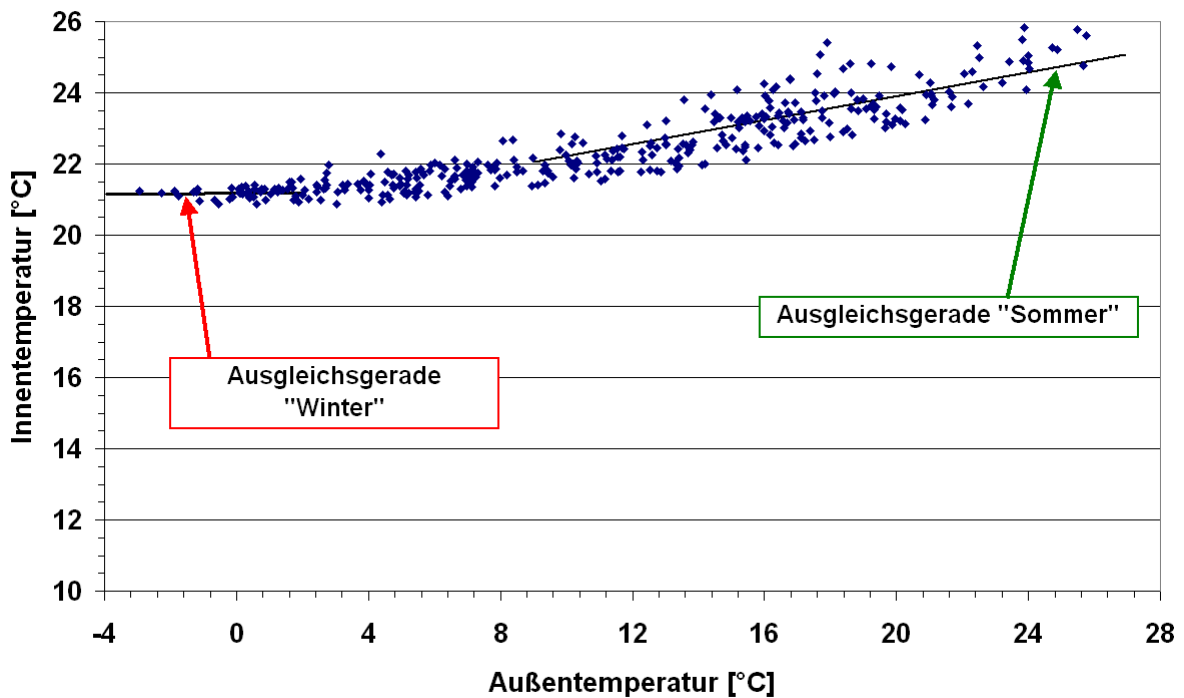


Abbildung 109: Korrelation zwischen Raum- und Außentemperatur für das Projekt Passivhäuser bei St. Jakob, nordorientierter Hausteil B (2003/2004). Die Steigung der Ausgleichsgeraden ist gering ( $0.0024 \text{ } ^\circ\text{C}/^\circ\text{C}$ ),

Bei diesem Projekt lassen sich die Ursachen für einzelne Ausreißermesspunkte, die oberhalb der Heizgeraden liegen, aufklären. In der Heizkurvendarstellung (Abbildung 107) sind die Messpunkte von vier aufeinander folgenden Tagen durch eine Pfeilkette gekennzeichnet. Für den Zeitraum um diese vier Tage findet sich in Abbildung 108 der Verlauf von Außentemperatur und spezifischer Heizleistung. Danach waren der 25 bis 30. Januar kalte Wintertage mit Außentemperaturen um 0 °C. Am 31.01. wechselte die Wetterlage - milde Meeresluft strömte ein, die Temperaturen stiegen abrupt auf Werte um 11 °C an. Wegen der thermischen Trägheit des Passivhauses dauert es allerdings etwa drei Tage, bis dieser abrupte Anstieg vollständig auf die Heizleistung durchschlägt. Am 1. Februar, ein Tag mit bereits 11 °C mittlerer Außentemperatur, verweilt die mittlere Heizleistung noch auf durchschnittlich 4.3 W/m<sup>2</sup>. Dies erklärt die beiden höchsten Ausreißer in Abbildung 107. Da die Wärmeleitungsgleichung parabolisch ist, können solche Effekte grundsätzlich nicht zu höheren Heizleistungen als der an Tagen mit der niedrigsten Temperatur führen. Die Heizkurve kann daher durch solche Effekte immer nur bei vergleichsweise milden Temperaturen überschritten werden: Durch den reziproken Effekt wird im Gegenteil die maximale Last etwas gedämpft.

Wie Abbildung 105 zeigt, besteht in der Heizperiode keine signifikante Korrelation zwischen Raum- und Außentemperaturen. Die verfügbare Heizleistung war somit unter allen Umständen ausreichend, um ein behagliches Temperaturniveau (hier im Mittel bei 21.6 °C) aufrecht zu halten.

Im Verlauf der Messphase im Passivhausprojekt St. Jakob ergab sich die Möglichkeit zur Auswertung eines nicht geplanten Experimentes: Wie Abbildung 110 zeigt, nahmen in einer der Wohnungen die Temperaturen "außer der Reihe" im Februar im

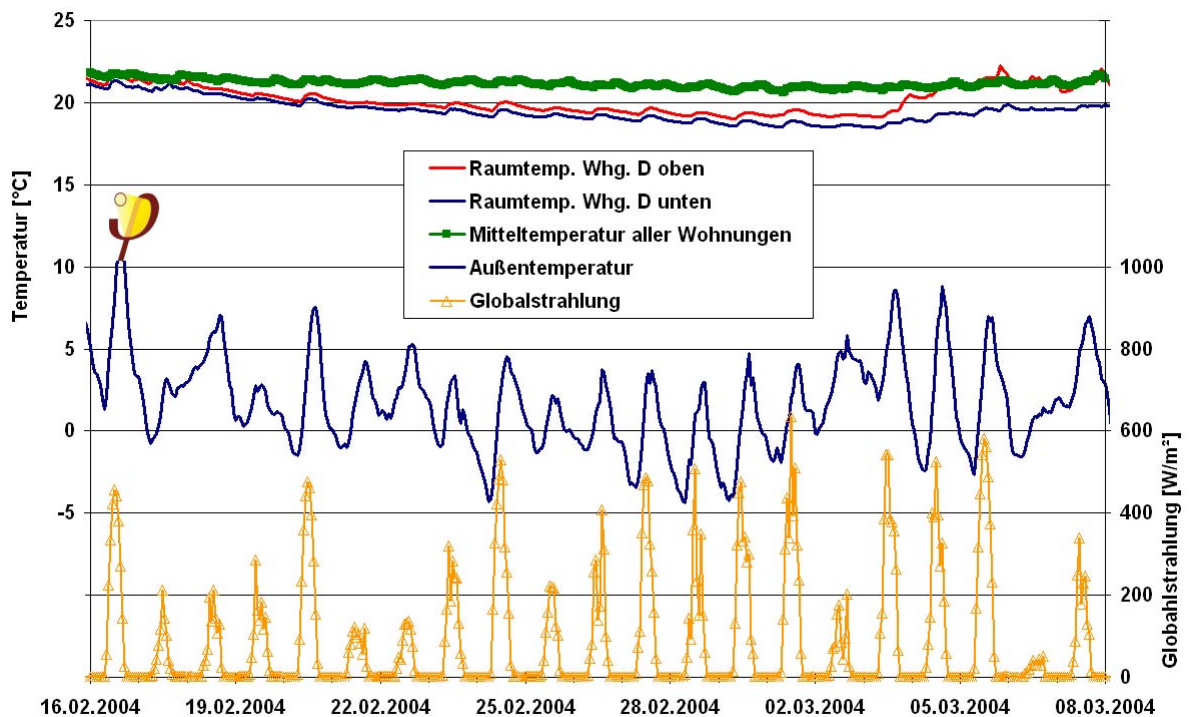


Abbildung 110 Verlauf der gemessenen Innentemperaturen Ende Februar 2004 sowie zugehörige Randbedingungen (Außenlufttemperatur und Solarstrahlung).

Laufe eines Zeitraums von drei Wochen um gut 2.5 K ab. Im Vergleich zum ungestörten Verlauf des Mittelwertes der Temperaturen (oberste Kurve) ist das Abklingen gut zu erkennen. Die Ursache liegt nicht in äußeren Randbedingungen, wie die (bis auf den Tagesgang) relativ stabilen Außentemperaturen und die Solarstrahlungsdaten zeigen. Die Erklärung liegt vielmehr darin, dass in der betreffenden Wohnung vom 16. Februar bis 3. März die Heizung abgestellt war (vgl. Abbildung 111, Heizleistungen auf der Basis der Wärmehälerauslesungen). Es handelt sich somit genau um den Fall, wie er in Abschnitt 3.7, dort allerdings für ein Reihenhaus, theoretisch untersucht worden war. Die Heizungsabschaltung erlaubt es, die Erkenntnisse der Simulation an Hand einer Felduntersuchung zu überprüfen.

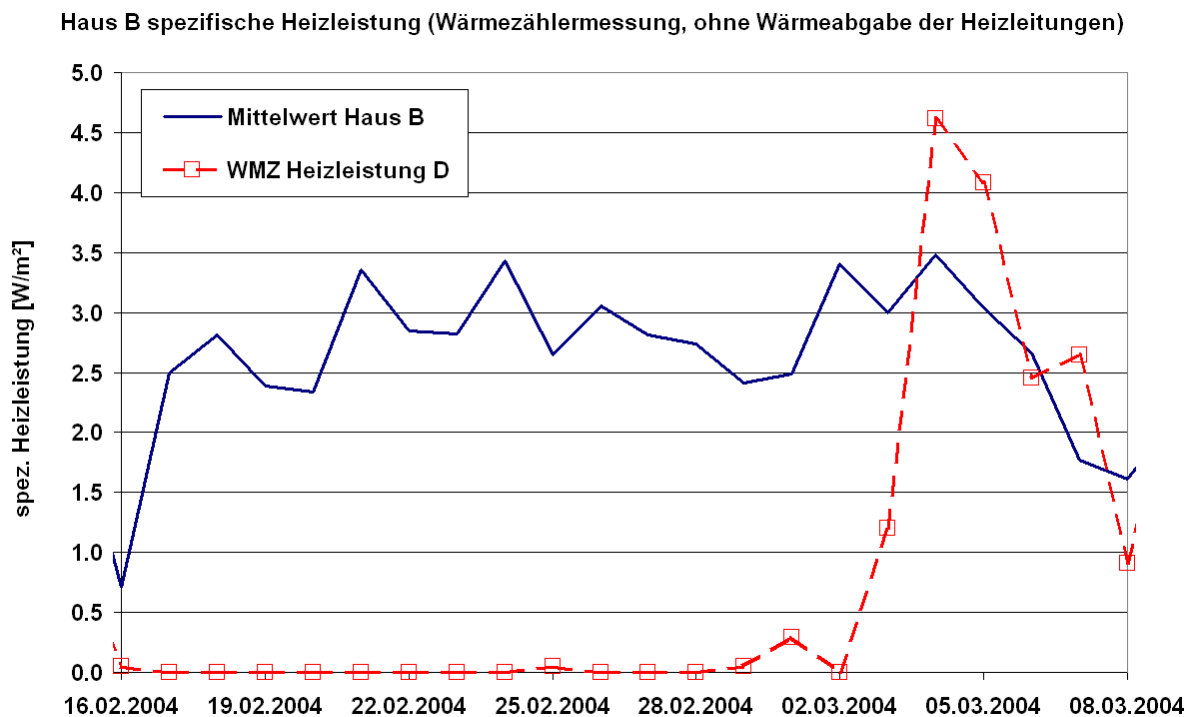
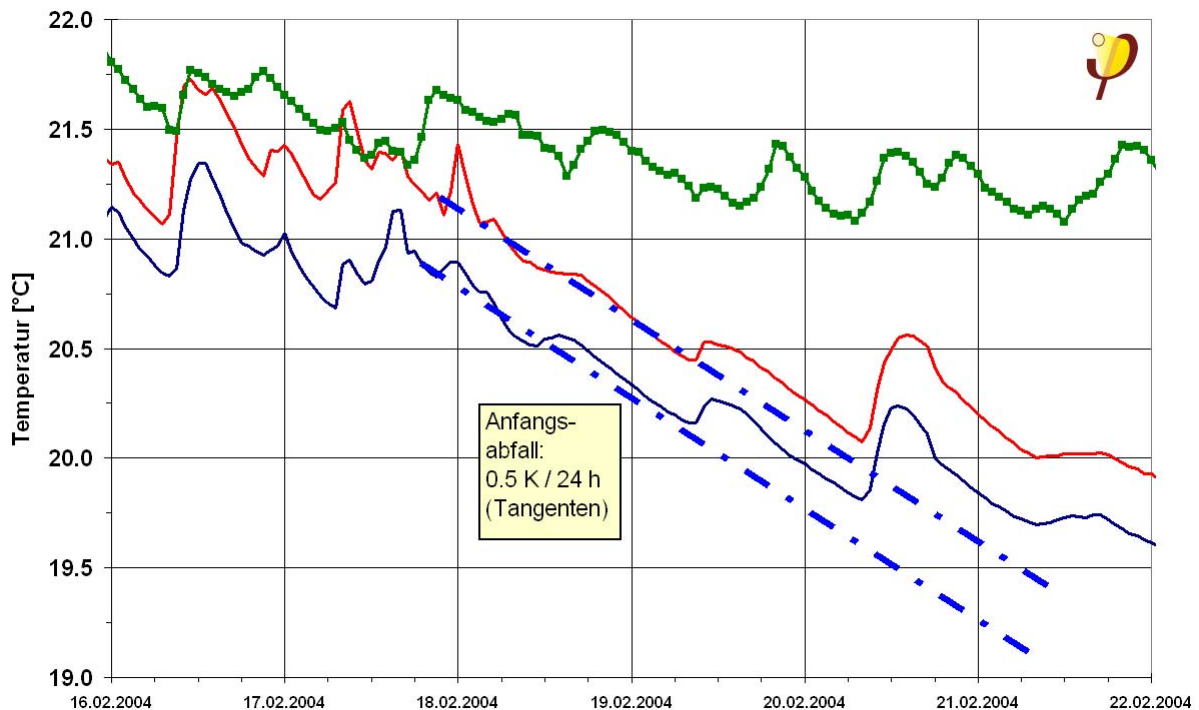


Abbildung 111: Verlauf der spezifischen geregelten Heizleistung - Wohnung "D" (mit Symbol) im Vergleich zum Mittelwert im ganzen Gebäudeteil: Die Heizung in Wohnung "D" ist ab 16. Februar komplett abgestellt.

Dazu zeigt Abbildung 112 den Anfangsverlauf des Temperaturabfalls nach der Abschaltung; es ergibt sich eine tägliche Abnahmerate von 0.5 K/d. Nach 2 Tagen ist die Temperatur um weniger als 1 K auf knapp über 20 °C gefallen und liegt immer noch innerhalb des Behaglichkeitsintervalls. Der Temperaturabfall erfolgt noch langsamer als in Abschnitt 3.7 simuliert (vgl. dort Abbildung 47). Die Ursachen dafür sind leicht zu verstehen:

- Für die Simulation wurde ein ungünstigerer Fall, nämlich ein Reihenendhaus mit ziemlich hohen Außenflächen angenommen. Bei der Felduntersuchung handelt es sich um eine Wohnung innerhalb eines Mehrgeschosswohnungsbaus.
- Für die Simulation wurde zu den Nachbarn eine adiabate Randbedingung angenommen – d.h. die Nachbarwohnung ist quasi eine Spiegelung der untersuchten Wohnung. Im vorliegenden Fall wurden die Nachbarwohnungen durchgeheizt.



**Abbildung 112: Anfangsverlauf der Raumtemperaturen nach der Abschaltung; die Temperatur im Raum fällt mit einer Rate von 0.5 K/d. Selbst die nach 2 Tagen erreichte Temperatur fällt noch nicht aus dem Behaglichkeitsintervall heraus.**

Die Messergebnisse bestätigen somit die Analyse, dass eine Heizungsunterbrechung auch von einigen Tagen in einem Passivhaus die dort herrschenden Temperaturen nicht wesentlich unter die Komfortgrenzen abfallen lässt. Wenn die Temperaturen jedoch gar nicht stark abfallen, wird auch keine hohe Anheizleistung gebraucht - im Gegensatz zu den Annahmen in DIN EN 12831, die in dieser Beziehung inkonsistent ist.

Selbst wenn die Nichtbeheizung einer Wohnung über Wochen anhält, fallen in diesem Gebäude die Temperaturen dieser unbeheizten Wohnung je nach Raum nicht unter 18.6 bzw. 19.2 °C. In der nicht belegten Wohnung sind außerdem die inneren Wärmequellen sehr gering; allerdings kommen etwa 1.3 W/m<sup>2</sup> nutzbare Wärmeabgabe aus den Heizungsverteilungen, die auch durch diese Wohnung geführt sind, hinzu.

Die Wiederanheizung (vgl. Abbildung 114) verläuft deshalb unproblematisch: Nach Rückkehr der Bewohner wurde die Heizung auch in dieser Wohnung wieder in Betrieb genommen; es wurde jedoch auch am Anfang nur eine Leistung von 4.6 W/m<sup>2</sup> für die gesamte Wohnung in Anspruch genommen, obwohl bis etwa 20 W/m<sup>2</sup> zur Verfügung stehen könnten.

Die Messergebnisse im Projekt Passivhäuser bei St. Jakob zeigt, dass die Passivhaus-Zuluftnachheizung selbst bei einem nordorientierten Gebäude in innerstädtischer Lage es ermöglicht, garantiert behagliche Bedingungen zu erreichen und auch unter ungünstigen Randbedingungen zu halten.



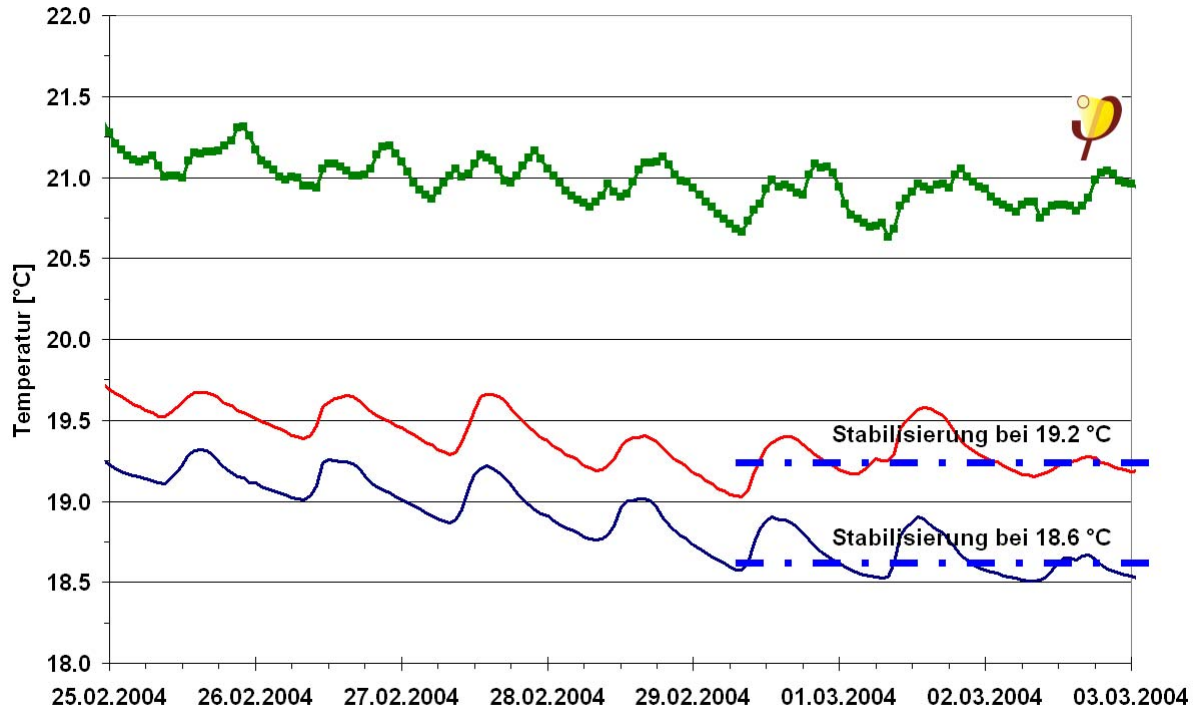


Abbildung 113: Stabilisierung der Temperaturen der unbeheizten Wohnung auf Temperaturen um 19 °C nach über zwei Wochen Abwesenheit.

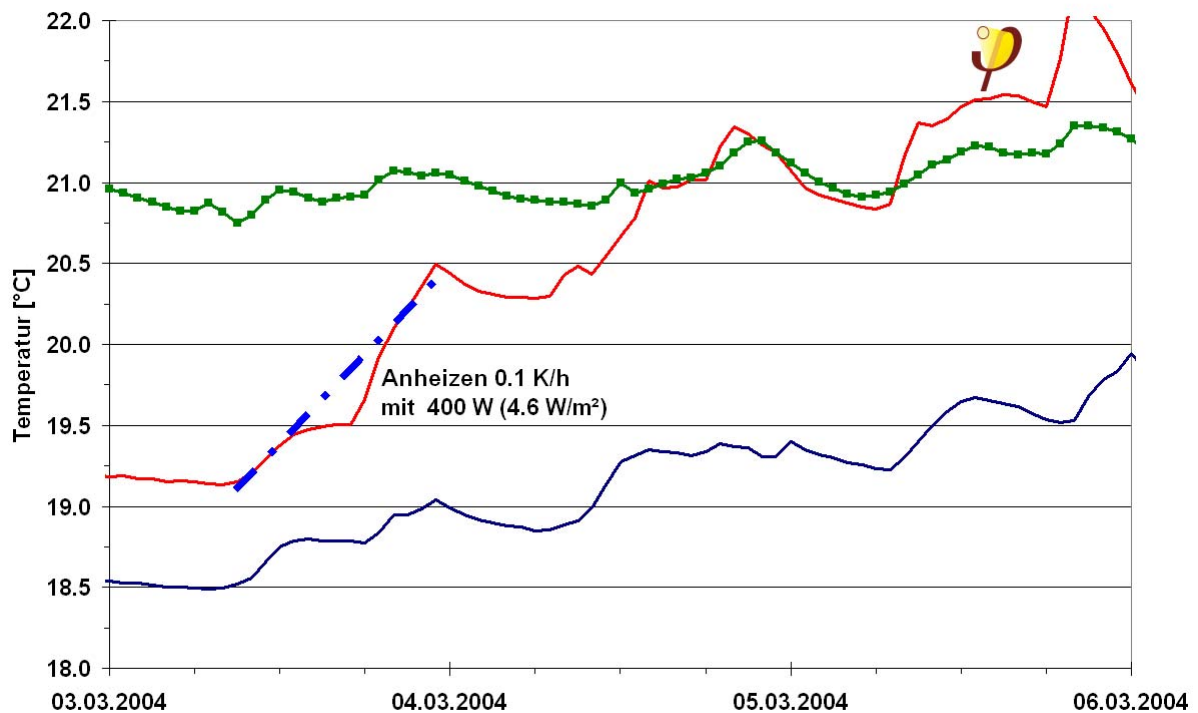


Abbildung 114: Wiederanheizphase nach Rückkehr der Bewohner. Es werden nur 4.6 W/m<sup>2</sup> der eigentlich verfügbaren ca. 20 W/m<sup>2</sup> in Anspruch genommen; die Temperaturen lagen schon vor dem Wiederaufheizen nur um  $\Delta PMV = -0.7$  unter dem optimalen Wert [DIN EN ISO 7730].

## 5 Zusammenfassung und Empfehlungen

### 5.1 Zusammenfassung: Messergebnisse Heizleistungen

Im hier vorliegenden Bericht wurden die Messergebnisse zur maximalen Heizlast aus insgesamt 153 Wohneinheiten in Passivhäusern (oder Fast-Passivhäusern) sowie in 8 Wohneinheiten einer Niedrigenergiesiedlung untersucht und zur Validierung von Heizlastberechnungsverfahren verwendet.

Abbildung 115 zeigt die Messwerte für die maximal aufgetretenen tagesmittleren Heizleistungen (ohne Ausreißer). Die Werte werden für jedes Projekt im zugehörigen Kapitel im Einzelnen diskutiert. Zusammengefasst kann hier festgestellt werden:

- In allen behandelten Projekten ist die verfügbare maximale Heizleistung deutlich größer als die gemessene tatsächlich aufgetretene Leistung. Die dargestellten Messwerte sind somit nicht Folge einer begrenzten verfügbaren Leistung, sondern allein darauf zurückzuführen, dass eine höher Leistung nicht abgefragt wurde.

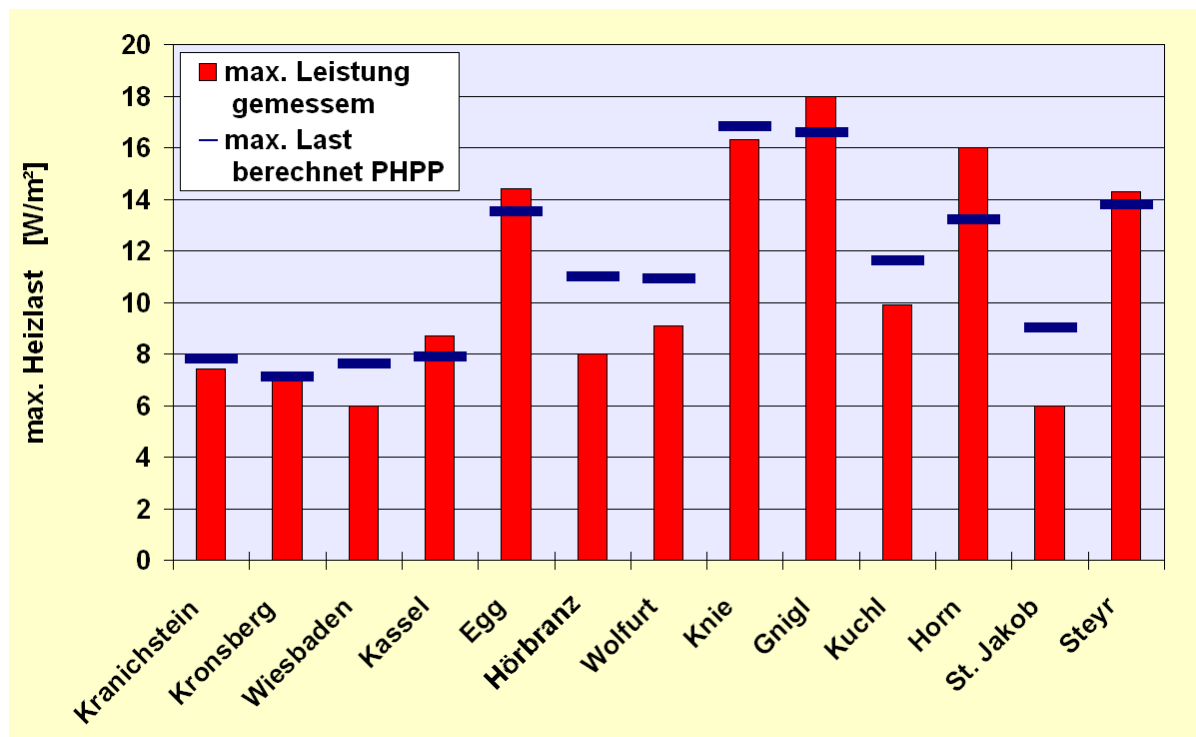


Abbildung 115: Vergleich der gemessenen maximalen Leistungen des Wärmeverteilsystems (inkl. evtl. Verteil- und Wärmeübergabeverluste) in 13 Messprojekten (Balken) mit den Rechenwerten der maximalen Heizlast (— - Symbol). Die gemessenen Leistungen sind in allen Projekten extrem gering.

- In den "strengen" Passivhausprojekten mit berechneten Heizlasten unter  $14 \text{ W/m}^2$  liegen die gemessenen maximalen Leistungen unter den Rechenwerten oder nur geringfügig darüber.

- Auch in den Objekten mit definitiv höherer Heizlast (16-18 W/m<sup>2</sup>) weichen die gemessenen Heizleistungen nicht bedeutend von den PHPP-Rechenwerten ab. Einzige Ausnahme ist das freistehende Einfamilienhaus in Horn, bei welchem allerdings nur Messungen für das erste Betriebsjahr vor Abschluss aller Baumaßnahmen herangezogen werden konnten. Sie dort auftretenden Werte wurden in Abschnitt 4.9 genauer diskutiert.

Die Messungen zeigen unter anderem, dass die projizierten extrem kleinen Heizleistungen unter 10 W/m<sup>2</sup> für die Siedlungsprojekte in Kranichstein, auf dem Kronsberg, Wiesbaden, Hörbranz und die Mehrfamilienhäuser in Kassel, Wolfurt, Kuchl und bei St. Jakob nicht überschritten werden. Da herkömmliche Berechnungsverfahren weitaus höhere Leistungen ermitteln, war die Frage der ausreichenden Beheizbarkeit von Passivhäusern aus theoretischer Sicht bezweifelt worden. Die hier vorgelegten Ergebnisse zeigen jedoch, dass die Bedenken unbegründet sind. Die aufgetretenen Heizleistungen sind im Feldversuch tatsächlich so klein wie projiziert.

## 5.2 Zusammenfassung: Messergebnisse Innen/Außentemperaturkorrelation

Aus Abbildung 116 geht hervor, dass in keinem der hier zur Validierung herangezogenen Projekte zu irgendeinem Zeitpunkt eine unzureichende Heizleistung zur Verfügung stand. Aufgetragen sind in diesem Diagramm die Korrelationsgeraden für die Kälteperioden aus der Korrelation zwischen Außen- und Raumtemperaturen, die in jedem Projekt aus den Einzelmessdaten der tagesmittleren Außen- und Raumtemperaturen gewonnen wurden – die Einzelmessdaten finden sich in den Projektdokumentationen. Die Steigungen aller Korrelationsgeraden für den Winterfall ist extrem gering und in der Regel nicht signifikant.

In einigen Fällen ist die Steigung der Innen/Außentemperaturkorrelation negativ (davon eine signifikant); dies ist auf Reglereinstellungen zurückzuführen.

Auch in den zwei verbliebenen Fällen mit positiver und signifikanter Steigung der Innen/Außen-Korrelation liegt immer eine ausreichende Heizleistung vor. In diesen Fällen ist die Korrelation auf eine zunehmende passive Erwärmung über den Sollwert hinaus im Winter zurückzuführen (Passivhäuser Hörbranz und Wolfurt, Diskussion in den entsprechenden Kapiteln).

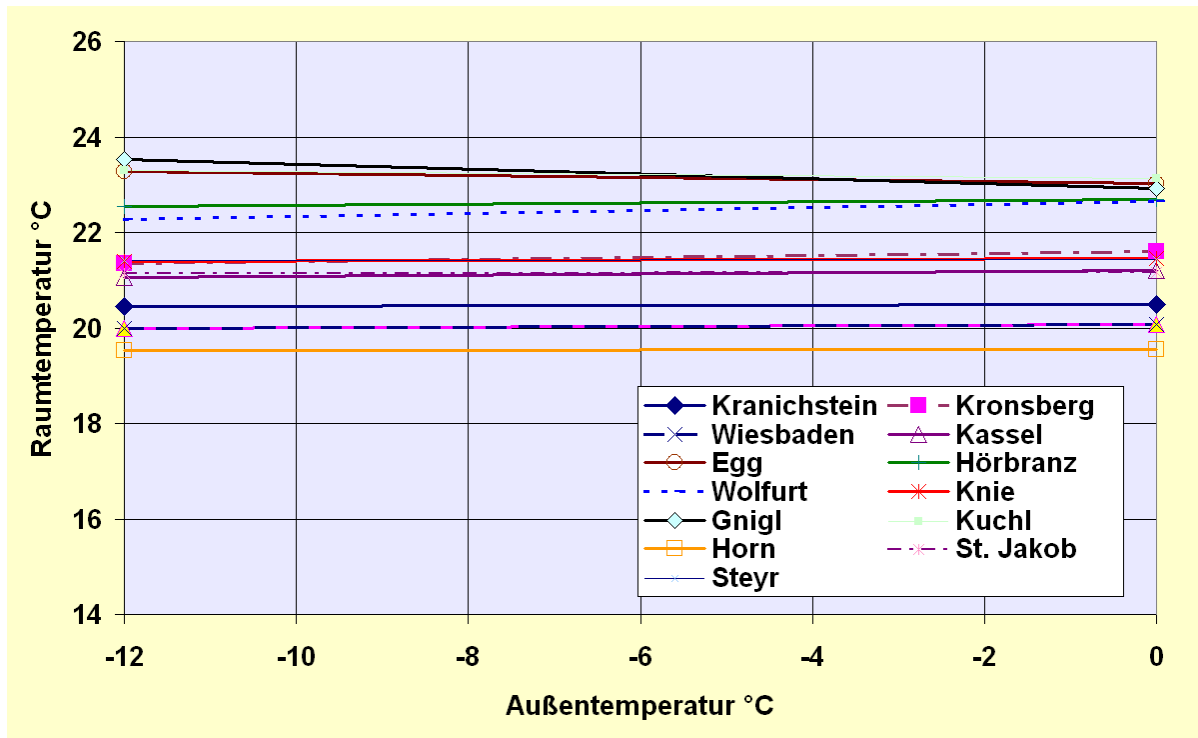


Abbildung 116: Korrelation von Raumtemperatur und Außentemperatur nach Messergebnissen aus 12 Projekten. Die Steigungen sind in allen Fällen kleiner als  $0.036 \text{ }^\circ\text{C}/^\circ\text{C}$  und in keinem Fall auf unzureichende Heizleistungen zurückzuführen.

### 5.3 Empfehlungen

In der hier durchgeführten Auswertung von Messergebnissen aus mehr als 150 Wohnungen mit sehr geringem Heizwärmeverbrauch erwiesen sich

- die Behaglichkeitsparameter unter allen Umständen als innerhalb der internationalen Normung (DIN EN ISO 7730) sehr gut erfüllt und
- zugleich die gemessenen spezifischen Heizleistungen als extrem gering, in den Passivhäusern unter  $10 \text{ W/m}^2$ , bei allen anderen untersuchten Objekten unter  $18 \text{ W/m}^2$ .

Alle Messergebnisse bestätigen das Abknicken der Heizkurven bei sehr niedrigen Außentemperaturen, das auf die passiv solaren Deckungsanteile sowie auf instationäre Vorgänge (Speichereffekte) zurückzuführen ist.

Die Messergebnisse bestätigen im Vergleich zwischen 13 sehr unterschiedlichen Projekten, dass die maximalen Heizleistungen je nach passiv solarem Charakter des betrachteten Gebäudes

- entweder tatsächlich an Tagen mit den niedrigsten Mehrtagesmitteln der Außenlufttemperaturen (nämlich bei Gebäuden mit relativ geringem passiv solarem Charakter)

- oder an Tagen mit moderat niedrigen Außentemperaturen, aber sehr geringem passiv solarem Gewinn (nämlich bei Gebäuden mit relativ hohem passiv solarem Charakter)

auftreten. Welcher Fall für ein konkretes Gebäude in einem konkreten Klima vorliegt, kann nicht durch Plausibilitätsüberlegungen bestimmt werden. Jedoch ist es mit dem Heizlastverfahren mit zwei Auslegungsklimadatensätzen mit geringem Aufwand möglich, beide Auslegungsfälle zu berechnen.

Ein entsprechendes Zweiperioden-Heizlastauslegungsverfahren war in der Publikation „Heizlastauslegung im Niedrigenergie- und Passivhaus“ [Bisanz 1999] entwickelt und vorgeschlagen worden. Das Verfahren hat sich nach der hier vorgelegten messtechnischen Validierung bewährt. Eine Korrektur oder Anpassung der Algorithmen erwies sich als nicht erforderlich [PHPP 2004].

Damit kann die Verwendung des Zweiperioden-Heizlastauslegungsverfahrens für die Projektierung von Passivhäusern und anderen Gebäuden mit sehr geringen Heizleistungen empfohlen werden.

## 6 Literatur

- [AkkP-25] Temperaturdifferenzierung in der Wohnung; Protokollband Nr. 25 des Arbeitskreises kostengünstige Passivhäuser Phase III; Passivhaus Institut; Darmstadt 2004
- [AkkP-28] Wärmeübergabe- und Verteilverluste im Passivhaus; Protokollband Nr. 28 des Arbeitskreises kostengünstige Passivhäuser Phase III; Passivhaus Institut; Darmstadt 2004
- [ASHRAE 55-2003] ASHRAE: Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy, THIRD PUBLIC REVIEW, MAY 2003
- [Bisanz 1999] Bisanz, C.: Heizlastauslegung im Niedrigenergie- und Passivhaus, 1. Auflage, Darmstadt, Januar 1999
- [Christoffer 1996] Christoffer, Jürgen: Analyse der winterlichen Gradtagzahlen von 1991/92 bis 1995/96; HLH Bd. 47 (1996) Nr. 12
- [DIN 4701] Deutsches Institut für Normung: DIN 4701: Regeln für die Berechnung des Wärmebedarfs von Gebäuden; Beuth Verlag; Berlin 1995
- [DIN EN ISO 7730] DIN EN ISO 7730: Gemäßigtes Umgebungsklima; Beuth Verlag, Berlin 1987
- [DIN EN 10077] DIN EN 10077: Fenster; Türen und Abschlüsse; Wärmedurchgangskoeffizient; Berechnungsverfahren Beuth-Verlag; Berlin
- [DIN EN 12831] DIN EN 12831: Heizungssysteme in Gebäuden – Verfahren zur Berechnung der Norm-Heizlast Deutsche Fassung EN 12831; Beuth Verlag; Berlin
- [DIN EN 832] Europäische Norm: Wärmetechnisches Verhalten von Gebäuden – Berechnung des Heizenergiebedarfs – Wohngebäude; Europäisches Komitee für Normung; Brüssel 1998
- [Ebel 2003] Ebel, W.; Großklos, M.; Knissel, J.; Loga, T.; Müller, K.: Wohnen in Passiv- und Niedrigenergiehäusern. Institut Wohnen und Umwelt, 1. Auflage, Darmstadt 2003 (vgl. dazu auch: <http://bine.fiz-karlsruhe.de/temp/main.php/gebaeude/wohnungsbau>)
- [Feist-Zolper 1985] Feist, W.; Zolper, M.: STATBIL-Handbuch, Tübingen 1985
- [Feist 1989] Feist, W.: Das vereinfachte Heizenergiebilanzprogramm STATBIL/ENBIL; Institut Wohnen und Umwelt, 1. Aufl., Mai 1989
- [Feist 1992] Feist, W.: Passivhäuser in Mitteleuropa, Dissertation, Universität Kassel, 1992



- [Feist/Werner 1993] Feist, W. und Werner, J.: Erste Messergebnisse aus dem Passivhaus Damstadt Kranichstein; gi 114 (1993) Heft 5 Seite 240 ff
- [Feist/Loga 1997] Feist, W. und Loga, T.: Vergleich von Messung und Simulation. In: Arbeitskreis kostengünstige Passivhäuser, Protokollband Nr. 5, Passivhaus Institut, Damstadt 1997
- [Feist 1997] Feist, W.: Der Härtestest: Passivhäuser im strengen Winter 1996/97; GRE-Inform 12/97 Seite 18 bis 26
- [Feist, Loga 2000] Feist, W.; Loga, T.; Großklos, M.: Durch Messungen bestätigt - Jahresheizenergieverbrauch bei 22 Passivhäusern in Wiesbaden unter 15 kWh/m<sup>2</sup> Wohnfläche; Bundesbaublatt, Heft 3/2000, S. 23-27  
(siehe auch:  
[http://www.iwu.de/datei/ergebnisse\\_ph\\_wiesbaden.pdf](http://www.iwu.de/datei/ergebnisse_ph_wiesbaden.pdf))
- [Feist 2001a] Feist, W.; Peper, S.; Görg, M.; von Oesen, M.: Klimaneutrale Passivhaussiedlung Hannover-Kronsberg; CEPHEUS-Projektinformation Nr. 18; PHI-2001/5; Passivhaus Institut; Damstadt 2001
- [Feist 2001b] Feist, W.: Wissenschaftliche Auswertung von Messungen in Passivhäusern/Niedrigenergiehäusern der Siedlung Wiesbaden Lummerlund. Studie im Auftrag des Instituts Wohnen und Umwelt, Damstadt 2001
- [Flade 2003] Flade, A.: Wohnkomfort im Passivhaus; Institut Wohnen und Umwelt, 1. Auflage, Darmstadt 2003
- [Kaufmann/Feist 2001] Kaufmann, B. und Feist, W.: Vergleich von Messung und Simulation am Beispiel eines Passivhauses in Hannover-Kronsberg. CEPHEUS-Projektinformation Nr. 21, Passivhaus Institut, energcity, Hannover 2001
- [Krapmeier, Drössler 2001] Krapmeier, H.; Drössler, E.: CEPHEUS Wohnkomfort ohne Heizung, 1. Aufl., Wien New York 2001
- [Krapmeier, Müller 2001-26] Krapmeier, H.; Müller, E.: Einfamilienhaus Dornbirn - Knie, CEPHEUS-Bericht Nr. 26, Energie Institut Vorarlberg 2001
- [Krapmeier, Müller 2001-27] Krapmeier, H.; Müller, E.: Mehrfamilienhaus Salzburg - Gnigl, CEPHEUS-Bericht Nr. 27, Energie Institut Vorarlberg 2001
- [Peper 1999] Peper, S.: Luftdichte Projektierung von Passivhäusern. CEPHEUS-Projektinformation Nr. 7, Passivhaus Institut, Damstadt 1999
- [Peper 2001] Peper, S.; Feist, W.; Kah, O.: Messtechnische Untersuchung und Auswertung; Klimaneutrale Passivhaussiedlung in Hannover-

Kronsberg, Fachinformation. PHI-2001/6, Passivhaus Institut, Damstadt 2001

- [PHPP 1999] Feist, W.; Baffia, E. und Schnieders, J.: Passivhaus Projektierungspaket 1999; Passivhaus Institut, Damstadt, Januar 1999
- [PHPP 2004] Feist, W.; Pfluger, R.; Kaufmann, B.; Schnieders, J.; Kah, O.: Passivhaus Projektierungspaket 2004; Passivhaus Institut, Damstadt, Januar 1999
- [Rasch 1997] Rasch, F.: Kostengünstige Passivhäuser in Wiesbaden. In Protokollband Nr. 11 des Arbeitskreises kostengünstige Passivhäuser „Kostengünstige Passivhäuser“. 1. Auflage, Passivhaus Institut, Damstadt 1997
- [Schnieders 1998] Schnieders, J.; Feist, W.: Passivhaus – Reihenhäuser: Über die Zuluft beheizbar? Simulation des thermischen Gebäudeverhaltens bei Variation ausgewählter Parameter und bei Zuluftnachheizung; CEPHEUS-Projektinformation Nr. 5; Passivhaus Institut; Damstadt 1998
- [Schnieders 2001] Schnieders, J.; Feist, W. et al.: CEPHEUS Wissenschaftliche Begleitung und Auswertung. Endbericht; CEPHEUS-Projektinformation Nr. 22. Passivhaus Institut. Damstadt, Juli 2001
- [Schnieders, Such 1998] Schnieders, J. und Such, M.: Untersuchungen der Luftdichtheit in der Niedrigenergie- und Passivhaussiedlung Lummerlund in Wiesbaden-Dotzheim, Passivhaus Institut, 1. Auflage, 1998
- [SIA 380/1] Schweizerischer Ingenieur- und Architekten-Verein: SIA 380/1 "Energie im Hochbau"; Zürich 1988

## ANHANG I

**Verwendete Wandaufbauten im DYNBIL-Modell des Reihenendhauses  
Kronsberg (Basisfall Passivhaus):**
**Beton12 (als Innenwand):**

U-Wert:	3.15 W/(m <sup>2</sup> K)
Gesamt-Wärmekapazität:	311.0 kJ/(m <sup>2</sup> K)
Effekti ve Wärmekapazität:	259.2 kJ/(m <sup>2</sup> K)

**Schichtaufbau:**

Material	d [cm]	rho [kg/m <sup>3</sup> ]	C [kJ/(kgK)]	lambda [W/(mK)]
Normalbeton	12	2400	1.08	2.1

**Dach:**

U-Wert:	0.095 W/(m <sup>2</sup> K)
Gesamt-Wärmekapazität:	75.4 kJ/(m <sup>2</sup> K)
Effekti ve Wärmekapazität:	29.7 kJ/(m <sup>2</sup> K)

Material	d [cm]	rho [kg/m <sup>3</sup> ]	C [kJ/(kgK)]	lambda [W/(mK)]
Spanplatte	2.5	600	1.98	0.13
Mineralwolle 040	40	45	0.504	0.04
Spanplatte	1.9	600	1.98	0.13
Gipskarton	1.25	1200	0.936	0.21

**Fassade:**

U-Wert:	0.125 W/(m <sup>2</sup> K)
Gesamt-Wärmekapazität:	58.86 kJ/(m <sup>2</sup> K)
Effekti ve Wärmekapazität:	19.01 kJ/(m <sup>2</sup> K)

**Schichtaufbau:**

Material	d [cm]	rho [kg/m <sup>3</sup> ]	C [kJ/(kgK)]	lambda [W/(mK)]
Spanplatte	1.6	600	1.98	0.13
Mineralwolle 040	30	45	0.504	0.04
Spanplatte	1.6	600	1.98	0.13
Gipskarton	1.25	1200	0.936	0.21

**Giebelwand:**

U-Wert:	0.097 W/(m <sup>2</sup> K)
Gesamt-Wärmekapazität:	468.72 kJ/(m <sup>2</sup> K)
Effekti ve Wärmekapazität:	19.44 kJ/(m <sup>2</sup> K)

**Schichtaufbau:**

Material	d [cm]	rho [kg/m <sup>3</sup> ]	C [kJ/(kgK)]	lambda [W/(mK)]
Außenputz	1	1800	1.08	0.8
Polystyrol-Hartschaum 040	40	30	1.8	0.04
Normalbeton	16.5	2400	1.08	2.1

**Grundplatte:**

U-Wert:	0.090 W/(m <sup>2</sup> K)
Gesamt-Wärmekapazität:	693.37 kJ/(m <sup>2</sup> K)
Effekti ve Wärmekapazität:	22.58 kJ/(m <sup>2</sup> K)

**Schichtaufbau:**

Material	d [cm]	rho [kg/m <sup>3</sup> ]	C [kJ/(kgK)]	lambda [W/(mK)]
Polystyrol-Hartschaum 040	42	30	1.8	0.04
Normalbeton	25	2400	1.08	2.1
Mineralwolle 040	0.5	45	0.504	0.04
Nadelholz	2	415	2.72	0.13

**Innenwand:**

U-Wert:	0.606 W/(m <sup>2</sup> K)
Gesamt-Wärmekapazität:	28.113 kJ/(m <sup>2</sup> K)
Effekti ve Wärmekapazität links:	13.478 kJ/(m <sup>2</sup> K)
Effekti ve Wärmekapazität rechts:	13.478 kJ/(m <sup>2</sup> K)

**Schichtaufbau:**

Material	d [cm]	rho [kg/m <sup>3</sup> ]	C [kJ/(kgK)]	lambda [W/(mK)]
Gipskarton	1.2	1200	0.936	0.21
Mineralwolle 040	5.1	45	0.504	0.04
Gipskarton	1.2	1200	0.936	0.21

**Moebel:**

U-Wert:	1.55 W/(m <sup>2</sup> K)
Gesamt-Wärmekapazität:	59.4 kJ/(m <sup>2</sup> K)
Effekti ve Wärmekapazität links:	59.4 kJ/(m <sup>2</sup> K)

**Schichtaufbau:**

Material	d [cm]	rho [kg/m <sup>3</sup> ]	C [kJ/(kgK)]	lambda [W/(mK)]
Spanplatte	5	600	1.98	0.13

**Trennwand:**

U-Wert:	0.53 W/(m <sup>2</sup> K)
Gesamt-Wärmekapazität:	623.44 kJ/(m <sup>2</sup> K)
Effektive Wärmekapazität links:	259.2 kJ/(m <sup>2</sup> K)
Effektive Wärmekapazität rechts:	259.2 kJ/(m <sup>2</sup> K)

**Schichtaufbau:**

Material	d [cm]	rho [kg/m <sup>3</sup> ]	C [kJ/(kgK)]	lambda [W/(mK)]
Normalbeton	12	2400	1.08	2.1
Mineralwolle 040	6	45	0.504	0.04
Normalbeton	12	2400	1.08	2.1

**Zwischendecke:**

U-Wert:	1.53 W/(m <sup>2</sup> K)
Gesamt-Wärmekapazität:	644.77 kJ/(m <sup>2</sup> K)
Effektive Wärmekapazität links:	259.2 kJ/(m <sup>2</sup> K)
Effektive Wärmekapazität rechts:	22.576 kJ/(m <sup>2</sup> K)

**Schichtaufbau:**

Material	d [cm]	rho [kg/m <sup>3</sup> ]	C [kJ/(kgK)]	lambda [W/(mK)]
Normalbeton	24	2400	1.08	2.1
Mineralwolle 040	0.5	45	0.504	0.04
Nadelholz	2	415	2.72	0.13

Flächen der Außenhülle im Basismodell:

Hüllflächen-Bauteile	verwendeter Aufbau	Fläche m <sup>2</sup>	U- Wert W/(m <sup>2</sup> K)
<b>Boden EG</b>	Grundplatte	<b>55.0</b>	<b>0.090</b>
<b>EG Süd</b>	Fassade	<b>8.6</b>	<b>0.125</b>
<b>EG West End</b>	Giebelwand	<b>26.4</b>	<b>0.097</b>
<b>EG Nord</b>	Fassade	<b>12.4</b>	<b>0.125</b>
<b>WC Boden</b>	Grundplatte	<b>2.3</b>	<b>0.090</b>
<b>Boden Flur</b>	Grundplatte	<b>7.0</b>	<b>0.090</b>
<b>Dach Flur</b>	Dach	<b>1.2</b>	<b>0.095</b>
<b>Kind Süd</b>	Fassade	<b>9.6</b>	<b>0.125</b>
<b>Kind Dach</b>	Dach	<b>26.4</b>	<b>0.095</b>
<b>Kind West End</b>	Giebelwand	<b>13.0</b>	<b>0.097</b>
<b>Schlaf Nord</b>	Fassade	<b>9.9</b>	<b>0.125</b>
<b>Schlaf West End</b>	Giebelwand	<b>8.5</b>	<b>0.097</b>
<b>Schlaf Dach</b>	Dach	<b>19.7</b>	<b>0.095</b>
<b>Bad West End</b>	Giebelwand	<b>8.0</b>	<b>0.097</b>
<b>Technik Dach</b>	Dach	<b>21.6</b>	<b>0.095</b>
<b>Technik West End</b>	Giebelwand	<b>5.5</b>	<b>0.097</b>
<b>Verglasung EG Süd</b>	3 Wschutz Ar	<b>4.9</b>	<b>0.750</b>
<b>Verglasung EG Nord</b>	3 Wschutz Ar	<b>3.2</b>	<b>0.750</b>
<b>Verglasung Kind Süd</b>	3 Wschutz Ar	<b>3.0</b>	<b>0.750</b>
<b>Verglasung Schlaf Nord</b>	3 Wschutz Ar	<b>2.5</b>	<b>0.750</b>

Dokumentation der Wärmebrücken und ihrer Verluste im Basismodell

Achtung: der Fensterrahmen wird hier zur Modellvereinfachung einschließlich des Glasrandverbundwärmeverlusteffektes und der Wärmebrücke des Fenstereinbaus komplett in den Wärmebrückenverlustkoeffizient des Anschlusses "Verglasung an Außenwand" eingerechnet:

$$l_w * \Psi_w = A_f * U_f + l_g * \Psi_g + \sum l_{Ein,j} * \Psi_{Ein,j}$$

wobei

- $l_w$  Modellumfassungslänge der transparenten Fläche
- $\Psi_w$  Wärmebrückenverlustkoeffizient "Verglasung an Außenwand"
- $A_f$  Rahmenfläche
- $U_f$  U-Wert des Rahmens nach DIN EN 10077
- $l_g$  Länge des Glasrandes
- $\Psi_g$  Wärmebrückenverlustkoeffizient des Glasrandes
- $l_{Ein,j}$  Länge des Einbaurandes, Seite j
- $\Psi_{Ein,j}$  Wärmebrückenverlustkoeffizient des Einbaurandes, Seite j

Wärmebrücken und ihre Wärmebrückenverlustkoeffizienten	Länge	$\Psi_i$
	m	W/(mK)
<b>Boden EG: FassGru</b>	<b>12.3</b>	<b>0.014</b>
<b>Boden EG: GiebGru</b>	<b>11.4</b>	<b>0.050</b>
<b>Boden EG: BpTw</b>	<b>8.1</b>	<b>0.024</b>
<b>EG Süd: Fensterrahmen</b>	<b>10.8</b>	<b>0.126</b>
<b>EG Süd: Zwischenrahmen</b>	<b>8.8</b>	<b>0.099</b>
<b>EG Süd: Zwideck-Fassade</b>	<b>12.3</b>	<b>0.053</b>
<b>EG Süd: SW</b>	<b>3.1</b>	<b>0.053</b>
<b>EG Süd: SO</b>	<b>3.1</b>	<b>0.098</b>
<b>EG Nord: Fensterrahmen</b>	<b>13.0</b>	<b>0.126</b>
<b>EG Nord: Zwideck-Fassade</b>	<b>6.1</b>	<b>0.024</b>
<b>EG Nord: NW</b>	<b>3.1</b>	<b>0.053</b>
<b>EG Nord: NO</b>	<b>3.1</b>	<b>0.098</b>
<b>WC Boden: BpTw</b>	<b>1.3</b>	<b>0.024</b>
<b>Boden Flur: BpTw</b>	<b>2.0</b>	<b>0.024</b>
<b>Kind Süd: Fensterrahmen</b>	<b>12.8</b>	<b>0.126</b>
<b>Kind Süd: Zwideck-Fassade</b>	<b>6.2</b>	<b>0.053</b>
<b>Kind Süd: Zwischenrahmen</b>	<b>0.0</b>	<b>0.099</b>
<b>Kind Süd: SW</b>	<b>3.0</b>	<b>0.053</b>
<b>Kind Süd: SO</b>	<b>3.0</b>	<b>0.098</b>
<b>Kind Dach: DaLw</b>	<b>6.2</b>	<b>0.047</b>
<b>Kind Dach: DaKind (West)</b>	<b>5.2</b>	<b>0.045</b>
<b>Kind Dach: DaKind (Ost)</b>	<b>5.2</b>	<b>0.008</b>
<b>Schlaf Nord: Fensterrahmen</b>	<b>8.8</b>	<b>0.126</b>
<b>Schlaf Nord: Zwischenrahmen</b>	<b>5.2</b>	<b>0.099</b>
<b>Schlaf Nord: Zwideck-Fassade</b>	<b>6.2</b>	<b>0.053</b>
<b>Schlaf Nord: NW</b>	<b>3.0</b>	<b>0.053</b>
<b>Schlaf Nord: NO</b>	<b>3.0</b>	<b>0.098</b>
<b>Schlaf Dach: DaLw</b>	<b>6.2</b>	<b>0.047</b>
<b>Schlaf Dach: DaSchlaf (West)</b>	<b>3.8</b>	<b>0.045</b>
<b>Schlaf Dach: DaSchlaf (Ost)</b>	<b>3.8</b>	<b>0.008</b>
<b>Technik Dach: DaTw (Ost)</b>	<b>3.6</b>	<b>0.008</b>
<b>Technik Dach: First</b>	<b>6.2</b>	<b>0.019</b>
<b>Technik Dach: DaTechnik (West)</b>	<b>3.6</b>	<b>0.045</b>