Der Beitrag erneuerbarer Energien im Passivhaus – Analysemethodik und Ergebnisse

Karsten Voss, Fraunhofer ISE, Freiburg, Deutschland, E-Mail: kavoss@ise.fhg.de
Maria Wall, Universität Lund, Schweden, E-Mail: maria.wall@ebd.lth.se
Robert Hastings, AEU GmbH, Wallisellen, Schweiz, E-Mail: robert.hastings@aeu.ch

1 Einführung

Seit April 2000 besteht die Arbeitsgruppe „Sustainable Solar Housing“ innerhalb der Internationalen Energieagentur IEA (www.iea-shc.org/task28/, [1]). Wesentlicher Arbeitspunkt war bisher die Analyse von bereits bestehenden Demonstrationsprojekten hinsichtlich der in der Praxis erreichten Energiekennwerte [2] und ein Vergleich dieser Ergebnisse mit den jeweils aktuellen nationalen Vorschriften [3]. Zielsetzung ist die Definition von Grenzwerten für den Primärenergiebezug von sogenannten „High-Performance-Houses” (HPH). Die integrale Betrachtung von Wärmebedarfs- (Gebäude, Warmwasser) und Versorgungsseite (Haustechnik) geht konform mit der deutschen Energieeinsparverordnung (EnEV) und der neuen EU-Richtlinie zur Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden [4].

2 High Performance Housing – Eine Zieldefinition

2.1 Standards und Zielwerte für Europa

Aufgrund der positiven Erfahrungen mit Passivhäusern in Europa [5] basieren die energetischen Zielwerte wesentlich darauf, dass sich vor allem der Heizwärmebedarf zu vertretbaren Mehrkosten mit heute verfügbaren Maßnahmen um den Faktor 4 gegenüber dem gesetzlichen Standard senken lässt. Dazu wurde zunächst die nationale Normung in 12 Ländern betrachtet (Status 2001) und eine Gruppierung in drei europäische Klimazonen vorgenommen. Abb. 1 zeigt den berechneten Heizwärme- und Primärenergiebedarf der dazu definierten Referenzgebäude. Auffällig ist die Tatsache, dass aufgrund der geringeren normativen Anforderungen in wärmeren Regionen ein leichter Anstieg von Heiz- und Primärenergiebedarf von Nord- nach Südeuropa zu verzeichnen ist. Während die Referenzgebäude einen Heizwärmebedarf von 56 bis 102 kWh/(m²a) (Mittel: 69 kWh/(m²a)) aufweisen, ist damit bereits ein Primärenergiebezug in Höhe von 123 bis 169 (Mittel 138 $kWh_p/(m^2a)$) verbunden. Auf der Ebene der Primärenergie sind die Warmwasserbereitung (40 l pro Person und Tag) und der Hilfsstrombezug (5 kWh/(m²a)) eingeschlossen. Die europaweit zu Grunde gelegten Primärenergiefaktoren für Netzstrom sind 2,71 kWh_p/kWh (Gemis, Version 4.0) und 1,1 kWh_p/kWh bei der Verbrennung von fossilen Brennstoffen.

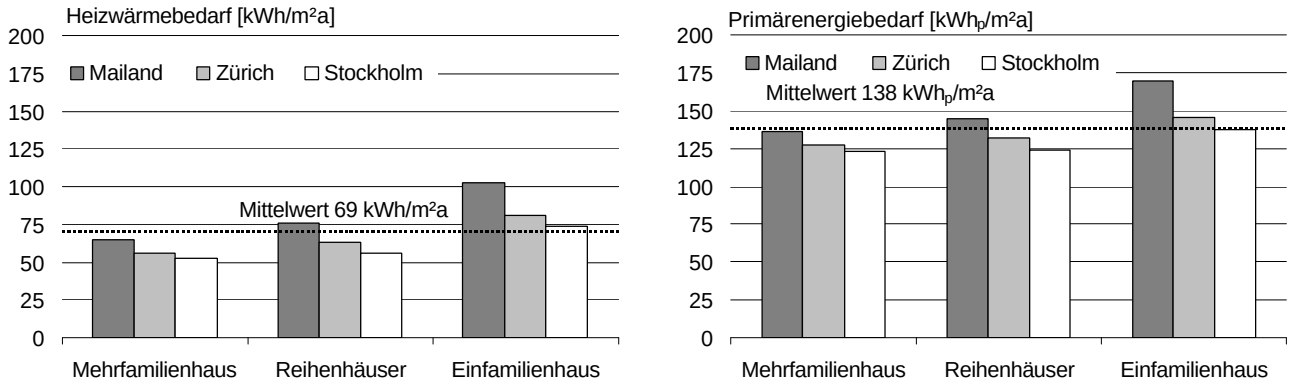

Abb. 1: Berechnete Werte für den Heizwärmebedarf (links) und die Primärenergiekennzahl Heizung/Lüftung/Warmwasser (rechts) für die Referenzgebäude in drei europäischen Klimazonen. Für die Ermittlung des Primärenergiebezugs liegt eine Gaszentralheizung mit kombinierter Warmwassererwärmung zu Grunde. Erzeugungs-, Speicher- und Verteilverluste sind pauschalisiert berücksichtigt.

Die Gegenüberstellung von Heizwärmebedarf einerseits und Primärenergieeinsatz andererseits zeigt bereits bei den Referenzgebäuden die hohe Bedeutung von Warmwasserbereitung, Hilfsstrombezug und Systemverlusten. Der Primärenergiebedarf ist im Mittel doppelt so hoch wie der Heizwärmebedarf. Diese Tendenz verstärkt sich bei weiterer Absenkung des Heizwärmebedarfs. Als Konsequenz daraus, wurde erstrangig ein Primärenergiezielwert definiert und nicht ein Wärmebedarfsziel. Dieser Zielwert ergibt sich aus einer Reduktion des Heizwärmebedarfs um den Faktor 4 und Einsatz einer Solaranlage mit 50% Deckungsbeitrag zur Wassererwärmung. Abb. 2 verdeutlicht dieses Szenario in Analogie zu Abb. 1. Der mittlere Heizwärmebedarf liegt bei 17 kWh/(m²a), der Primärenergiebedarf bei 58 kWh_p/(m²a). Das Verhältnis beträgt 1:3,4. Als Zielwert wurde daraufhin einheitlich für alle Gebäudetypen und Klimazonen ein Primärenergiebezug von weniger als 60 kWh_p/(m²a) vereinbart [6]. Dieser Zielwert entspricht demjenigen im Passivhaus-Projektierungspaket (PHPP, Haushaltsstromverbrauch ausgeschlossen [7]).

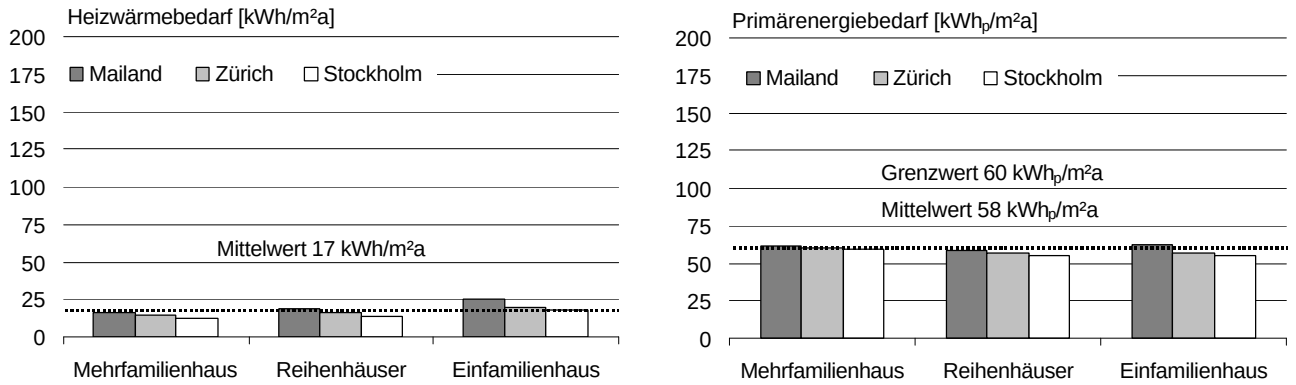

Abb. 2: Berechnete Werte für den Heizwärmebedarf (links) und die Primärenergiekennzahl Heizung/Lüftung/Warmwasser (rechts) für „High Performance Housing". Die Zielwerte des Heizwärmebedarfs bedeuten eine Reduktion um den Faktor 4 gegenüber dem gesetzlichen Standard in 2001 (Abb. 1, links), eine Solaranlage deckt 50% des Wärmebedarfs der Trinkwassererwärmung.

Auf der Basis der Analyse von Demonstrationsprojekten wurden im Wesentlichen zwei Strategien identifiziert, mit denen die Zielsetzung „High Performance Housing“ erreicht werden kann und in der praktischen Umsetzung die Anpassung an die sehr inhomogene europäische Marktsituation gelingt.

Strategie 1: Reduktion des Wärmebedarfs der Raumheizung auf ein Niveau, bei dem ohne Einsatz erneuerbarer Energien oder Kraft-Wärmekopplung (KWK) zur Wärmeversorgung der Primärenergiezielwert erreicht wird. Praktisch sind die Anforderungen deckungsgleich mit denen an ein Passivhaus.

Strategie 2: Teilweise dezentrale oder zentrale (Nahwärme aus erneuerbarer Energie oder mit KWK) Deckung des Wärmebedarfs durch Einsatz von erneuerbarer Energie und/oder KWK. Unter Beibehaltung des Primärenergiegrenzwertes ergibt sich ein größerer Spielraum auf der Wärmebedarfsseite, so dass auch Häuser mit etwas höherem Heizwärmebedarf als ein Passivhaus das Ziel erreichen können.

2.2 Ergebnisse von Demonstrationsprojekten in Deutschland

Im Rahmen der IEA Arbeit fand im Oktober 2002 ein Arbeitstreffen am Fraunhofer ISE statt, bei dem Erfahrungen und Ergebnisse aus Monitoringprojekten vorgestellt und diskutiert wurden. Obwohl die Ergebnisse unter unterschiedlichen Randbedingungen in Bezug auf das jeweilige Standortklima (Heizgradtage zwischen 2.600 und 2.900 Kd, 19/12°C, im Vergleich zu 3.300 Kd, DIN 4108), die Personenbelegung (30 bis 45 m² pro Person) und den Haushaltstromverbrauch (600 bis 1.700 kWh pro Person) zu Stande kamen, zeigt eine grobe Querschnittsauswertung, dass der Primärenergiebezug mehrheitlich unterhalb des 60 kWh Primärenergiegrenzwertes liegt, teilweise weit darunter, Abb. 3. Einige Gebäude profitieren von einer Nahwärme mit zentraler Kraftwärmekopplung (Primärenergiefaktor 0,7 kWh_p/kWh) oder dezentraler KWK im Gebäude (Primärenergiegutschrift entsprechend eingespeistem Strom).

Mit der EnEV sind in Deutschland seit 2002 Höchstwerte für den rechnerischen Primärenergiebedarf abhängig vom Formfaktor und der Gebäudenutzfläche festgelegt. Dieses Anforderungsniveau ist in Abb. 3 eingetragen, wobei als Flächenbezug auf die real vorhandene Wohnfläche umgerechnet wurde. Der Vergleich mit den Verbrauchswerten zeigt, dass die Verbräuche um den Faktor 3 bis 4 geringer ausfallen als die gesetzlichen Vorgaben. Verbrauchswerte zwischen 30 und 40 kWh_p/m^2 sind heute schon Stand bei innovativen Bauprojekten. Pro Person sind dies im Mittel 1.700 kWh, wobei die Spanne von 800 bis 2.900 kWh reicht, Abb. 4.

Bisher wurde anlog der Methodik in der EnEV lediglich die Wärmeversorgung eines Gebäudes in die Bilanz einbezogen. Werden für die Netzeinspeisung von Solarstromanlagen (kein Bestandteil der Wärmeversorgung !) ähnliche Gutschriften wie für hauseigene KWK angesetzt, verbessert sich die Bilanz weiter (siehe Kap. 4, [8]).

Passivhaus	o			o	o	o	o	o	o	o	o		
Wärmerückgew.	o		o	o	o	o	o	o	o	o	o		
fossile Brennst.	o		o									o	o
Nah-/Fernwärme		o					o	o	o				
Wärmepumpen				o	o	o				o	o		
Solarkollektoren	o	o	o	o	o	o						o	o
BHKW	o												
Solarstrom	o		o						o			o	o

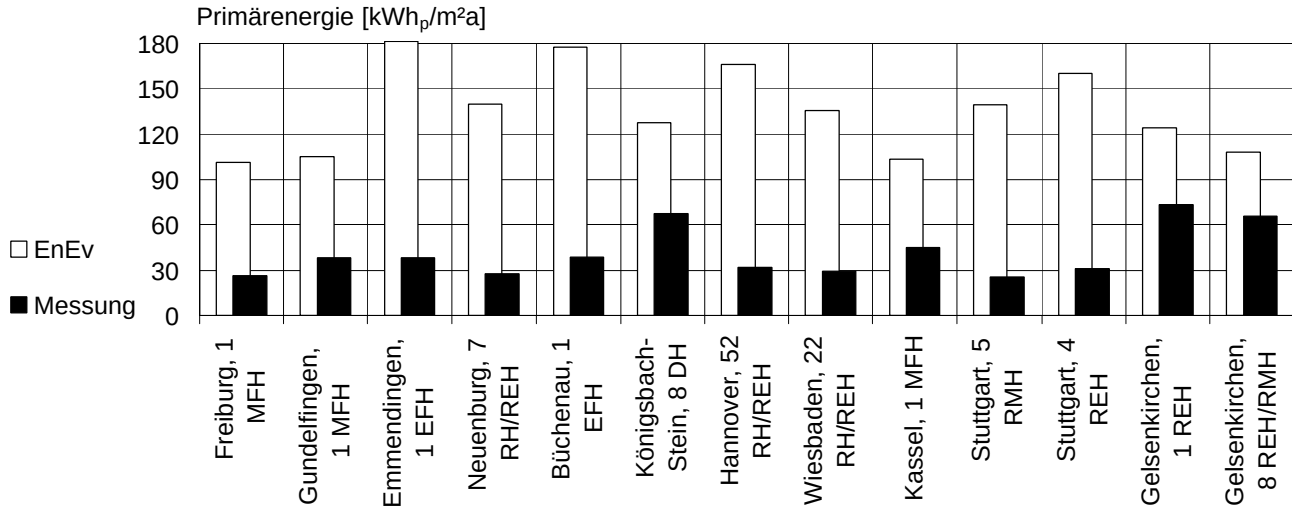

Abb. 3: Primärenergiekennzahlen auf der Basis von Messergebnissen im Vergleich zum Anforderungsniveau der Energieeinsparverordnung 2002 (EnEV) für 13 Projekte bzw. 150 Wohneinheiten. Sämtliche Werte sind auf die <u>beheizte Wohnfläche</u> bezogen. Haushaltsstromverbrauch bleibt unberücksichtigt. Der jeweils gemessene Endenergieverbrauch wurde mit den Primärenergiefaktoren gemäß DIN 4701, Teil 10 (Tabelle C4-1) umgerechnet: Netzstrom 3,0 kWh$_p$/kWh, fossile Brennstoffe 1,1 kWh$_p$/kWh, Fernwärme 0,7 kWh$_p$/kWh. Legende: EFH-Einfamilienhaus, DH-Doppelhaus, RH-Reihenhaus, REH-Reihenendhaus, MFH-Mehrfamilienhaus. Datenquelle: siehe Danksagung am Ende des Beitrags

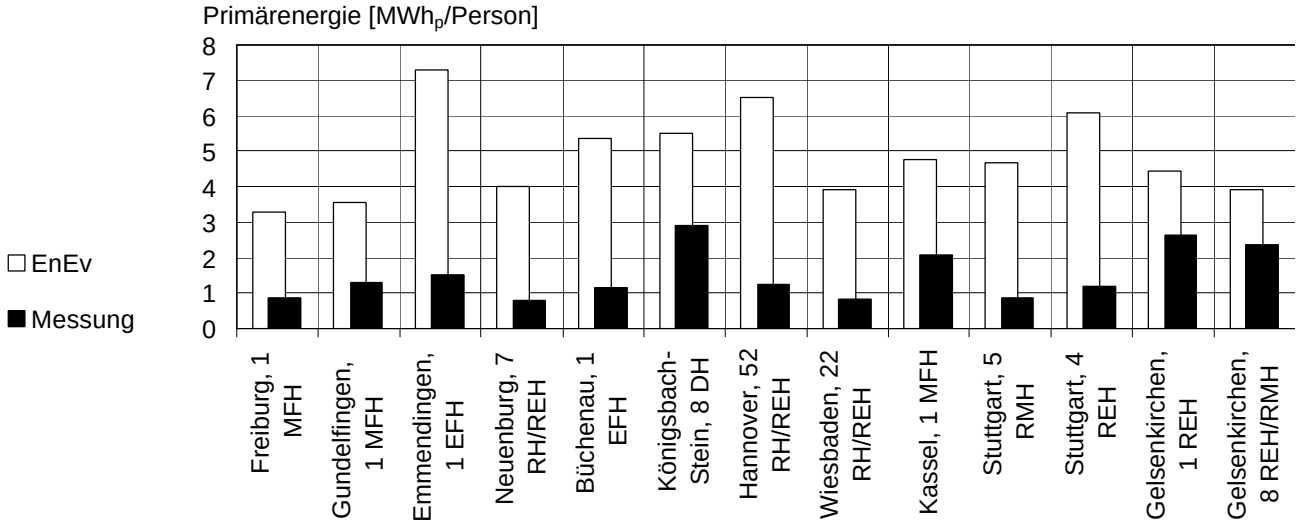

Abb. 4: Primärenergiekennzahlen analog Abb. 3, bezogen auf den Verbrauch <u>pro Person</u>.

3 Passive Solarenergienutzung

Entsprechend der stationären Wärmebilanzgleichung (Gl. 1) wird der Heizwärmeverbrauch eines Gebäudes ohne innere Wärmequellen Q_I und Solarbeiträge Q_S allein durch die proportional zur Temperaturdifferenz zwischen (annähernd konstanter) Raumtemperatur T_I und Außentemperatur T_A wachsenden Verluste über Transmission Q_T und Lüftung Q_V bestimmt. Proportionalitätsfaktor ist der summarische Wärmeverlustkoeffizient H:

$$Q_H = (Q_T + Q_V) - \eta \cdot (Q_I + Q_S) = H \cdot (T_I - T_A) - \eta \cdot (Q_I + Q_S) \qquad \text{Gl. 1}$$

Nachfolgend wird eine Erweiterung der bekannten Darstellung von Heizkennlinien (Tagesmittel der Heizleistung als Funktion der Außentemperatur, [5]) auf die Abbildung des Solarstrahlungseinflusses vorgenommen. Dazu werden die gemessenen Heizleistungen drei Solarstrahlungsklassen zugeordnet, Abb. 5.

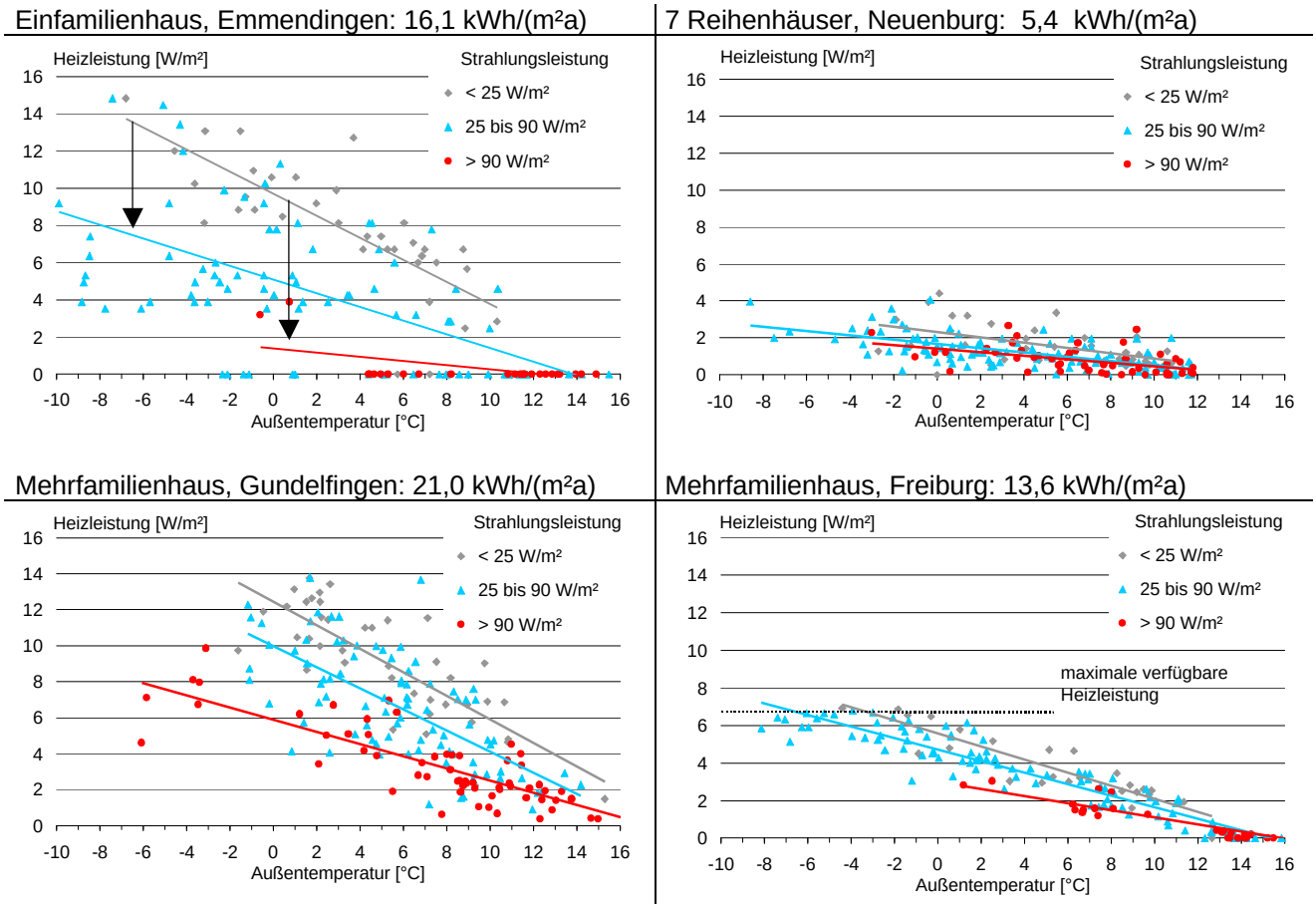

Abb. 5: Heizkennfelder von einem Einfamilien- und 7 Reihenhäusern (oben) sowie zwei Mehrfamilienhäusern (unten). Die beiden rechten Diagramme beziehen sich auf Passivhäuser, die Diagramme links auf Gebäude mit etwas höherem Heizwärmeverbrauch. Der jeweils gemessene Jahresheizwärmeverbrauch ist in der Kopfzeile angegeben.

Die Klassifizierung erfolgte derart, dass 25% der Messwerte innerhalb der Heizzeit (Außenlufttemperatur < 12 °C) jeweils in die niedrigste und höchste Strahlungsklasse fallen, während 50% der mittleren Klasse zugeordnet werden (Standort Freiburg). Gebäude mit

intensiver passiver Solarenergienutzung (Emmendingen, Gundelfingen) treten dadurch hervor, dass die Heizkennlinien eine starke Streuung der Messwerte durch die entsprechend variierende Solarstrahlung erklärt werden kann (deutliche Änderung der Steigung der Ausgleichsgeraden). Demgegenüber zeigen Gebäude ohne ausgeprägte passive Solarenergienutzung (Freiburg, Neuenburg) einen quasi linearen Anstieg der Heizleistung mit der Außentemperatur. Die Unterschiede lassen sich durch Größe, Rahmenanteil, Glasart (g-Wert) und Ausrichtung der Fensterflächen erklären. Geeigneter Parameter ist in Analogie zu Solarkollektoren die effektive Aperturfläche [2]. Um den Einfluss der Gebäudespeichermasse in guter Näherung abzubilden ist es vorteilhaft, die Tagesmittelwerte jeweils im Zeitfenster 8 Uhr bis 8 Uhr des Folgetages zu bilden. In Erweiterung der grafischen Auswertung ist auf Basis von Abb. 5 eine quantitative Ermittlung der genutzten Solargewinne möglich.

4 Energieversorgung über erneuerbare Energie

Weiterer Ansatz zur Minderung des Primärenergieeinsatzes sind versorgungstechnische Anlagen zur Nutzung erneuerbarer Energie. Energieträgern, die keinerlei CO_2-Emissionen verursachen (z.B. Solarenergie), wird verbrauchsseitig auch kein Primärenergieäquivalent zugeordnet. Um ihren Einfluss auf die Primärenergiebilanz eines Gebäudes aufzuzeigen, ist in der Praxis des Gebäudemonitorings eine Ausstattung mit zusätzlichen Strom- und Wärmemengenzählern erforderlich. Eine kontinuierliche Datenerfassung auf elektronischem Wege ist zweckmäßig; regelmäßiges Ablesen ist jedoch für die energetische Bilanzierung ausreichend, so dass das Ziel auch mit geringem Budget erreicht werden kann [9]. Abb. 6 zeigt die auf der Basis von Messdaten erstellten Jahresenergieflussdiagramme der bereits mit Abb. 5 diskutierten Gebäude. Die Versorgungstechnik (grau hinterlegtes Feld) bewirkt eine mehr oder weniger verlustbehaftete (nach unten) Umwandlung der zugeführten Energieströme (Endenergie von links, erneuerbare Energie bzw. Abwärme von oben) in die Nutzwärme (nach rechts). Strom- und Wärmepfade wurden getrennt. Sämtliche Gebäude besitzen solarthermische Anlagen. Je nach Größe erreichen diese Anlagen Jahresarbeitszahlen (Bruttowärmeertrag je kWh Stromverbrauch für Pumpen und Regelung) zwischen 27 (Kleinanlagen) und 85 kWh_{th}/kWh_{el} (Großanlagen). Für die untersuchten Lüftungsanlagen mit Wärmerückgewinnung (WRG) liegen diese Zahlen zwischen 7 und 10 kWh_{th}/kWh_{el}; setzt man den Stromverbrauch einer guten Abluftanlage als lufthygienisch notwendige Mindestausstattung voraus (Leistungsaufnahme 0,25 $W/(m^3/h)$), steigen die Jahresarbeitszahlen der WRG auf 26 bis 40. Sowohl bei der WRG als auch bei Kollektoranlagen ist zu beachten, dass der Bruttowärmeertrag nur über Gebäude- und Anlagensimulationsrechnungen in eine Primärenergieeinsparung umgerechnet werden kann. Entwicklungsziel sollte aber in jedem Fall eine hohe Jahresarbeitszahl sein. Verbesserungspotential liegt in einem noch geringeren Stromverbrauch.

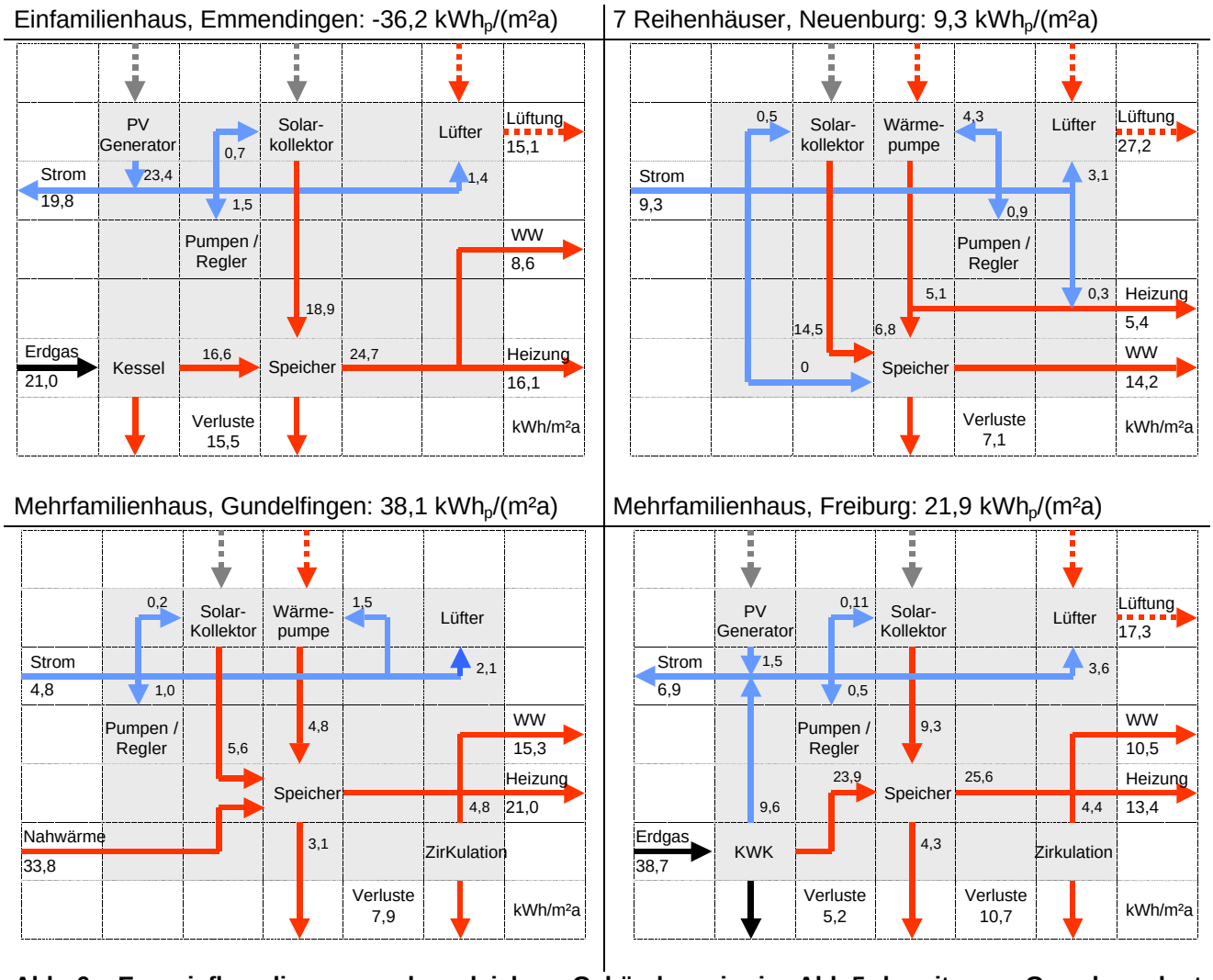

Abb. 6: Energieflussdiagramm der gleichen Gebäude, wie in Abb.5 bereits zu Grunde gelegt. Dargestellt ist der Weg vom Endenergiebezug (links) bis zum Wärmebezug für die Nutzung der Gebäude (rechts). Die Umrechnung der Endenergie in Primärenergie und die Berücksichtigung der Netzeinspeisung von KWK <u>und</u> PV als Primärenergiegutschriften führen zu den in der jeweiligen Kopfzeile genannten Primärenergiekennzahlen. Ein negativer Wert deutet an, dass das Primärenergieäquivalent der Netzeinspeisung den Primärenergiebezug übersteigt.

Die Detailanalyse der Energieströme gemäß Abb. 6 zeigt, dass (ohne Berücksichtigung der solaren Stromerzeugung) zwischen rund 30 % (Gundelfingen, Emmendingen) und fast 50% (Freiburg, Neuenburg) des Primärenergiebezugs der Haustechnik durch elektrische Hilfsenergie bestimmt wird. Die 3 kW_p (25 m²) Solarstromanlage des Gebäudes in Emmendingen erzeugt ein Primärenergieäquivalent, das größer ist als der Primärenergieverbrauch der gesamten Haustechnik (Gas und Strom). Der Überschuss deckt nahezu den Stromverbrauch des Haushalts („Nullemissionshaus“).

Bei den beiden Mehrfamilienhäusern entspricht der Wärmeverbrauch der Warmwasserbereitung (inkl. Zirkulation) in etwa dem Heizwärmeverbrauch; in Neuenburg ist er sogar um den Faktor 2,6 höher. Die anteilig hohe Bedeutung der Warmwasserbereitung steigert die Bedeutung solarthermischer Anlagen: Der Wärmeertrag der 4,8 m² Kollektoranlagen je Reihenhaus in Neuenburg ist 2,6 mal größer als der Bezug an Heizwärme!

5 Fazit

Verbrauchsmessungen und Berechnungen unterstreichen die Wichtigkeit einer gesamtenergetischen Betrachtung des Energiebezugs von Gebäuden. Grund dafür ist, dass der Primärenergiebezug mit sinkendem Heizwärmebedarf mehr und mehr von der Warmwasserbereitung und der elektrischen Hilfsenergie bestimmt wird. Bei Passivhäusern decken übliche Fensterflächen oft bereits ein Drittel oder mehr des Heizwärmebedarfs. Kleine solarthermische Anlagen haben ihren festen Platz beim Passivhaus; eine Vergrößerung auf hohe Deckungsraten bei der Heizung stößt nach wie vor an die Grenzen der Speichertechnik. Für netzgekoppelte Solarstromanlagen gelten diese Grenzen nicht. Die messtechnisch belegten Primärenergiekennzahlen von 30 bis 40 $kWh_p/(m^2a)$ in rund 150 Wohneinheiten setzen den Maßstab für neuartige Energieversorgungskonzepte auf der Basis von Kleinsystemen der Kraft-Wärmekopplung [10].

Danksagung

Die Autoren danken den Kolleginnen und Kollegen, die Messergebnisse von den jeweiligen Demonstrationsprojekten bereitgestellt haben: A. Bühring (Fraunhofer ISE: Passivhaus Büchenau), W. Ebel (IWU: Passivhaussiedlung Wiesbaden), B. Kaufmann (PHI: Passivhäuser in Hannover und Kassel) , C. Petersdorff (ECOFYS: Solarsiedlung Gelsenkirchen), J. Reiss (Fraunhofer IBP: Passivhaussiedlung Stuttgart-Feuerbach), Chr. Russ (Fraunhofer ISE: Passivhäuser Neuenburg).

Literatur

[1] Voss, K., Hastings, R.: ***Sustainable Solar Housing***, 6. Passivhaustagung, Tagungsband S. 97-104, Basel, 2002.

[2] Voss, K.: ***Demonstration Buildings – Design, Monitoring and Evaluation***, IEA Task 28 / Annex 38 working document, Fraunhofer ISE, 2002.

[3] Smeds, J., Wall, M., Hastings, R.: ***A comparison of Energy Regulations in 12 Countries based on IEA SHCP 28 / ECBCS 38 Reference Buildings***, working document Subtask B, Energy and Building Design, Lund University, Schweden, 2002.

[4] Hegner, D.: ***Die neue EU-Richtlinie „Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden“***, Bauphysik, Jg. 25, H. 5, S. 303-304, 2002.

[5] Feist, W., Schnieders, J., Pfluger, R.: ***Energieeffizientes Bauen in Europa***, Bauphysik Jg. 24, H.1, S. 10-24, 2002

[6] Wall, M., Hastings, R.: ***Energy Targets for Simulation of Typical Solutions for High Performance Housing***, working document IEA SHCP 28 / ECBCS 38, Energy and Building Design, Lund University, Schweden, 2002.

[7] PHPP im Internet: www.passiv.de.

[8] Voss, K., Kiefer, K., Reise, Chr., Meyer, T.: ***Building Energy Concepts with Photovoltaics – Concepts and Examples from Germany***, Advances in Solar Energy, Vol. 15, American Solar Energy Society, Boulder, USA, 2002.

[9] Monitoringbericht zum Förderprogramm „Wärmeerzeugung im Passivhaus“ der EnBW, in Internet: www.ise.fhg.de.

[10] Vetter, M., Sicre, B.: ***Sind Mini-KWK-Anlagen für das Passivhaus geeignet? Anforderungen und Potenziale***, Passivhaustagung 2003, im Tagungsband.