

Warum sind Messwerte oft höher als der zuvor berechnete Bedarf?

Von Dr. Wolfgang Feist, Passivhaus Institut 2007

Diese Frage ist nicht einfach zu beantworten, da das Gesamtsystem "Gebäude und Heizung" einen sehr hohen Komplexitätsgrad aufweist. Eine Simulation auf der Basis von physikalischen Basisprinzipien (engl. "first principles") ist bis dato für Gebäude, Lüftung inkl. Raumluftströmung, Heizwärmeverteilung, Wärmeübergabesystem und Regelung nicht durchgeführt worden. Für alle Teilbereiche gibt es inzwischen jedoch recht gut validierte Einzelmodelle – diese sind in [AkkP 28] systematisch beschrieben.

Die überzeugendste Überprüfung von unterschiedlichen Ansätzen zur Verbesserung der Energieeffizienz ist nach wie vor durch eine sorgfältige messtechnische Validierung in praktisch realisierten Objekten möglich. Diese Methode ist letztendlich das einzig unbestreitbar stichhaltige Überprüfungsverfahren. Dieses Verfahren erweist sich aber nach den vorliegenden Ergebnissen als sehr aufwändig, weil die allgemein vorhandenen großen Streuungen beim Nutzerverhalten regelmäßig weit größeren Einfluss entfalten als die jeweils eigentlich zu untersuchenden Fragestellungen (Das ist eine der Ursachen für die in der Überschrift aufgeworfenen Frage). Hierüber herrscht in der Fachwelt Einigkeit, wir zitieren [Dipper 2001]: "In zahlreichen Feldversuchen, bei denen in ansonsten weitgehend identischen Gebäuden unterschiedliche Heizsysteme installiert wurden, konnte gezeigt werden, dass eine große Streuung der gemessenen Energieverbrauchswerte auftritt, die sich nicht durch unterschiedliche Anlagentechnik erklären lässt [Bach 1988], [Fichtner 1993]." Dieser Aussage kann im Kern zugestimmt werden. Sie entbindet aber dennoch nicht von der Verpflichtung, methodisch auf anderem Weg erzielte Erkenntnisse an entscheidenden Stellen durch Feldversuche zu überprüfen. Genau diese Überprüfungsfunktion für die theoretischen Methoden kommt dem Feldversuch zu; eine messtechnische Überprüfung der Nutzungseigenschaften einzelner Komponenten (wie z.B. bestimmter Regeleinrichtungen) überfordert dagegen den Feldversuch. Die Ursache für letzteres liegt in der notwendigerweise sehr großen Streuung auf Grund der nutzungsbedingten Einflüsse (z.B. Raumtemperaturniveau, Lüftungsverhalten, Einflüsse des Nachbarn), wie die im folgenden dargestellten Ergebnisse noch präzisieren werden.

Überprüfung durch Feldmessungen (Verbrauch)

Die Datenlage ist heute dadurch erheblich verbessert, dass statistisch gesicherte gemessene Verbrauchsdaten aus mehreren Siedlungen mit einer ausreichend hohen Zahl von baugleichen Gebäuden und gleicher Gebäudetechnik vorliegen. Im Folgenden werden die Ergebnisse aus diesen Feldmessungen vergleichend dargestellt. Auch in Bezug auf die Analysewerkzeuge gibt es Fortschritte und neue Erkenntnisse. In [Schnieders/Feist 2001] wurden die Verteilungen der mit Wärmezählern gemessenen Verbrauchswerte von drei Bauprojekten im ersten Betriebswinter untersucht. Mittels Chi-Quadrat-Test und Kolmogoroff-Smirnov-Test wurde in dieser Untersuchung gezeigt, dass die Hypothese "die gemessenen Verbrauchswerte sind normalverteilt" mit der gemessenen Verteilung verträglich ist. Die zu den Messwertreihen mit Mittelwert μ und Streuung σ gebildete Normalverteilung mit der Dichtefunktion

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}$$

stellt regelmäßig eine gute Approximation an die Messwerte x_i dar; dabei werden als Schätzwerte aus den Messwerten der Mittelwert

$$\mu = \sum x_i / n$$

und das Quadrat der Streuung (Varianz)

$$\sigma^2 = 1/(n-1) \sum (x_i - \mu)^2$$

gebildet. Die statistische Analyse erlaubt es, die systematischen Einflüsse (Qualität der Bausubstanz, insbesondere Dämmstandard und Qualität der Anlagentechnik) von den zufälligen Einflüssen (insbesondere Nutzerverhalten) zu separieren:

- Die Mittelwerte μ werden von den zufälligen Einflüssen (vor allem des Nutzerverhaltens) umso weniger abhängig, je größer die zugrunde liegende Gesamtheit ist. Die Streuung des Mittelwertes ist, setzt man die Hypothese einer Normalverteilung voraus, durch $\sigma n^{-1/2}$ gegeben. Damit reduziert sich der zufällige Fehler bei Feldmessungen mit der Wurzel aus der Zahl der gemessenen Objekte.
- Die Streuung σ ist ein Maß für die zufälligen Einflüsse auf die Werte der Einzelmessungen; auch σ lässt sich in einer größeren gemessenen Gesamtheit genauer bestimmen. In [Feist 2004] wurde die These belegt, dass die Streuung σ der Wärmezählermessungen des Heizwärmeverbrauches bei Niedrigenergie- und Passivhäusern in guter Näherung durch

$$\sigma = 17\% \cdot (Q_T + Q_V)$$

gegeben ist. Dabei sind Q_T der (rechnerische) Jahrestransmissionswärmeverlust, Q_V der (rechnerische) Jahreslüftungswärmeverlust, wobei die durch Wärmerückgewinnung zurück

gewonnene Wärme bei Q_V bereits abgezogen ist. Statt der absoluten Werte können auch auf die Fläche A_{Bezug} (Energiebezugsfläche) bezogene Werte verwendet werden. Dabei ist darauf zu achten, dass die gleiche Bezugsfläche verwendet wird, die auch zur Bestimmung der spezifischen individuellen Messwerte der Wärmezählermessung verwendet wurde. Im Folgenden wird grundsätzlich auf die **beheizte Wohnfläche** (berechnet nach II. Berechnungsverordnung) bezogen.

Danach ist die Streuung der individuellen Werte proportional zu den Wärmeverlusten einer Gebäudegesamtheit mit gleichem baulichen und anlagentechnischen Standard. Die absolute Höhe der Streuung nimmt daher mit besser werdendem Dämmstandard proportional ab. Weil der Heizwärmebedarf (und bei korrektem Rechengang auch der Heizwärmeverbrauch) wegen der verfügbaren freien Wärme stärker abnimmt, nimmt die Streuung relativ zum Heizwärmebedarf bei besser werdendem Dämmstandard (geringfügig) zu.

1 Vergleichsgesamtheit I: Belgiersiedlung in Kassel

Abbildung 1 zeigt die aufsteigend geordneten Jahresheizwärmemesswerte dieser Häuser (individuelle Daten aus [AkkP 9]). Die Grafik zeigt, dass die Approximation der Messwerte durch eine Normalverteilung in diesem Fall überzeugend ausfällt. Der Mittelwert ergibt sich zu $\mu = 158,5 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ (mittlerer Verbrauch), die Streuung zu $\sigma = 39,2 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ (nutzungsbedingte Abweichungen). Der aus 98 Wohnungen bestimmte Verbrauchsmittelwert ist mit einem zufälligen Fehler (Standardabweichung) von $39,2 / 98^{1/2} \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a}) = 4,0 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ bestimmbar. Für die Reihenhäuser der Belgiersiedlung beträgt der statistische Fehler der Messung des Energieverbrauches damit etwa 2,5% des Mittelwertes.

Für die Altbauten der Belgiersiedlung liegt keine Aufnahme der baulichen und anlagentechnischen Daten vor. Daher gibt es bisher auch keine rechnerische Energiebilanz, so dass ein Vergleich zwischen Mess- und Rechenwerten hier leider nicht möglich ist. Dennoch sind die Messwerte als Vergleichsbasis gut verwendbar.

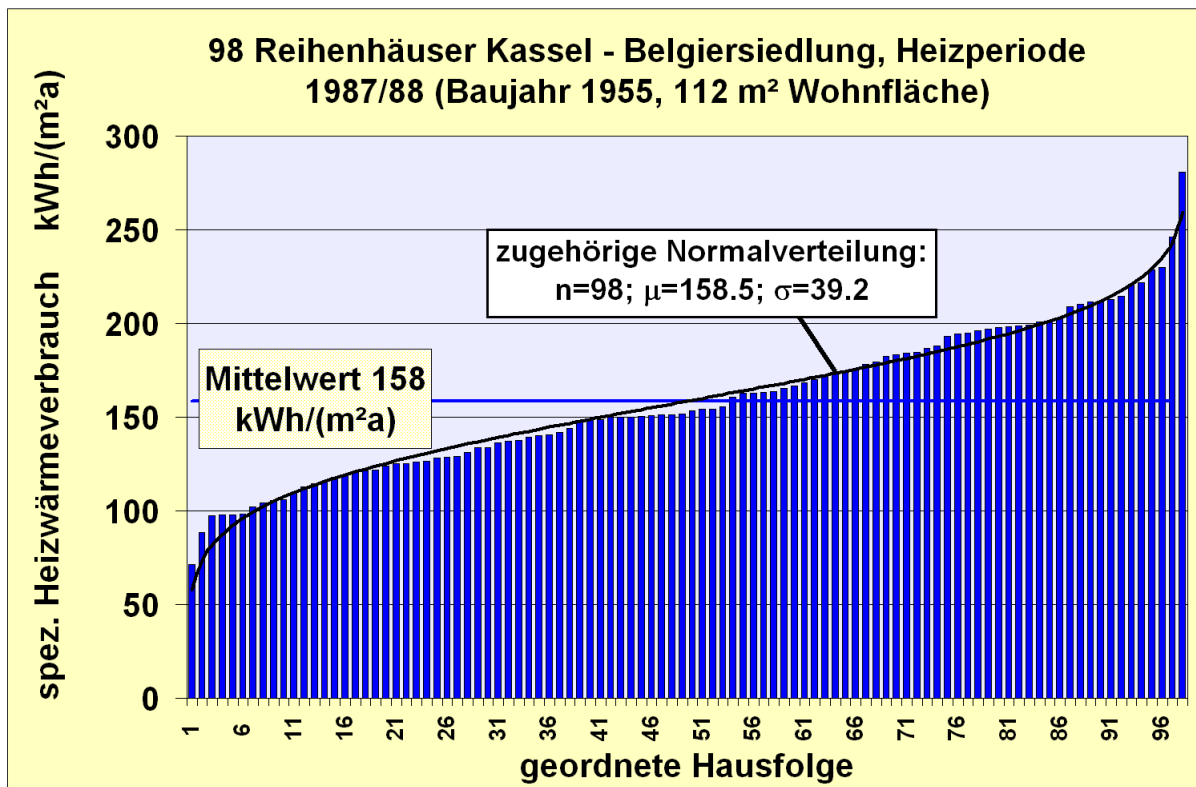


Abbildung 1: Individuelle Heizwärmeverbrauchswerte von 98 Altbau-Reihenhäusern der Belgiersiedlung in Kassel und zugehörige Normalverteilung.

2 Vergleichsgesamtheit II: Niedrigenergiehaussiedlung "Distelweg" in Niedernhausen

Es handelt sich um die erste deutsche Niedrigenergiehaussiedlung im Hessischen Niedernhausen (Baujahr 1991/92, Architekten Gitter/Hamacher, Brackrock und Baufrösche, Koordination Rasch&Partner). Die Siedlung wird in [Loga 1997] eingehend beschrieben; aus dieser Publikation wurden auch die analysierten Verbrauchswerte des Jahres 1994 entnommen.

In Abbildung 2 sind die Wärmezählermesswerte des Jahres 1994 für die Heizwärme dieser Häuser dokumentiert; zwei Ausreißer fallen deutlich aus der Verteilung heraus: Hier liegen besondere, systematische Gründe für die erhöhten Wärmeverbrauchswerte vor: In einem Fall wird der (wenig gedämmte) Keller zusätzlich beheizt. Die Grafik zeigt, dass die Approximation der Messwerte (ohne die Ausreißer) durch eine Normalverteilung auch hier gut zutrifft. Der Mittelwert ergibt sich für die Niedrigenergiehäuser zu $\mu = 65 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ (mittlerer Verbrauch), die Streuung zu $\sigma = 13,6 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ (nutzungsbedingte Abweichungen). Der aus 41 Wohnungen bestimmte Verbrauchsmittelwert ist mit einem zufälligen Fehler (Standardabweichung) von $13,6 / 41^{1/2} \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a}) = 2,1 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ bestimmbar. Für die Niedrigenergie-Reihenhäuser beträgt der statistische Fehler der Messung des Energieverbrauches damit etwa 3,2% des Mittelwertes, die Streuung der individuellen Messwerte liegt dagegen bei etwa 21% des Mittelwertes.

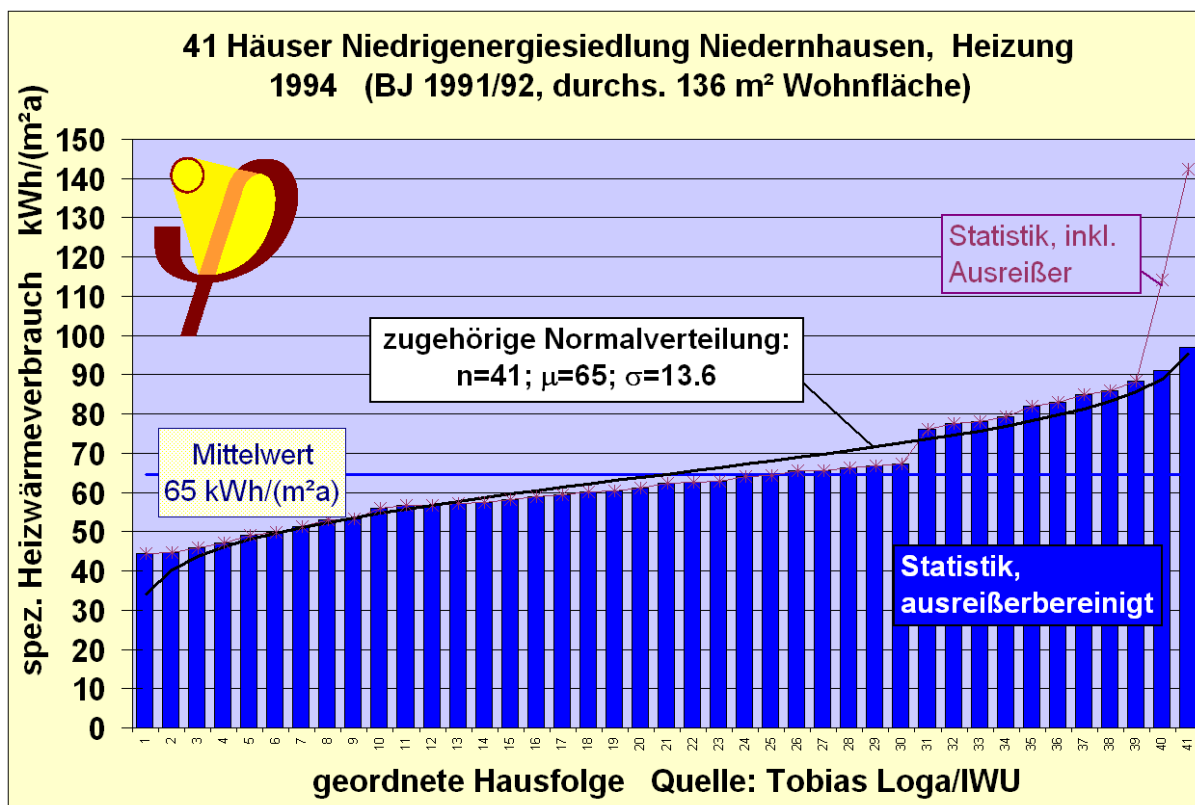


Abbildung 2: Individuelle Heizwärmeverbrauchsdaten von 41 Niedrigenergie-Reihenhäusern der Siedlung in Niedernhausen (Sternsymbol, inkl. zweier Ausreißer), ausreißerbereinigte Verteilung und die zugehörige Normalverteilung.

Für die Siedlung in Niedernhausen liegt eine genaue thermische Analyse der Gebäudehülle und der Gebäudetechnik vor. In [Loga 1997] wurde die Energiebilanz nach dem "Leitfaden energiebewusste Gebäudeplanung" berechnet und der Jahresheizwärmebedarf zu 68 kWh/(m²a) bestimmt. Der Mittelwert der Messungen liegt um etwa 4% unter dem berechneten Bedarf; diese Abweichung liegt innerhalb der Rechen- und Messgenauigkeit – Die Verbrauchswerte sind somit bei diesem Projekt ganz im Gegensatz zur Überschrift des Artikels nicht höher als die korrekt bestimmten Rechenwerte.

Der rechnerische Wärmeverlust der Niedrigenergie-Reihenhäuser liegt bei

$$(Q_T + Q_V) / A_{\text{Bezug}} = 90 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a}).$$

Damit gilt für die darauf bezogene Streuung der Einzelmesswerte

$$\sigma A_{\text{Bezug}} / (Q_T + Q_V) = 13,6 / 90 = 15.1\%.$$

3 Passivhaussiedlung "Lummerlund" in Wiesbaden/Dotzheim

Es handelt sich um die erste deutsche Passivhaussiedlung (Baujahr 1997, Bauträger Rasch&Partner). Diese Siedlung wurde im Rahmen der ersten Phase des

Arbeitskreises kostengünstige Passivhäuser durch das Passivhaus Institut begleitet. Im Auftrag von Rasch&Partner wurde 1997 eine Qualitätssicherung inkl. Drucktest und Thermographie durchgeführt [Schnieders/Such 1998]. Alle in diesem Abschnitt verwendeten Daten sind den Publikationen [Ebel 2003] [Feist/Loga/Großklos 2000] entnommen.

In Abbildung 3 sind die Wärmezählermesswerte der Heizperiode 1998/99 für die Passivhaussiedlung Wiesbaden dokumentiert (Heizung). Auch in diesem Fall ist eine Approximation der Messwerte durch eine Normalverteilung möglich. Der Mittelwert ergibt für die Passivhäuser $\mu = 13,4 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ (mittlerer Verbrauch), die Streuung beträgt $\sigma = 5,3 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ (nutzungsbedingte Abweichungen). Der aus 22 Wohnungen bestimmte Verbrauchsmittelwert ist mit einem zufälligen Fehler (Standardabweichung) von $5,3 / 22^{1/2} \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a}) = 1,1 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ versehen. Für die Passivhaussiedlung Wiesbaden beträgt der statistische Fehler der Messung des Energieverbrauches damit etwa 8,2% des Mittelwertes, die Streuung der individuellen Messwerte liegt dagegen bei etwa 40% des Mittelwertes.

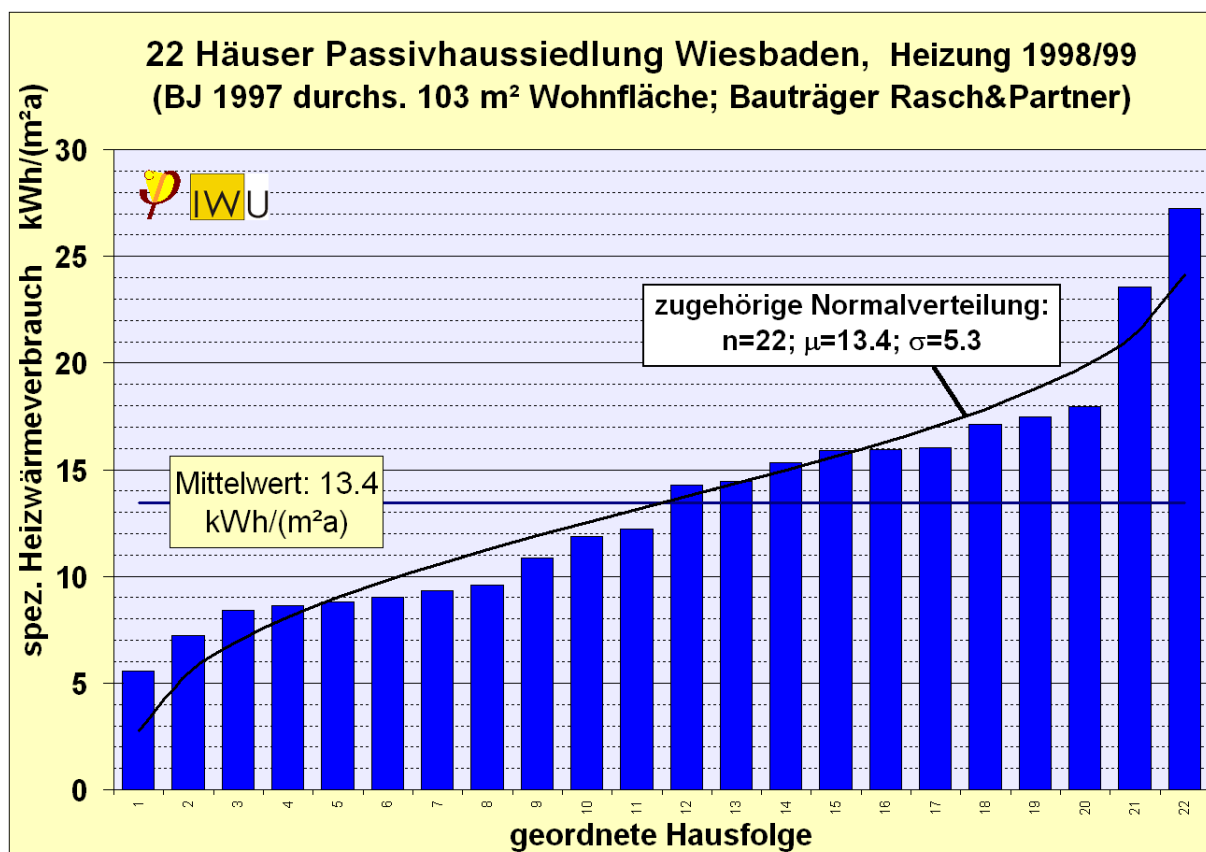


Abbildung 3: Individuelle Heizwärmeverbrauchswerte der 22 Passivreihenhäuser der Siedlung in Wiesbaden und die zugehörige Normalverteilung.

Für die Siedlung in Wiesbaden gibt es eine detaillierte Datenaufnahme und individuelle gerechnete Energie-Bilanzen der Einzelhäuser [Feist 2001]. Der Jahresheizwärmebedarf wurde im Mittel über alle 22 Häuser auf $13,4 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$

bestimmt. Der Mittelwert der Messungen liegt (zufällig für dieses Betriebsjahr) sehr genau beim berechneten Bedarf: auch hier gibt es keine Überschreitung der Rechenwerte; die empirische Untersuchung erregt nun bereits Zweifel an der in der Überschrift dieses Artikels ausgesprochenen Hypothese.

Der rechnerische Wärmeverlust der 22 Passivhäuser liegt bei

$$(Q_T + Q_V) / A_{\text{Bezug}} = 38 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a}).$$

Damit gilt für die darauf bezogene Streuung der Einzelmesswerte

$$\sigma A_{\text{Bezug}} / (Q_T + Q_V) = 5,3 / 38 = 14,1\%.$$

3 Passivhaussiedlung Hannover-Kronsberg

Die Passivhaussiedlung Hannover-Kronsberg besteht aus 32 im wesentlichen baugleichen Passiv-Reihenhäusern in Mischbauweise. Die Siedlung wurde 1998/99 errichtet; alle Einzelhäuser sind (mit [PHPP]) projektiert und vom Passivhaus Institut zertifiziert worden. Es handelt sich um die erste Passivhaussiedlung, in welcher ein kostensparendes Konzept der Beheizung allein über die Zuluft realisiert wurde - Heizkörper gibt es in dieser Siedlung nur in den Bädern. Heizwärme und Warmwasser wird über eine Fernwärmeversorgung bereitgestellt; die Verteilung erfolgt in einer im Dachboden innerhalb der thermischen Hülle verlegten Fernwärmeleitung. Im Rahmen von CEPHEUS [Schnieders/Feist 2001] wurde eine Qualitätssicherung für diese Siedlung durchgeführt. Die baulichen und anlagentechnischen Details der Siedlung sind in [Feist/Peper 2001] dokumentiert. Angaben zur Gebäudehülle, dem Wärmebedarf und zur Gebäudetechnik beziehen sich auf diese Publikation. Die Energieverbräuche innerhalb der Siedlung wurden mit einer zentralen Messdatenerfassung über insgesamt drei Messjahre kontinuierlich aufgezeichnet [Peper/Feist 2001] [Peper/Feist 2002]. Die mit Wärmezählern gemessenen Verbrauchsmittelwerte aller bewohnten Passivhäuser der Siedlung betragen

1. Heizperiode 1999/2000: 14,9 kWh/(m²a)
2. Heizperiode 2000/2001: 13,3 kWh/(m²a)
3. Heizperiode 2001/2002: 12,8 kWh/(m²a).

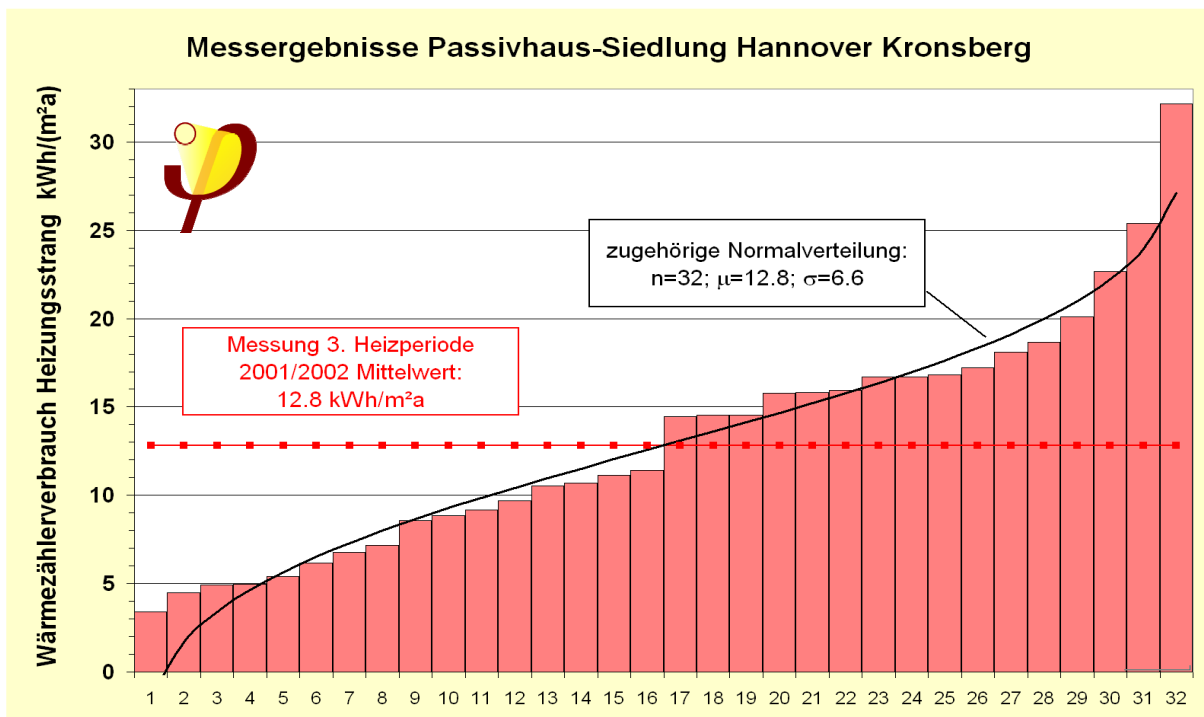


Abbildung 4: Statistik der Einzelmessungen (Wärmezähler Heizung) in den 32 Passivhäusern der Siedlung Hannover-Kronsberg in der 3. Heizperiode 2001/2002 und zugehörige Normalverteilung

Die folgenden Analysen stützen sich auf die Ergebnisse der 3. Heizperiode; zu dieser wurde in [Peper/Feist 2002] eine Auswertung auch bzgl. der individuellen Verbrauchswerte und der Ursachen der nutzungsbedingten Streuung durchgeführt; danach beträgt der mit dem Monatsverfahren nach Europäischer Norm [EN 832] berechnete mittlere Jahresheizwärmebedarf 2001/2002 unter Berücksichtigung der individuell gemessenen Innentemperaturen und der Querwärmeströme zwischen den Häusern $13,5 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$. Die mittlere quadratische Abweichung zwischen den individuell berechneten Einzelbedarfswerten und der gemessenen Statistik beträgt $\pm 3,6 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$, das Bestimmtheitsmaß zwischen Einzelmessungen und Einzelberechnungen wurde zu $r^2 = 75\%$ ermittelt.

Abbildung 4 zeigt die Wärmezählermesswerte der Heizperiode 2001/2002 dieser Passivhaussiedlung. Die Approximation der Messwerte durch eine Normalverteilung ist durch die Kurve ohne Symbole dargestellt. Der Mittelwert ergibt sich zu $\mu = 12,8 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$, die Streuung beträgt $\sigma = 6,6 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$. Der aus 32 Wohnungen bestimmte Verbrauchsmittelwert ist mit einem zufälligen Fehler (Standardabweichung) von $6,6 / 32^{1/2} \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a}) = 1,2 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ versehen. Für die Passivhaussiedlung Hannover-Kronsberg beträgt der statistische Fehler der Messung des Energieverbrauches damit etwa 9,4% des Mittelwertes, die Streuung der individuellen Messwerte liegt dagegen bei etwa 51% des Mittelwertes.

Für Hannover-Kronsberg gibt es individuelle gerechnete Bilanzen aller Einzelhäuser [Peper/Feist 2002]. Der Jahresheizwärmebedarf wurde für den Wetterdatensatz des

Jahres 2001/2002 im Mittel über alle 32 Häuser zu 13,5 kWh/(m²a) bestimmt. Der Mittelwert der Messungen liegt um 0,7 kWh/(m²a) oder etwa 5% unter dem berechneten Bedarf – auch hier trifft die Behauptung aus der Überschrift dieses Artikels somit nicht zu.

Der rechnerische Wärmeverlust der 32 Passivhäuser liegt bei

$$(Q_T + Q_V) / A_{\text{Bezug}} = 35,1 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a}).$$

Damit gilt für die darauf bezogene Streuung der Einzelmesswerte

$$\sigma_{A_{\text{Bezug}}} / (Q_T + Q_V) = 6,6 / 35,1 = 18,8\%.$$

Bei der Wärmezählermessung des Verbrauches für Heizung wird ein evtl. vorhandener Wärmeübergabeverlust *mitgemessen*. Das bedeutet, dass in den Messwerten nach Abbildung 5 evtl. Verluste der Wärmeübergabe bereits enthalten sind. Daraus geht eindeutig hervor, dass eventuell auftretenden Wärmeübergabeverluste in dieser Siedlung im gemessenen Betrieb nicht bedeutend sein können.

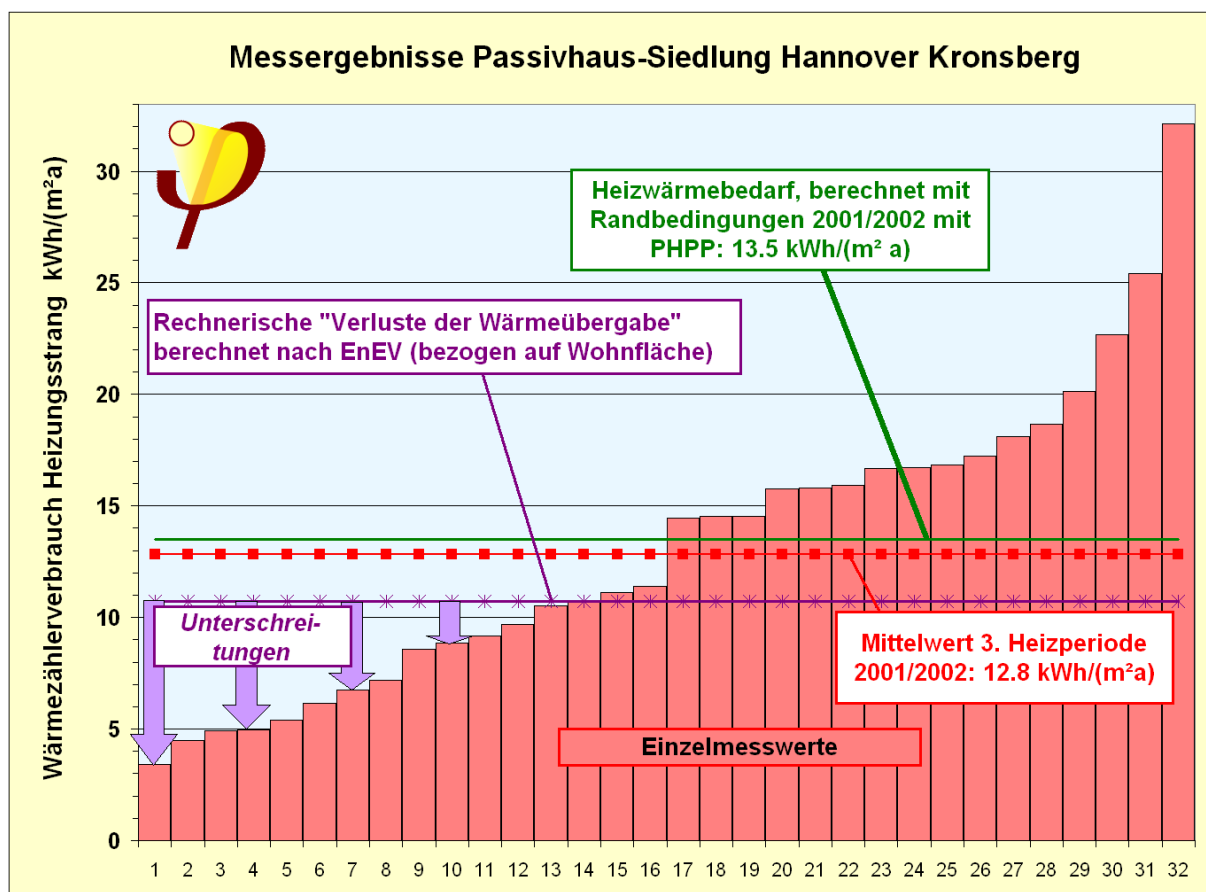


Abbildung 5: Statistik der Wärmezählermessergebnisse aus Hannover (identisch Abbildung 3) im Vergleich zum Heizwärmebedarf (Idealheizung, ohne Symbole) und zu den rechnerischen "Wärmeübergabeverlusten" nach DIN V 4701-10. Würden diese Rechenwerte zutreffen, so blieben zur Deckung des Heizwärmebedarfs in dieser Siedlung nur 2,1 kWh/(m²a). Die EnEV überzeichnet somit evtl. Wärmeübergabeverluste in hohem Ausmaß.

An Hand der Messungen, Energiebilanzrechnungen und der Fehlerbertrachtung zur Passivhaussiedlung in Hannover Kronsberg kann damit der folgende Schluss gezogen werden:

Für zusätzliche Wärmeverluste, die nicht in der Heizwärmebilanz nach EN 832 enthalten sind, besteht nach den Wärmezählermessungen im Heizungsstrang der Passivhaussiedlung Hannover Kronsberg nur im Rahmen der Fehlerrechnung ein Spielraum in einer Größenordnung von maximal $\pm 2.8 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$. Ein Ansatz von "0" für die Summe aller solchen zusätzlichen Wärmeverluste ist mit den Messergebnissen am besten verträglich.

4 Passivhaussiedlung Stuttgart Feuerbach

Die Passivhaussiedlung Stuttgart Feuerbach ("Schelmenäcker Weg") mit insgesamt 52 Reihen- und Doppelhäusern wurde im Jahr 2000 vom Architekturbüro Rudolf fertiggestellt. Die massiven Reihenhäuser wiesen eine durchschnittliche Wohnfläche von 121m^2 auf. Alle Häuser wurden vom Ingenieurbüro ebök individuell mit PHPP berechnet; es ergab sich ein durchschnittlicher Jahresheizwärmebedarf von $13,5 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$. Die baulichen Details ähneln denen der Passivhäuser in Viernheim die in [AkkP 21] detailliert beschrieben werden. Die Haustechnik (Frischluffluftheizung mit Wärmepumpenkompaktaggregat) wurde ebenfalls von ebök geplant. Die Berechnungen wurden im Jahr 2000 durch das Passivhaus Institut geprüft, die Häuser sind als qualitätsgeprüfte Passivhäuser zertifiziert.

Die Statistik der Heizwärmeverbrauchswerte nach den in [Reiß/Erhorn 2003] publizierten Daten sind in Abbildung 6 in aufsteigender Reihenfolge dargestellt. Es ergibt sich im Mittel ein Jahresheizwärmeverbrauch aller 52 Häuser von $14,3 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$. Die deutlich erkennbare Abweichung der größten fünf Messwerte in Abbildung 6 gegenüber einer Standardverteilung weisen auf spezifische Ursachen bei den fünf betroffenen Häusern gibt. Diese Ausreißer wurden für die statistische Untersuchung korrigiert (Säulengrafik). Die Approximation der Messwerte durch eine Normalverteilung ist durch die Kurve ohne Symbole dargestellt. Der um die Ausreißer korrigierte Mittelwert ergibt sich zu $\mu = 12,8 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$, die Streuung beträgt $\sigma = 5,5 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$. Der aus 52 Wohnungen bestimmte Verbrauchsmittelwert ist mit einem zufälligen Fehler (Standardabweichung) von $5,5 / 52^{1/2} \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a}) = 0,8 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ versehen. Für die Passivhaussiedlung Stuttgart-Feuerbach beträgt der statistische Fehler der Messung des Energieverbrauches damit etwa 6,3% des Mittelwertes, die Streuung der individuellen Messwerte liegt dagegen bei etwa 43% des Mittelwertes.

Der Mittelwert der Messungen liegt unkorrigiert um $0,8 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ über, um die Ausreißer korrigiert aber um $0,7 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ unter dem mit PHPP im voraus berechneten und zertifizierten Bedarf [ebök 2000]. Auch hier passen rechnerischer

Heizwärmebedarf nach dem Passivhaus Projektierungspaket und gemessene Wärmeabgabe der Kompaktgeräte zuzüglich der Direktheizung sehr gut zusammen.

Der rechnerische spezifische Wärmeverlust der 52 Passivhäuser liegt bei

$$(Q_T + Q_V) / A_{\text{Bezug}} = 37 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a}).$$

Damit gilt für die darauf bezogene Streuung der Einzelmesswerte

$$\sigma A_{\text{Bezug}} / (Q_T + Q_V) = 5,5 / 37 = 14,9\%.$$

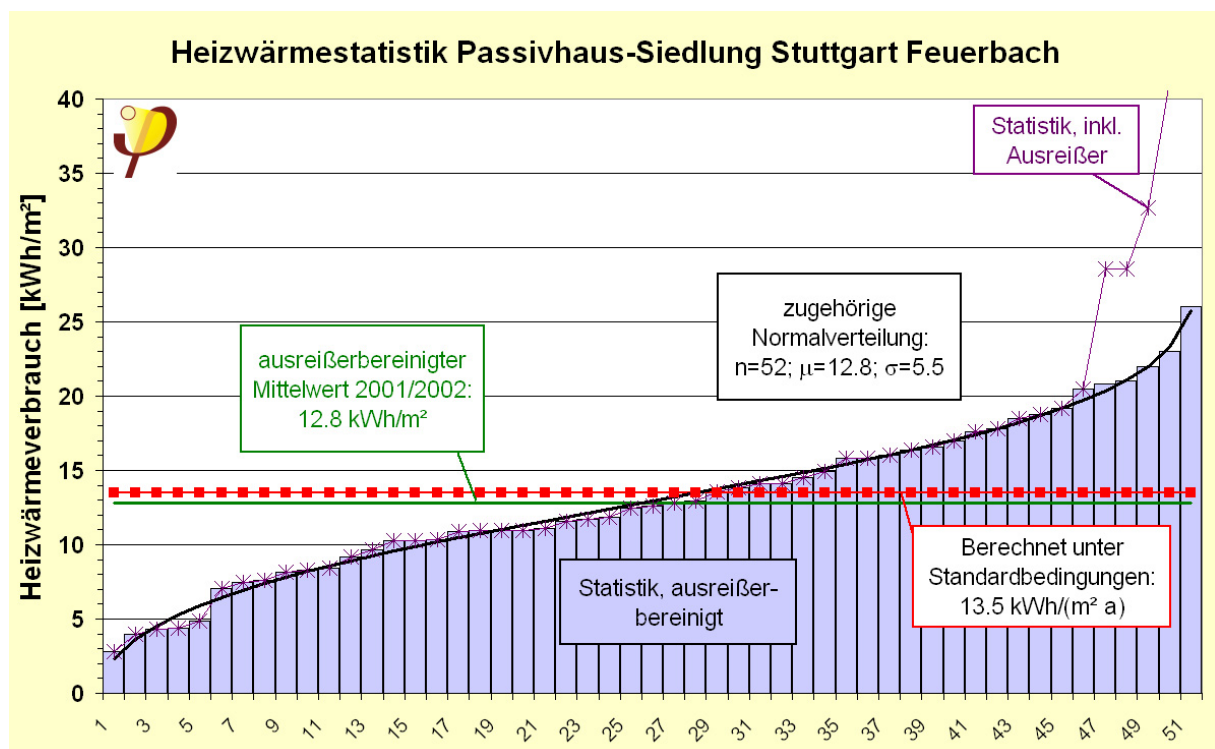


Abbildung 6: Statistik der gemessenen Heizwärmeverbrauchswerte in 52 Häusern der Passivhaus-Siedlung Stuttgart Feuerbach [Reiß/Erhorn 2003] (*-Symbol). Die Säulengrafik wurde um die fünf Ausreißer korrigiert [Feist 2004]. Die durchgezogene Linie kennzeichnet die zugehörige Normalverteilung.

Auch für diese Siedlung gilt, dass bei der Messung des Verbrauches für die Heizung ein evtl. vorhandener Wärmeübergabeverlust *mitgemessen wird*. Das bedeutet, dass in den Messwerten nach Abbildung 6 evtl. Verluste der Wärmeübergabe bereits enthalten sind. Das zeigt jedoch eindeutig, dass die in der Praxis auftretenden Wärmeübergabeverluste auch in dieser Siedlung nur unbedeutend von 0 abweichen können.

5 Übersicht über die Verbrauchsstatistik: BESTAND, NEH und PASSIVHÄUSER im Vergleich

In Abbildung 7 ist der Vergleich der zuvor einzeln behandelten Verbrauchsstatistiken für Gruppen jeweils baugleicher Reiheneinheiten dargestellt:

- links die 98 Altbauten der Belgiersiedlung mit durchschnittlich 158 kWh/(m²a);
- in der Mitte 41 Niedrigenergiehäuser Niedernhausen, Durchschnitt 66 kWh/(m²a);
- rechts die drei Passivhaussiedlungen (zusammen 106 WE) mit 13 kWh/(m²a).

Die Einsparung im Heizwärmeverbrauch (inkl. evtl. Wärmeübergabeverluste) vom Altbau zum Passivhaus beträgt daher mehr als 90%; diese Einsparung ist statistisch gesichert (89% < Einsparung < 94%). Die erzielten Heizwärmeeinsparungen entsprechen den Erwartungen nach den Berechnungen mit PHPP oder übertreffen diese sogar geringfügig. Zusätzliche sog. „Wärmeübergabeverluste“ oder „Fensterlüftungsverluste“ erweisen sich nach dieser Überprüfung durch statistisch signifikante Feldmessungen in Passivhäusern als im Rahmen der Messgenauigkeit vernachlässigbar.

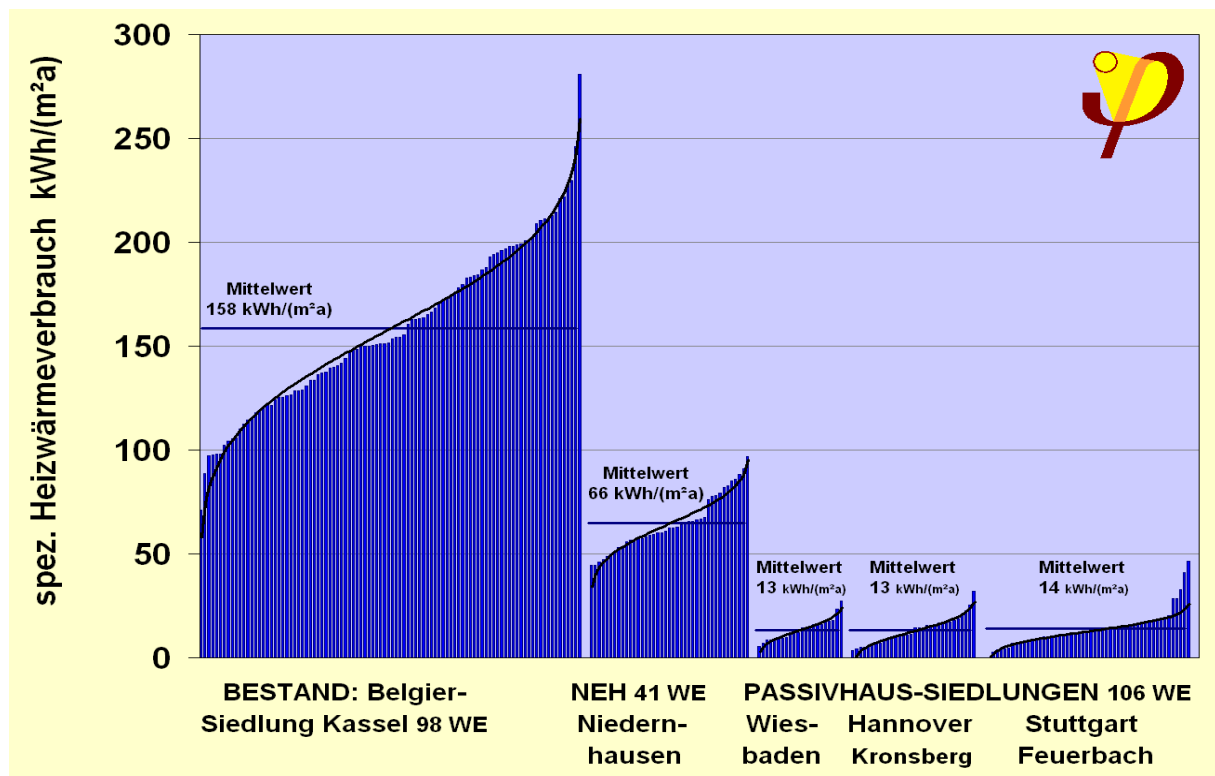


Abbildung 7: Vergleich der Verbrauchsstatistik für Gruppen jeweils baugleicher Reiheneinheiten; links: 98 Altbauten; in der Mitte 41 Niedrigenergiehäuser in Niedernhausen; rechts drei Passivhaussiedlungen mit insgesamt 106 Wohneinheiten. Die Verbrauchsmittelwerte betragen: 158 kWh/(m²a) bei den Altbauten, 66 kWh/(m²a) für die Niedrigenergiehäuser, und etwa 13 kWh/(m²a) für die Passivhäuser.

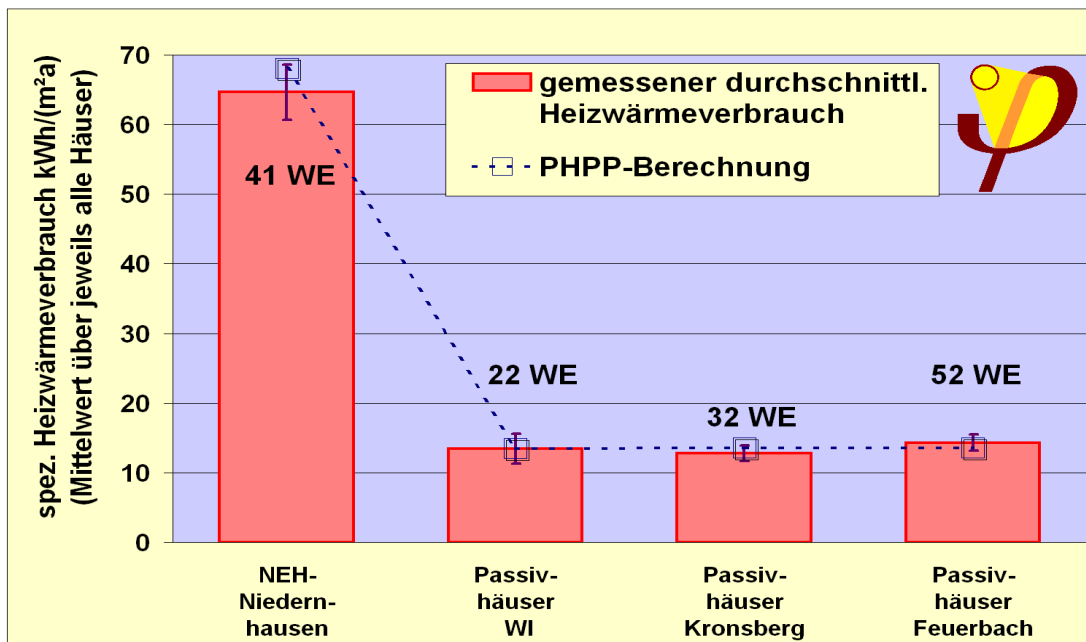


Abbildung 8: Vergleich der gemessenen Verbrauchsmittelwerte mit den Berechnungen des Jahresheizwärmebedarfs (Monatsverfahren [PHPP]) der Niedrigenergie- und Passivhaus­siedlungen mit Angabe der statistischen Fehlergrenzen.

	mittlere Wohnfläche je WE	Zahl WE	Messwert Heizwärmeverbrauch Mittelwert	Std-Abw. innerhalb der Stichprobe	Rechenwert Heizwärmebedarf PHPP	spez. Wärmeverlust (Rechenwert)	Std-Abw. zu Wärmeverlust	Standard-Abw. des Mittelwertes					
									μ	σ	q_h	q_v+q_T	$\sigma/(Q_v+Q_T)$
									kWh/(m²a)	kWh/(m²a)	kWh/(m²a)	kWh/(m²a)	%
	m²												
Belgiersiedlung (Altbau)	112,0	98	158,5	39,2	n. b.	n. b.		4,0					
NEH-Niedernhausen	136,0	41	64,7	13,6	68,0	90,0	15,1%	2,1					
Passiv-Häuser WI	104,3	22	13,4	5,3	13,4	38,0	14,1%	1,1					
Passiv-häuser Kronsberg	111,8	32	12,8	6,6	13,5	35,1	18,8%	1,2					
Passiv-Häuser S Feuerbach	120,8	52	14,3	5,5	13,5	37,0	14,9%	0,8					

6 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Zur Projektierung energieeffizienter Gebäude bedarf es zuverlässiger und in der Praxis bewährter Methoden. Das Vertrauen in die Planungsmethoden muss sich in der Baupraxis erweisen.

Methodisch stellt sich durch die in diesem Artikel vorgestellten Messergebnisse erschwerend heraus, dass die nutzungsbedingte Streuung gerade des Heizwärmeverbrauchs sehr groß ist. Diese Streuung lässt sich jedoch in statistisch ausreichend großen Stichproben „herausmitteln“, da die Messergebnisse (von Ausreißern abgesehen) in guter Näherung normalverteilt sind. Soll eine Genauigkeit von etwa 10% bei der Verbrauchserhebung erreicht werden, so ist eine Mindestzahl von etwa 20 bau- und anlagengleichen Wohneinheiten erforderlich. Das illustriert zugleich, warum die Wirkung einzelner „Spartechniken“ in Feldversuchen oft nicht überzeugend nachweisbar ist.

Durch umfassende Messkampagnen in einer hinreichend großen Stichprobe aus dem inzwischen über 10.000 Wohneinheiten zählenden Passivhaus-Standard wurden drei voneinander unabhängige Stichproben des Wärmeverbrauchs durch drei unterschiedliche Institute erhoben. Diese Daten sind in den zitierten Einzelberichten publiziert.

Die Messergebnisse aller drei untersuchten Passiv-Reihenhaussiedlungen wurden in diesem Artikel zusammengestellt. Sie betragen für den mittleren Heizwärmeverbrauch inkl. Wärmeübergabeverluste und inkl. evtl. Fensterlüftung 12,8 sowie 13,4 und 14,3 kWh/(m²a) (Wohnfläche). Dabei handelt es sich um im Vergleich zu üblichen Verbrauchswerten im Bestand (um 160 kWh/(m²a)) und selbst gegenüber durchschnittlichen Neubauten (um 80 kWh/(m²a)) um extrem niedrige Verbrauchswerte. Auf Grund der Größe der Stichprobe ist der verbleibende statistische Fehler des Mittelwertes mit um 1 kWh/(m²a) sehr gering.

Der Vergleich mit Messdaten aus Reihenhäusern im Baubestand ergibt damit eine statistisch gesicherte Heizwärmeeinsparung durch den Passivhausstandard von über 90%. Diese Einsparung kann streng genommen nicht im Einzelnen den Maßnahmen Wärmedämmung, Dreischeiben-Verglasungen und Wärmerückgewinnung zugeordnet werden. Würde jedoch nur eine dieser drei entscheidenden Maßnahmen deutlich schlechtere Ergebnisse bewirken als projiziert, so wäre die verbrauchssteigernde Wirkung so groß, dass kein denkbarer verbrauchsmindernder Effekt in der Lage wäre, dies zu kompensieren. Das Ergebnis

belegt damit gleichzeitig, dass die genannten Maßnahmen in der Summe die erwartete Wirkung entfalten.

Die in der Überschrift dieses Artikels ausgesprochene Hypothese, dass Verbrauchsmesswerte höher seien als die zuvor berechneten Bedarfswerte, *trifft für die hier behandelten Projekte nicht zu*: Vielmehr ergibt sich eine sehr gute Übereinstimmung zwischen den nach dem Monatsbilanzverfahren der Europäischen Norm EN 832 (bzw. ISO 13 790) berechneten Jahresheizwärmebedarfswerten und den Messergebnissen. Dies ist eine gute Voraussetzung für die Umsetzung energieeffizienter Gebäude, da die Handhabung dieses Rechenverfahrens einfach und transparent ist.

Der Artikel leitet aus diesen Ergebnissen darüber hinaus her, dass es im Rahmen der statistisch gesicherten Genauigkeit keine bedeutenden über die Bilanz nach EN 832 hinausgehenden Zusatzwärmeverluste, insbesondere keine hohen Zusatz-Fensterlüftungsverluste sowie Zusatz-Wärmeübergabeverluste gibt. Zusatzverluste durch diese Terme sind jedoch im bisher eingeführten Rechengang nach DIN 4108/Teil 6 und DIN 4701/Teil 10 enthalten. Hier bedarf es dringend einer Korrektur, zumal die bestehenden Rechenvorgaben die Weiterentwicklung beim energieeffizienten Bauen behindern.

Nicht verwunderlich ist es hingegen, dass unvollständige Berechnungen (die z.B. Wärmebrücken nicht berücksichtigen oder mit 19 °C Innentemperatur bzw. mit zu hohen inneren Wärmequellen oder mit zu optimistischen Annahmen bzgl. der Verschattung arbeiten) den tatsächlichen Bedarf oft signifikant unterschätzen. Sind die Abweichungen zu Messwerten größer als die durch die Statistik vorgegebenen Fehlergrenzen, so empfiehlt sich eine sorgfältige Fehlersuche – sowohl kann der Rechengang falsch sein, als auch können Ausführungsabweichungen von der Planung vorliegen. Nach Kontrolle von mehr als Tausend Bauprojekten im Laufe der Zertifizierung zeigt die Erfahrung des Autors, dass eine unabhängige Durchsicht der Projektierung (Vier-Augen-Prinzip) immer zu empfehlen ist – ebenso wie eine verantwortungsbewusste Bauleitung.

Vor allem zeigen diese und weitere Messergebnisse aus anderen Passivhaus-Projekten, dass der Passivhaus-Standard beim Neubau reproduzierbar sehr geringe Heizwärmeverbrauchswerte erreicht. Die zur Verfügung stehenden Planungstools haben sich ausgezeichnet bewährt. Die für den Bau benötigten Materialien, Dämmverfahren, Abdichtungshilfsmittel, Verglasungen, Fenster und gebäudetechnischen Komponenten stehen am europäischen Markt in Breite zur Verfügung. Der Passivhaus-Standard ist daher heute Stand der Technik beim energiesparenden Bauen. Und er kann eine bedeutende Rolle beim Klimaschutz spielen.

Quellangaben:

- [AkkP 9] **Nutzerverhalten**, Protokollband Nr. 9 des Arbeitskreises kostengünstige Passivhäuser Phase II; Passivhaus Institut; Darmstadt 1997.
- [AkkP 21] **Architekturbeispiele: Wohngebäude**, Protokollband Nr. 21 des Arbeitskreises kostengünstige Passivhäuser Phase III; Passivhaus Institut; Darmstadt 2002.
- [AkkP 28] **Wärmeübergabe- und Verteilverluste**, Protokollband Nr. 28 des Arbeitskreises kostengünstige Passivhäuser Phase III; Passivhaus Institut; Darmstadt 2004.
- [Bach 1988] Bach, H.; Diemer, R.: **Energieeinsparung und Schadstoffreduzierung durch Erneuerung von öl- und gasbefeueten Wärmeerzeugern in 51 Wohngebäuden**, IKE-Bericht 7-11, Stuttgart 1988.
- [Dipper 2001] Dipper, J.: **MELISSA, Methode zur Berechnung und Bewertung des Energieaufwandes von Einzelheizgeräten mit gekoppelter Betriebssimulation von Gebäude und Anlage**, Universität Stuttgart IKE / LHR; 2001.
- [Ebel 2003] Ebel, W.; Großklos, M.; Knissel, J.; Loga, T. und Müller, K.: **Wohnen in Passiv- und Niedrigenergiehäusern – Eine vergleichende Analyse der Nutzungsfaktoren am Beispiel der „Gartenhofsiedlung Lummerlund“ in Wiesbaden-Dotzheim**, Endbericht / Energie; Institut Wohnen und Umwelt; Darmstadt 2003.
- [ebök 2000] Zertifizierungsunterlagen zur Passivhaussiedlung Stuttgart Feuerbach, unveröffentlichte Planungsunterlage
- [EN 832] Europäische Norm: **Wärmetechnisches Verhalten von Gebäuden – Berechnung des Heizenergiebedarfs – Wohngebäude**, Europäisches Komitee für Normung; Brüssel 1998.

- [Feist/Peper 2001] Feist, W.; Peper, S.; Görg, M. und von Oesen, M.: **Klimaneutrale Passivhaussiedlung Hannover-Kronsberg**, CEPHEUS-Projektinformation Nr. 18; PHI-2001/5; Passivhaus Institut; Darmstadt 2001.
- [Feist 2001] Feist, W.: **Wissenschaftliche Auswertung von Messungen in Passivhäusern/Niedrigenergiehäusern der „Gartenhofsiedlung Lummerlund“**, Institut Wohnen und Umwelt, Darmstadt, 2001.
- [Feist 2004] Feist, W.: **Einführung: Passivhaus – Gebäudetechnik mit Wärmepumpen**, im Protokollband Nr. 26 des Arbeitskreises kostengünstige Passivhäuser Phase III, Passivhaus Institut, Darmstadt 2004.
- [Feist/Loga/ Großklos 2000] Feist, W.; Loga, T. und Großklos, M.: **Durch Messungen bestätigt – Jahresheizenergieverbrauch bei 22 Passivhäusern in Wiesbaden unter 15 kWh/m² Wohnfläche**, in BundesBauBlatt, 3/2000, S. 23-27.
- [Fichtner 1993] Fichtner Development Engineering: **Praxisbezogene Untersuchung zu Energiebedarf und Emissionen verschiedener Heizsysteme im Wohnungsbau**, März 1993.
- [Loga 1997] Loga, Tobias; Müller, Kornelia; Menje, Horst: **Die Niedrigenergiesiedlung Distelweg in Niedernhausen**, Ergebnisse des Messprogramms, 1. Auflage, Institut Wohnen und Umwelt, 1997.
- [Peper/Feist 2001] Peper, S.; Feist, W.; Kah, O.: **Messtechnische Untersuchung und Auswertung – Klimaneutrale Passivhaussiedlung Hannover-Kronsberg**, PHI, Hannover 2001.
- [Peper/Feist 2002] Peper, S. und Feist, W.: **Klimaneutrale Passivhaussiedlung Hannover-Kronsberg; Analyse im dritten Betriebsjahr**, Stadtwerke Hannover, Juli 2002.
- [PHPP] Feist, W.; Pfluger, R.; Kaufmann, B.; Schnieders, J.; Kah, O.: **Passivhaus Projektierungs Paket 2004**, Anforderungen an qualitätsgeprüfte Passivhäuser , Passivhaus Institut Darmstadt, 2004.
- [Reiß/Erhorn 2003] Reiß, Johann und Erhorn, Hans: **Messtechnische Validierung des Energiekonzeptes einer großtechnisch umgesetzten Passivhausentwicklung in Stuttgart-Feuerbach**, IBP-Bericht WB 117/2003, Fraunhofer-Institut für Bauphysik, Stuttgart 2003.

- [Schnieders/
Feist 2001] Schnieders, J.; Feist, W.; Kah, O. et al.: **CEPHEUS Wissenschaftliche Begleitung und Auswertung. Endbericht;** CEPHEUS-Projektinformation Nr. 22. Passivhaus Institut. Darmstadt, Juli 2001.
- [Schnieders/
Such 1998] Schnieders, J.; Such, M.: **Untersuchungen der Luftdichtheit in der Niedrigenergie- und Passivhaussiedlung Lummerlund in Wiesbaden-Dotzheim,** Passivhaus Institut, Darmstadt 1998.