

Bewertung der Energieeffizienz verschiedener Maßnahmen für Gebäude mit sehr geringem Energiebedarf

1 FuE-Aufgabe und Zielsetzung

Die erfolgreiche Umsetzung von Gebäudekonzepten mit hohem thermischen Komfort und geringem Energieverbrauch, in einem realistischen Finanzierungsrahmen, erfordert einen effektiven Einsatz von Maßnahmen zur Energieeinsparung. Der Schlüssel hierzu ist eine *quantitative* Bewertung dieser Maßnahmen bezüglich ihrer Energieeffizienz. Ein Vergleich der Ausführung eines Teilaspektes durch Messungen in verschiedenen realen Gebäuden kann jedoch nicht zu einer geeigneten Bewertung führen, da die Unterschiede der Gebäude i.A. sehr komplex sind und auch das Nutzungsverhalten zu großen Variationen im Energieverbrauch führen kann. Ziel dieser Arbeit war daher die Entwicklung von Simulationen für das thermische Verhalten von Gebäuden, mit der durch Variationen von Teilaspekten unter sonst identischen Randbedingungen eine quantitative Bewertung von verschiedenen Maßnahmen zur Energieeinsparung möglich ist. Ebenso wird der Einfluss der Randbedingungen wie Lage, Wetterdaten und Benutzerprofile beurteilt. Die zur Simulations-Kalibrierung notwendigen detaillierten Messdaten sind durch das Projekt „Energetische Diagnose von Gebäuden“ bereitgestellt worden. Aus dieser Datenbank wurden zwei Niedrigenergie- und zwei Passivhäuser verschiedener Gebäudetypologien (Ein- und Mehrfamilienhäuser) ausgewählt, die sich aufgrund ihrer Energiekennzahlen für den Nachbau und für die Weiterentwicklung oder Modifikation empfehlen:



Objekt 1: Das Niedrigenergiehaus (NEH) in **Essen-Kraienbruch** ist ein dreigeschossiges Mehrfamilienhaus (MFH, 6 Wohnungen) in unterkellerner Massivbauweise (MBW) mit einer beheizten Nutzfläche von 403 m². Der berechnete flächenspezifische Heizwärmebedarf liegt bei ca. 83 kWh/(m²·a).



Objekt 2: Das Niedrigenergiehaus (NEH) in Wenden-**Hünsborn** ist ein 1½-geschossiges Einfamilienhaus (EFH) in nicht unterkellerner Leichtbauweise (LBW) mit einer beheizten Nutzfläche von 200 m². Der berechnete flächenspezifische Heizwärmebedarf liegt bei ca. 74 kWh/(m²·a).



Objekt 3: Das Passivhaus (PH) in Wenden-**Hillmicke** ist ein dreigeschossiges Mehrfamilienhaus (MFH) in Massivbauweise (MBW) mit einer beheizten Nutzfläche von 204 m². Der berechnete flächenspezifische Heizwärmebedarf liegt bei ca. 16 kWh/(m²·a) mit Baukosten in Höhe von 940 €/m² (DIN 276, Kostengruppen 300 + 400).



Objekt 4: Das Passivhaus (PH) in Lindlar-**Hohkeppel** ist ein zweigeschossiges Einfamilienhaus (EFH) in nicht unterkellerner Leichtbauweise (LBW) mit einer beheizten Nutzfläche von 163 m². Der berechnete flächenspezifische Heizwärmebedarf liegt bei ca. 15 kWh/(m²·a) mit Baukosten in Höhe von 1300 €/m² (DIN 276, Kostengruppen 300 + 400).

Für diese Häuser wurde jeweils ein thermisches Simulationsprogramm erstellt. Dazu wurde das modular aufgebaute Simulationswerkzeug TRNSYS¹ verwendet, welches an das jeweilige Gebäude individuell angepasst wurde. Die kalibrierten Computermodelle der ausgewählten Objekte ermöglichten nicht nur ein vertieftes Verständnis für das Zustandekommen der Messdaten, sondern darüber hinaus auch eine quantitative Bewertung von Variationen oder Ergänzungen in Hinblick auf den Energieverbrauch und den thermischen Komfort. Die untersuchte Gesamtheit der Parameter lässt sich gliedern in die Bereiche:

- Äußere klimatische Einflüsse.
- Thermisch relevante Designmerkmale der Gebäudehülle.
- Thermisch relevante Baustoffe und Bauelemente der Gebäudehülle.
- Technische Gebäudeausrüstung mit Einfluss auf den Gebäudestandard.
- Einflüsse des Nutzers auf den Gebäudewärmehaushalt.

Die Ergebnisse der Sensitivitätsanalysen wurden im Task 28 des IEA-SHC-Programms² mit der Bezeichnung „Solar Sustainable Housing“ eingebracht. Außerdem wurden diese durch Veröffentlichungen und Präsentationen auf Fachkonferenzen verbreitet. Eine detaillierte Darstellung der Vorgehensweise und der Ergebnisse liegt als ausführlicher Bericht vor. Die zusammengefassten Ergebnisse sind in der vorliegenden Kurzform des Endberichts im Kapitel 4 dargestellt. Sie besitzen die Form einer Rangliste, die in vier Kategorien unterteilt ist. Durch die darin enthaltenen Richtlinien werden Anwender ohne die Benutzung von eigenen Simulationswerkzeugen beim Gebäudeentwurf eine bestmögliche Optimierung bezüglich Energieverbrauch und Investitionskosten bei gleichzeitiger Sicherstellung des thermischen Komforts erreichen können.

2 Arbeitsprogramm

Unter Benutzung der vier o.g. Objekte wurden zum Erreichen des Gesamtzieles folgende Arbeiten durchgeführt:

Arbeitspaket 1 – Erstellung und Kalibrierung der Simulationsmodelle

Die Grundlage hierfür bilden die im Rahmen des Projekts „Energetischen Diagnose von Gebäuden“ gemessenen Zeitreihen. Die den Nutzereinfluss beschreibenden Größen, wie Zeiten aktiver Verschattung, erhöhte oder verminderte Lüftung, starke Personenbelegung oder Urlaubsperioden sowie Variationen der Heizungsregelung sind in diesen Daten nicht enthalten. Diese mussten daher indirekt aus den Zeitreihen und durch Befragung der Nutzer bestimmt werden. Die Methodik der Simulation ist in Grundzügen durch die zur Verfügung stehenden TRNSYS-Module und die Simulationsumgebung vorgezeichnet. Diese mussten, je nach Haustechnik, an jedes Gebäude individuell angepasst werden. Nach Vorgabe der Aufgabenstellung zielen die Ergebnisse der Simulationen auf Aspekte wie thermischer Komfort und Heizenergiebedarf. Eine Kalibrierung des Modells erfolgte daher durch einen Vergleich von geeignet gewählten Parametern in Anlehnung an diese Zielgrößen. Um eine größtmögliche Übereinstimmung von Messgrößen und Simulationsergebnissen zu erreichen, wurden die Parameter der Modelle innerhalb der physikalisch sinnvollen Bereiche variiert.

Arbeitspaket 2 – Durchführung von Sensitivitätsanalysen

Die kalibrierten Simulationsmodelle wurden dazu benutzt, Sensitivitätsanalysen hinsichtlich aller Größen durchzuführen, die den Wärmehaushalt der vier Gebäude maßgeblich beeinflussen. Die Anwendung der Simulationsumgebung TRNSYS ermöglichte eine sehr große Freiheit in der

¹ Transient System Simulation (Version 14.2). University of Wisconsin, USA.

² International Energy Agency, Solar Heating and Cooling Programme.

Auswahl der zu variierenden Größen, da das Simulationsprogramm vollständig im Quelltext vorlag und somit entsprechende Modifikationen erlaubte. Aus den Ergebnissen konnten Schlussfolgerungen wirtschaftlicher Art abgeleitet werden, da die Kalibrierung des Modells die Formulierung *quantitativer* Regeln ermöglichte.

Arbeitspaket 3 – Modellmodifikationen- und erweiterungen

Durch die große Flexibilität der verwendeten Simulationssoftware TRNSYS konnten alle wesentlichen Parameter mit Einfluss auf den Gebäudewärmehaushalt variiert und der entsprechende Einfluss auf den Gebäudewärmehaushalt quantifiziert werden. Darüber hinaus wurden die Simulationsmodelle durch Hinzunahme von Modulen wie Erdwärmetauscher und Solarkollektoren erweitert. Hier konnte das Einsparpotential dieser Komponenten quantitativ bewertet werden. Weiterhin wurde die Energieeffizienz verschiedener Gebäudekomponenten im Kontext unterschiedlicher Haustypen und Randbedingungen untersucht werden.

Arbeitspaket 4 – Aufbereitung ausgewählter Ergebnisse für den IEA-Task 28

Im Rahmen dieses Projekts wurden Beiträge zum IEA-SHC Task 28 geleistet. Diese bestehen aus der Entwicklung von Strategien zur Erreichung des Passivhausstandards für Reihenhäuser mit einfachen bzw. verbreiteten Methoden und zu vertretbaren Kosten. Die Einhaltung der energetischen Ziele wurde durch Simulationen überprüft. Die in dieser Arbeit aufgestellten Regeln zur Energie- und Kosteneffizienz unter Berücksichtigung des Komforts sind in diese Strategien eingeflossen. Die vorgeschlagenen Strategien für die beiden Klimazonen Nord- und Mitteleuropa stellen damit eine Anwendung der in dieser Studie erhaltenen Ergebnisse dar. Die Beiträge liegen vor in Form von zwei Kapiteln eines im IEA Task 28 entwickelten Handbuchs für die Erstellung von nachhaltigen Gebäuden. Diese beiden Kapitel sind im Anhang B des ausführlichen Endberichts enthalten.

3 Wichtige Begriffsdefinitionen

Für das Verständnis der in Kapitel 4 dargestellten Ergebnisse ist die genaue Definition der für diese Studie zentralen Begriffe Energie- und Kosteneffizienz erforderlich.

Energieeffizienz

Der Begriff Effizienz bezeichnet im Allgemeinen das Verhältnis zwischen einem erreichten Ergebnis und dem eingesetzten Aufwand.

Energieeffizienz bei der Wärmebereitstellung in Gebäuden wird bezogen auf die energierelevanten Bedürfnisse. Die energierelevanten Bedürfnisse sind durch Komfortanforderungen an Beheizung und Belüftung definiert (z.B. 20 °C Raumtemperatur, bei einem Luftwechsel von 0,4/h). Diese Anforderungen können in verschiedenen Gebäudeteilen unterschiedlich und auch zeitabhängig sein, sie sind jedoch vorgegeben und sollen zunächst nicht verändert werden. Höhere Energieeffizienz bedeutet daher die Senkung der eingesetzten Energie-Ressourcen zur Bereitstellung des geforderten Komforts. Bei der Bewertung der Effizienz von Energiesparmaßnahmen die nur das Gebäude betreffen ist die Nutzenergie (z.B. der Heizwärmebedarf) die geeignete Bezugsgröße, da diese von der Art der Energieträger unabhängig ist. Werden Maßnahmen bewertet, die auch die Haustechnik mit einbeziehen, sind in der Regel verschiedene Energieträger zu berücksichtigen (z.B. Heizöl, Strom, Solarenergie). Hier muss die Primärenergie als Bezugsgröße gewählt werden. Höhere Energieeffizienz bei der Bereitstellung der Raumwärme bedeutet eine Senkung des Heizwärmebedarfs bzw. des Bedarfs an Primärenergie. Werden mehrere Maßnahmen zur Energieeinsparung miteinander verglichen, bei denen die energierelevanten Bedürfnisse gleichermaßen erfüllt werden, so hat diejenige die größte Energieeffizienz, bei der die Energieeinsparung am größten ist.

Kosteneffizienz

Zur Berechnung der Kosteneffizienz einer Maßnahme zur Energieeinsparung bezieht man diese Energieeinsparung (erreichtes Ergebnis) auf die für diese Maßnahme benötigte Investition und die Betriebskosten (eingesetzten Ressourcen).

Ein geeigneter Bezugszeitraum für die Kosten einer Maßnahme und die entsprechenden Energieeinsparung ist ein Jahr. Die jährliche Energieeinsparung sei ΔE (in kWh/a). Die dazu notwendigen Mehrkosten setzen sich aus der annuisierten Investition K_I und den eventuellen zusätzlichen jährlichen Betriebskosten K_B (Instandsetzung, Wartung, Filter, etc.) zusammen. Daraus ergeben sich die Kosten der eingesparten Energie K_{espE} in €/kWh, die direkt mit den aktuellen Energiekosten K_E verglichen werden können:

$$K_{\text{espE}} = \frac{K_I \cdot A + K_B}{\Delta E}, \quad [K_{\text{espE}}] = \frac{\text{€}}{\text{kWh}}. \quad (1)$$

Hierbei ist A der Annuitätenfaktor. Dieser hängt vom Zinsfaktor p und dem betrachteten Zeitraum n (in Jahren) ab. Er ist gegeben durch:

$$A = \frac{p \cdot (1+p)^n}{(1+p)^n - 1}, \quad [A] = \frac{1}{a}. \quad (2)$$

Die Annuität repräsentiert den Teil der Investition K_I , der jährlich aufgebracht werden muss (hier: durch Energieeinsparungen), um den Kapitalwert von K_I am Ende des Zeitraums von n Jahren auszugleichen. Diese Amortisationszeit n wird gleich der Nutzungs- bzw. Lebensdauer des entsprechenden Systems gesetzt (Beispiel: Solaranlage $n = 25$ Jahre, Dämmmaterial: $n = 50$ Jahre). Der Annuitätenfaktor, und damit das jährlich aufzubringende Kapital, wird mit steigender Nutzungsdauer kleiner. Als Zinsfaktor p ist der Realzins zu wählen, d.h. die Differenz aus Nominalzins und Inflationsrate. Der hier angenommene Realzins beträgt $p = 6\%$.

Die Investition rentiert sich, wenn die Kosten der eingesparten Energie kleiner oder gleich den Energiekosten sind, d.h. $K_{\text{espE}} \leq K_E$. Eine solche Investition reduziert den Energieverbrauch *und* ist zugleich ökonomisch sinnvoll. Zur Zeit liegen die reinen Energiekosten (Arbeitspreise, ohne Grundgebühren etc.) für Heizöl bei $K_E = 0,035$ €/kWh und für Erdgas bei $K_E = 0,042$ €/kWh.

4 Ergebnisse

Die im ausführlichen Endbericht dargestellten Untersuchungen zum Einfluss verschiedener Maßnahmen oder Gebäudeparameter auf den Heizwärme- bzw. Primärenergieverbrauch sollen hier zusammengefasst werden. Hierbei werden besonders signifikante Ergebnisse hervorgehoben, die als Richtlinien bei der Planung und Nutzung von Gebäuden dienen können.

Die Maßnahmen werden entsprechend ihrem Verhältnis von Energie- und Kosteneffizienz strukturiert. Kategorie 1 beinhaltet planerische Maßnahmen und Nutzereinflüsse, die quasi nicht mit Kosten belegt sind. Die damit verbundenen möglichen Energieeinsparungen sind eher gering bis moderat. Maßnahmen, die technische Ausstattung des Gebäudes betreffen, sind mit größeren Kosten und Energieeinsparungen verbunden. Die Kategorie 2 beinhaltet kosteneffiziente Maßnahmen, unabhängig von der Größe der Energieeinsparung. Falls die Kosteneffizienz unter den hier gemachten Annahmen nicht gegeben ist, jedoch signifikante Energieeinsparungen erreicht werden können, findet eine Zuordnung zu Kategorie 3 statt. Eine Änderung der kostenbezogenen Annahmen, insbesondere die Berücksichtigung von Energiepreissteigerungen oder eine Senkung der Systemkosten, kann durchaus eine zukünftige Zuordnung zu Kategorie 2 ermöglichen. In Kategorie 4 sind schließlich Maßnahmen aufgeführt, die nur geringfügig Energie einsparen und auch unter modifizierten Annahmen nicht kosteneffizient sind.

Alle Ergebnisse sind in Ihrer Gültigkeit beschränkt auf die in dieser Arbeit untersuchten Gebäude. Dies sind freistehende Wohnhäuser für eine oder mehrere Familien. Die Ergebnisse sind für Gebäude nach Niedrigenergiestandard und Passivhäuser abgeleitet worden. Die berücksichtigten

Kosten enthalten keine Mehraufwendungen für Sanierungen, d.h. die hier vorgenommene Einteilung in die Kategorien gilt für den Neubau. Falls nicht anders angegeben, ist ein für Deutschland typisches Wetter zugrunde gelegt ($HGT = 3500 \text{ Kd}$).

Kategorie 1: Maßnahmen, welche zu geringen bis moderaten Energieeinsparungen führen und keine Kosten verursachen:

Südausrichtung: Durch eine Südausrichtung der Fenster kann der Heizwärmebedarf gesenkt werden. Jedoch beträgt die Abhängigkeit des jährlichen Heizwärmebedarfs von der Ausrichtung nach Süden selbst bei Gebäuden mit einer stark asymmetrischen Fensterverteilung für eine komplette Drehung um 360° i.d.R. deutlich weniger als $10 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$. Eine Abweichung der Fassade mit dem größten Fensteranteil um $\pm 25^\circ$ von der Südausrichtung hat einen vernachlässigbaren Einfluss auf den Heizenergiebedarf (weniger als $1 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$).

Bauweise: Eine kompakte Bauweise minimiert Baukosten und Heizkosten. Bei Häusern mit Lüftungsanlage und Wärmerückgewinnung werden die Energieverluste hauptsächlich durch Transmission durch die Außenhülle verursacht. Der Heizwärmebedarf ist dann quasi proportional zum A/V -Verhältnis, welcher sich bei verschiedenen Bauformen durchaus um den Faktor 2 unterscheiden kann.

Senkung der normalen Innentemperatur: Die Heizenergieeinsparung durch Senkung der normalen Innentemperatur beträgt für Niedrigenergiehäuser ca. 6 bis $10 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ pro Grad. Für Passivhäuser beträgt die Einsparmöglichkeit lediglich ca. 2 bis $4 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ pro Grad Temperatursenkung.

Nachtabenkung: Die Reduzierung des Heizwärmebedarfs durch eine Nachtabenkung liegt für Niedrigenergiehäuser bei 3% bis 4%. Bei Passivhäusern ist die Heizenergieeinsparung durch eine Nachtabenkung vernachlässigbar, da eine Abkühlung der Gebäude über nacht quasi nicht stattfindet.

Akzeptanz einer höheren Komforttemperatur: In der Heizperiode hängt die Speicherung von passiv solaren Gewinnen auch von der maximal akzeptierten Temperatur ab. Wird statt 23°C Temperaturlimit eine maximale Lufttemperatur von 27°C akzeptiert, so kann der Heizwärmebedarf bei Leichtbauweise um $2 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ sinken. Bei Massivbauweise liegt die entsprechende Einsparmöglichkeit bei deutlich unter $1 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$.

Bedarfsgerechte Lüftung: Eine Lüftungsanlage sollte auf den Grundbedarf des Nutzers abgestimmt sein. Zur energetischen Bewertung des Luftwechsels siehe Abschnitt „Luftdichtheit der Gebäudehülle“. Der Grundluftwechsel kann durch bedarfsorientiert Fensterlüftung ergänzt werden. Regelmäßige moderate Stoßlüftung durch Fenster (in der Größenordnung 0,5 Luftwechsel pro Tag) zusätzlich zur Lüftung durch die Lüftungsanlage verursacht auch in Passivhäusern keinen problematischen Anstieg des Heizenergiebedarfs bzw. keine Komfortprobleme. Das bedeutet, dass auch unter Berücksichtigung der begrenzten Heizleistung der Luftheizung das Komfortniveau von 20°C Lufttemperatur nicht nachhaltig unterschritten wird.

Standort: Die Wahl des Standorts ist keine Energiesparmaßnahme in eigentlichen Sinn. Dennoch kann der Standort auch innerhalb Deutschlands einen erheblichen Einfluss auf den Energieverbrauch haben. Ein und dasselbe Haus kann unter verschiedenen in Deutschland vorkommenden Wetterbedingungen bei gleicher Nutzung einen um mehr als 50% abweichenden jährlichen Heizwärmebedarf aufweisen. Ist für ein Jahr mit den Heizgradtagen HGT der Heizwärmebedarf HWB eines Gebäudes bestimmt, so kann der Heizwärmebedarf HWB^* für ein anderes Jahr (bzw. einen anderen Standort) mit den Heizgradtagen HGT^* abgeschätzt werden zu: $HWB^* = HWB \cdot (HGT^*/HGT - \gamma)/(1 - \gamma)$. Dabei ist γ der Anteil der nutzbaren internen und solaren Gewinne an den gesamten Energieeinträgen in das Haus. Für ältere Gebäude (ohne Wärmedämmung und Wärme-

rückgewinnung) kann $\gamma = 0$ gesetzt werden, für Niedrigenergiehäuser ist $\gamma \approx 1/3$. Für Passivhäuser kann keine Näherungsformel angegeben werden, hier ist zur Bestimmung des Heizwärmebedarfs die individuelle Berechnung der standortabhängigen solaren Gewinne und deren Nutzbarkeit notwendig.

Kategorie 2: Maßnahmen bei welchen die Investitionskosten innerhalb der Lebensdauer durch Energieeinsparung ausgeglichen werden können:

Dämmung: Der Einsatz von Dämmmaterial an Außenwänden und dem Dach ist bis zu einem U -Wert von ca. $0,25 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ kosteneffizient. Dies entspricht, je nach Konstruktion, einer Dämmstärke von 14 bis 16 cm an der Wand und bis zu 20 cm im Dach (bei $\lambda = 0,04 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$). Aufgrund der geringeren Energieverluste am Boden bei gleichzeitig höheren Anforderungen an den Dämmstoff, ist hier die Kosteneffizienz bis zu einem U -Wert von ca. $0,30 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ gegeben. Der Unsicherheitsbereich aufgrund unterschiedlicher Annahmen für die Kosten liegt für die sich daraus ergebenden U -Werte im Bereich $\pm 0,05 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$. Die Energieeinsparung kann auch mit der üblichen statischen Näherungsformel abgeschätzt werden. Diese konnte durch die durchgeführten Simulationen bestätigt werden. Durch eine Änderung des U -Wertes um ΔU sind jährliche Energieeinsparungen an Wand und Dach von $\Delta E = HGT \cdot 24 \text{ h/d} \cdot \Delta U$ zu erwarten. Dabei bezeichnet HGT die Heizgradtage. Für Deutschland wird i.d.R. $HGT = 3500 \text{ Kd}$ angenommen. Für den Boden muss aufgrund der geringeren Verluste ΔE mit einem Reduktionsfaktor multipliziert werden. Ein Reduktionsfaktor von 0,75 ist konsistent mit den durchgeführten Simulationen.

Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung (in kaltem Klima): An Standorten mit Heizgradtagen um $HGT = 4500 \text{ Kd}$ kann die Aufrüstung einer reinen Abluftanlage zu einer Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung in den Bereich der Kosteneffizienz kommen. Der Hauptanteil der Energieeinsparung (in der Größenordnung $30 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$) wird schon durch eine Anlage mit Wärmerückgewinnungsgrad von $\varepsilon_{\text{WRG}} = 65\%$ erreicht. Bei höheren Werten von ε_{WRG} werden weitere Energieeinsparungen teilweise oder sogar vollständig (insbesondere bei Verwendung von Strom) durch den Energieaufwand zur Vermeidung von Frost verhindert. Mit Kosten für die Energieeinsparung von $K_{\text{espE}} = 0,06 \text{ €/kWh}$ liegt eine Anlage mit $\varepsilon_{\text{WRG}} = 65\%$ nur moderat über den heutigen Energiekosten. Anlagen mit höheren Wärmerückgewinnungsgraden weisen eher noch höhere Kosten für die eingesparte Energie auf. Dies gilt auch für die Kombination mit Erdwärmetauschern. Die größte Einsparung von Primärenergie kann durch die Verwendung einer hocheffizienten Wärmerückgewinnung mit $\varepsilon_{\text{WRG}} = 90\%$ und der Nutzung eines Erdwärmetauschers zur Vermeidung von Frost erreicht werden (über $40 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$). Die Kosten liegen dabei aber schon bei ca. $K_{\text{espE}} = 0,08 \text{ €/kWh}$ und damit ungefähr doppelt so hoch wie die heutigen Energiepreise.

Luftdichtheit der Gebäudehülle: Eine Senkung des mittleren Infiltrationsluftwechsels um $0,1/\text{h}$ bedeutet eine Einsparung im Heizwärmebedarf von ca. 9 bis $10 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ bei Niedrigenergiehäusern und von ca. 5 bis $6 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ bei Passivhäusern. Der Unterschied für den Einfluss des Infiltrationsluftwechsels zwischen Niedrigenergie- und Passivhäusern ist verursacht durch die unterschiedliche Länge der Heizperioden. In Zeiten, in denen in Passivhäusern, im Gegensatz zu Niedrigenergiehäusern, nicht geheizt werden muss, trägt eine erhöhte Infiltration auch nicht zum Heizwärmebedarf bei. Ein Unterschied von $0,1/\text{h}$ im Infiltrationsluftwechsel macht sich gemäß EN 832 für ein frei stehendes Haus durch eine Differenz im n_{50} -Wert von etwa $1,4/\text{h}$ bemerkbar.

Kategorie 3: Maßnahmen, welche zu signifikanten Energieeinsparungen führen, die sich dadurch in der Regel jedoch nicht refinanzieren:

Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung (in mildem Klima): Bei für Deutschland typischen Klima sind die Mehrkosten einer Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung im Vergleich zu einer reinen Abluftanlage bezogen auf die eingesparte Energie mindestens doppelt so hoch wie die heutigen Energiekosten. Die mögliche Energieeinsparung ist mit 20 bis 30 kWh/(m²·a) durchaus signifikant. Der Hauptteil wird auch hier schon durch eine Anlage mit Wärmerückgewinnungsgrad von $\varepsilon_{\text{WRG}} = 65\%$ erreicht. Diese verursacht Kosten für die eingesparte Energie in Höhe von $K_{\text{espE}} = 0,08$ €/kWh. Bei Verwendung einer Anlage mit $\varepsilon_{\text{WRG}} = 90\%$ und Erdwärmetauscher zur Frostvermeidung liegen die Kosten schon bei ca. $K_{\text{espE}} = 0,10$ €/kWh.

Solaranlage: Solaranlagen mit 1 m² Kollektorfläche pro Person stellen eine Energie von ca. 400 kWh pro m² Kollektorfläche und Jahr zur Verfügung und decken damit ca. 50% des Energiebedarfs für Brauchwasser. Auf den Quadratmeter Wohnfläche umgerechnet liegt die Energieeinsparung in der Größenordnung 10 kWh/(m²·a). Kosteneffizienz ist in der Regel hierbei jedoch nicht gegeben. Mit $K_{\text{espE}} = 0,18$ €/kWh im Beispiel einer 5 m² großen Anlage unter den Wetterbedingungen von Trier liegen die Kosten ungefähr 4-mal so hoch wie die Energiekosten. Größere Anlagen, insbesondere zur Heizungsunterstützung, sind wirtschaftlich eher noch ungünstiger. Der Grund liegt darin, dass die niedrigeren Investitionskosten pro m² Kollektorfläche für größere Anlagen durch sinkende Ausnutzungsgrade des Systems überkompensiert werden. Eine Beispielrechnung für ein Zweifamilienhaus mit einer Solaranlage mit 40 m² Kollektorfläche für Brauchwasser und Heizungsunterstützung wies Kosten von bis zu $K_{\text{espE}} = 0,4$ €/kWh auf, was wiederum das 10-fache des heutigen Energiepreises darstellt.

Kategorie 4: Maßnahmen mit moderaten Energieeinsparungen, die aber sehr hohe Kosten verursachen:

Fenstervergrößerung für passiv solare Gewinne: Nutzbare passiv-solare Gewinne durch Fenster sind nur sehr moderat von der Fenstergröße abhängig. Der Grund liegt in der Reduktion der Nutzbarkeit mit dem Ansteigen der solaren Gewinne. In Passivhäusern betragen die nutzbaren solaren Gewinne etwa 10 kWh/(m²·a). Die Variation für eine relativ große Spannweite der Fensterfläche liegt bei ca. ± 2 kWh/(m²·a). Die nutzbaren solaren Gewinne können nur unter sehr hohem Kostenaufwand für große Fensterflächen (d.h. gesamter Fensterflächenanteil min. 25%) auf maximal 15 kWh/(m²·a) gesteigert werden (mit potenzieller sommerlicher Überhitzungsgefahr). Die Kosten für Energieeinsparungen durch eine Fenstervergrößerung sind bei einem Niedrigenergiehaus am Standort Trier je nach Fenster $K_{\text{espE}} = 0,4$ €/kWh bis $K_{\text{espE}} = 1,5$ €/kWh. Bei einem Passivhaus ist aufgrund des höheren Dämmstandards der Wände und der geringeren Nutzbarkeit der Gewinne nur die Vergrößerung hochwärmedämmender Fenster energieeffizient. Die entsprechenden Kosten liegen in der Größenordnung ab $K_{\text{espE}} = 1,6$ €/kWh. Die Fensterflächen sollten daher unter den Aspekten optimaler Tageslichtnutzung, guter Aussicht und geringer Kosten festgelegt werden.

Hochwärmedämmende Fenster: Durch den Einsatz hochwärmedämmender Fenster ($U_{\text{Fenster}} = 0,7$ W/(m²·K)) gegenüber Standardfenstern am Niedrigenergiehaus ($U_{\text{Fenster}} = 1,3$ W/(m²·K)) kann der Heizwärmebedarf je nach Standort in Deutschland um ca. 50 bis 70 kWh pro m² Fensterfläche und Jahr reduziert werden. Mit Kosten für diese Einsparung von $K_{\text{espE}} = 0,2$ €/kWh bis $K_{\text{espE}} = 0,3$ €/kWh ist dies jedoch nicht kosteneffizient. Bei Passivhäusern ist die Energieeinsparung aufgrund des geringeren Heizwärmebedarfs noch kleiner. Diese liegt bei ca. 30 bis 50 kWh pro m² Fensterfläche und Jahr. Entsprechend sind die Kosten für die eingesparte Energie im Bereich $K_{\text{espE}} = 0,3$ €/kWh bis $K_{\text{espE}} = 0,5$ €/kWh. Bei Passivhäusern wird die Verwendung von hochwärmedämmenden Fenstern empfohlen. Für Räume mit Fenstergrößen von bis zu 2 m² sind jedoch auch bei Verwendung von Standardfenstern keine Komfortprobleme zu erwarten.

Erdwärmetauscher zur Vorwärmung der Frischluft: Erdreichwärmetauscher (EWT), welche ausschließlich dazu genutzt werden in der Heizperiode Frischluft vorzuwärmen, sind nicht kosteneffizient. Bei einer zentralen Frischluftversorgung ist der Einsatz einer Wärmerückgewinnung (WRG) sinnvoll. Dadurch wird der EWT aber wärmetechnisch vom Haus entkoppelt. Die Energieeinsparungen durch den EWT beschränken sich dann im wesentlichen auf die Vermeidung des Einfrierens der WRG. Diese liegen dann bei für Deutschland typischem Klima bei maximal 5 kWh/(m²·a) Primärenergie (bezogen auf die Wohnfläche). Dieser Wert beruht auf der Annahme, dass zur Vermeidung des Einfrierens eine Stromheizung zum Einsatz kommt. Wird diese Energie durch Verwendung eines EWT eingespart, ergeben sich Kosten von $K_{\text{espE}} = 0,10$ €/kWh (für die gesamte Lüftungsanlage mit WRG und EWT).

Anhand der Simulationsmodelle der Objekte Essen und Hünsborn sind die oben gemachten Empfehlungen für alle kosteneffizienten Maßnahmen (Kategorie 1) umgesetzt worden. Dazu wurden die U -Werte Wände und Dächer auf 0,25 W/(m²·K) und die des Bodens auf 0,30 W/(m²·K) gesetzt. Der aktuelle Standard für Fensterglas wurde zu 1,1 W/(m²·K) mit einem g -Wert von 0,61 angenommen. Dabei hat der Rahmen hat einen U -Wert von 1,6 W/(m²·K). Beim Objekt Hünsborn wurden die Fenster in der Zone Wohnen gegenüber tatsächlichen Realisierung auf 17 m² verkleinert. Der konstante Beitrag zur Infiltration kann bei optimalem Lüftungsverhalten mit 0,05/h angenommen werden. Dazu müsste ein n_{50} -Wert von weniger als 1/h erreicht werden. Der Luftwechsel beträgt 40 m²/h pro Person. Ab einer Außenlufttemperatur von 18 °C wird zu Fensterlüftung mit 0,8/h übergegangen. Externe Verschattung wurde nicht angenommen. Damit ergibt sich für den Standort Trier mit $HGT = 3505$ Kd ein Heizwärmebedarf von

- 74,5 kWh/(m² a) für das Objekt Essen und von
- 78,7 kWh/(m² a) für das Objekt Hünsborn,

jeweils unter identischen Bedingungen für Wetter und Nutzerverhalten. Der etwas größere Heizwärmebedarf des Objekts Hünsborn ist auf das ungünstigere A/V -Verhältnis zurückzuführen ($A/V=0,73$ für Hünsborn während $A/V=0,59$ für Essen). Dies wird teilweise durch den niedrigeren benötigten Luftwechsel im Objekt Hünsborn ausgeglichen, da hier der Grundriss nur eine geringere Personendichte als im Objekt Essen zulässt.

Um diesen Heizwärmebedarf weiter zu senken muss zu Maßnahmen gegriffen werden, die (zur Zeit) nicht kosteneffizient sind. Hierzu könnte eine Erhöhung des Dämmstandards in Frage kommen. Bei einem U -Wert für Wand oder Dach von ca. $U = 0,20$ W/(m²·K) werden Kosten für die eingesparte Energie von 0,08 €/kWh erreicht. Statt einer weiterer Erhöhung des Dämmstandards ist dann im für Deutschland typischen Klima eine Lüftungsanlage mit moderatem Wärmerückgewinnungsgrad (z.B. $\varepsilon_{\text{WRG}} = 65\%$) auch aus Kostengründen vorzuziehen. Für weitere signifikante Energieeinsparungen kommt dann eine Solaranlage zur Brauchwasserunterstützung in Betracht. Bei einer moderaten Dimensionierung der Solaranlage von 1 bis 2 m² pro Person liegen die Kosten für die Energieeinsparung deutlich unter denen, die z.B. durch eine Vergrößerung der Fensterfläche für mehr passiv solare Gewinne verursacht würden.

Bei der Betrachtung der Kosteneffizienz sollten jedoch die folgenden beiden Punkte immer berücksichtigt werden:

- Einsparung von Energie hilft Ressourcen zu schonen und insbesondere den Ausstoß von CO₂ zu reduzieren. Auch Investitionen in Energiesparmaßnahmen, die momentan nicht kosteneffizient sind, sind Investitionen in die Nachhaltigkeit eines Gebäudes.
- Die Vorhersage einer Steigerung der Energiepreise ist nicht möglich und daher hier auch nicht berücksichtigt. Inflationsbereinigt sind die Rohölpreise in den letzten 30 Jahren quasi nicht gestiegen, dies muss aber in der Zukunft nicht der Fall sein. Eine Maßnahme zur Energieeinsparung ist daher immer auch eine *Versicherung* gegen mögliche Energiepreissteigerungen. Die Mehrkosten für eine Maßnahme zur Energieeinsparung, die nicht

durch die Energiekostensparnis zurückgewonnen werden, können als *Versicherungsprämie* verstanden werden, obwohl eine Quantifizierung kaum möglich ist.

Die Kosteneffizienz ist, im Gegensatz zur Energieeffizienz, nur unscharf zu erfassen. Abgesehen von der breiten Streuung der heutigen Preisinformationen für Materialien und Systeme ist die Voraussage der zukünftigen Preisentwicklungen kaum möglich. Die Kosteneffizienz sollte daher nicht als *wichtigstes* Kriterium für die Festlegung eines individuellen Gebäudestandards herangezogen werden. Die Angaben zur Kosteneffizienz dienen vor allem der Vergleichbarkeit und zum „Ranking“ verschiedener Maßnahmen untereinander. Die Ergebnisse bezüglich des Energieverbrauchs bei verschiedenen Maßnahmen haben daher einen deutlich größeren Anspruch auf Gültigkeit, auch über die gesamte Lebensdauer eines Gebäudes.

In dieser Studie wurden Variationen von Gebäudeaspekten bezüglich des Einflusses auf die Kriterien Energiebedarf, Kosten und Komfort untersucht. Ziel dieser Arbeit war, die Zusammenhänge zwischen der Ausprägung verschiedener Maßnahmen und dem Einfluss auf diese Kriterien zu quantifizieren und untereinander vergleichbar zu machen. Dies wurde insbesondere im Hinblick auf Gebäude mit sehr niedrigem Energiebedarf untersucht. Dabei hat sich herausgestellt, dass für Häuser mit extrem niedrigem Energieverbrauch (Passivhäuser) übliche Annahmen nicht im selben Maße gültig sind wie bei Häusern nach aktuellem Standard. Ein wichtiges Beispiel ist die Nutzbarkeit von Solargewinnen und die Rückschlüsse auf die optimale Fensterverteilung. Die dargestellten Ergebnisse tragen somit zu einer Aktualisierung der Richtlinien für komfortable energie- und kosteneffiziente Gebäude bei.

Forschungsbericht:	Dr. rer. nat. Udo D. J. Gieseler und Prof. Dr.-Ing. F. D. Heidt. Durchgeführt im Zeitraum Juli 2000 bis September 2004. Ausführlicher Bericht: 128 Seiten
Bezug bei:	Fraunhofer IRB-Verlag (www.irbdirekt.de)
Bestellnummer:	T 3081
ISBN:	3-8167-6875-X
Förderer:	Forschungszentrum Jülich GmbH, Projektträger ETN, AG Solar NRW
Ausführende Stelle:	Universität Siegen, Fachgebiet Bauphysik & Solarenergie (Leitung: Prof. Dr.-Ing. F. D. Heidt)