



energie

## Lebenszyklusanalyse von Wohngebäuden

Kurzfassung





# Lebenszyklusanalyse von Wohngebäuden

## Impressum

Lebenszyklusanalyse von Wohngebäuden

### Herausgeber:

Bayerisches Landesamt für Umwelt (LfU)  
Bürgermeister-Ulrich-Straße 160  
86179 Augsburg  
Telefon: 0821 9071-0  
E-Mail: [poststelle@lfu.bayern.de](mailto:poststelle@lfu.bayern.de)  
Internet: [www.lfu.bayern.de](http://www.lfu.bayern.de)

Bayerisches Staatsministerium für Wirtschaft, Energie und Technologie  
Prinzregentenstraße 28  
80538 München  
Telefon: 089 2162-0  
E-Mail: [poststelle@stmwi.bayern.de](mailto:poststelle@stmwi.bayern.de)  
Internet: [www.stmwi.bayern.de](http://www.stmwi.bayern.de)

### Bearbeitung:

LfU, Ökoenergie-Institut Bayern, Tobias Unger, Stephan Leitschuh  
Ascona GbR, Holger König

### Bildnachweis:

alle Bilder LfU, außer:  
Abb. 2, 3: Ascona GbR, Holger König  
Abb. 4–8: mit freundlicher Genehmigung von SIRADOS Baudaten (verändert durch LfU)  
Abb. 9: Oben: © Harald Biebel / Fotolia.com; Mitte: © Antonioguille / Fotolia.com; Unten: Bayerisches Landesamt für Gesundheit und Lebensmittelsicherheit (LGL)  
S. 20: Links: © Birgitta Hohenester / Pixelio.de; Rechts Oben: LGL

### Druck:

EOS PRINT  
Erzabtei 14 a  
86941 St. Ottilien

Gedruckt auf 100% Recyclingpapier

### Stand:

April 2018, 1. Auflage: 2.000 Exemplare  
Juni 2018, 2. unveränderte Ausgabe

Das Werk ist urheberrechtlich geschützt. Alle Rechte sind vorbehalten. Die Publikation wird kostenlos abgegeben, jede entgeltliche Weitergabe ist untersagt. Der Inhalt wurde mit großer Sorgfalt zusammengestellt. Eine Gewähr für die Richtigkeit und Vollständigkeit kann dennoch nicht übernommen werden. Für die Inhalte fremder Internetangebote sind wir nicht verantwortlich.



BAYERN | DIREKT ist Ihr direkter Draht zur Bayerischen Staatsregierung. Unter Tel. 089 122220 oder per E-Mail unter [direkt@bayern.de](mailto:direkt@bayern.de) erhalten Sie Informationsmaterial und Broschüren, Auskunft zu aktuellen Themen und Internetquellen sowie Hinweise zu Behörden, zuständigen Stellen und Ansprechpartnern bei der Bayerischen Staatsregierung.

## Inhaltsverzeichnis

|   |           |
|---|-----------|
| <b>Hintergrund der Studie</b>                                     | <b>5</b>  |
| <b>Wissenschaftliche Berechnungsbasis der Lebenszyklusanalyse</b> | <b>5</b>  |
| <b>Umfang und Methodik der Lebenszyklusanalyse</b>                | <b>6</b>  |
| <b>Bewertungskriterien</b>  | <b>9</b>  |
| <b>Heizwärmebedarf</b>  | <b>10</b> |
| <b>Ökobilanz</b>  | <b>11</b> |
| <b>Qualitative Aspekte</b>  | <b>19</b> |
| <b>Ökonomie</b>   | <b>21</b> |
| <b>Zusammenfassung</b>  | <b>22</b> |
| <b>Anhang</b>   | <b>23</b> |



## 1 Hintergrund der Studie

Im Auftrag des Bayerischen Landesamtes für Umwelt und mit Mitteln des Bayerischen Wirtschaftsministeriums hat die Firma Ascona GbR eine Lebenszyklusanalyse von Wohngebäuden durchgeführt. Die Studie liefert einen Beitrag zur Debatte rund um die Nachhaltigkeit beim Bauen und bietet neben einer ökologischen auch eine ökonomische Betrachtung verschiedener Leicht- und Massivbauweisen über alle Lebenszyklusphasen eines Gebäudes – von der Herstellung bis zur Entsorgung. Die Analyse stellt eine umfassende Entscheidungshilfe beim Hausbau dar, indem sie einen Überblick über die spezifischen Vorteile der verschiedenen Bauweisen aufzeigt. Diese Kurzfassung soll zusammenfassend die wichtigsten Ergebnisse der Studie aufzeigen<sup>1</sup>.

## 2 Wissenschaftliche Berechnungsbasis der Lebenszyklusanalyse

Basis der Lebenszyklusanalyse ist ein repräsentatives Musterhaus, das nach den Kriterien der DIN EN 15978<sup>2</sup> und der DIN EN 15804<sup>3</sup> im Sinne einer umfassenden Ökobilanz untersucht wurde. Die folgenden Lebenszyklusphasen sind dabei Bestandteil der Studie: Herstellungsphase (Rohstoffbereitstellung, Transport, Herstellung; A1–A3), Nutzungsphase (Instandhaltung, Ersatz, Betrieblicher Energiebedarf; B2, B4, B6) und Entsorgungsphase (Abfallbewirtschaftung, Abfallbeseitigung; C3, C4). Als Betrachtungszeitraum wurden 50 Jahre gewählt. Abbildung 1 gibt einen Überblick über die untersuchten Lebenszyklusphasen.

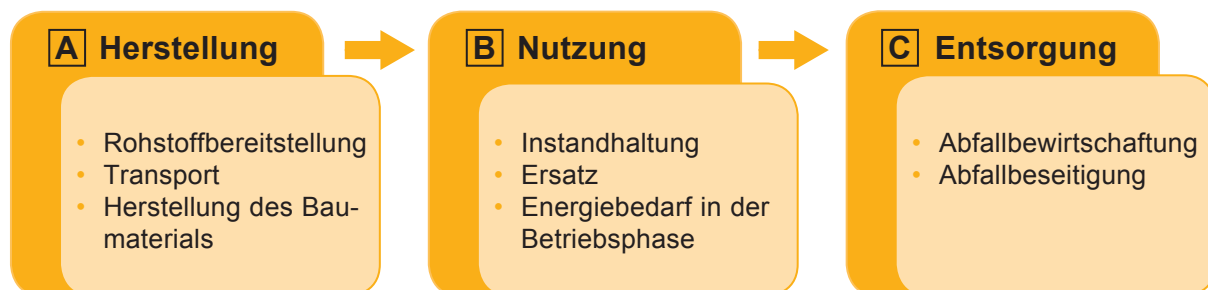


Abb. 1: Lebenszyklusphasen der durchgeführten Ökobilanz

<sup>1</sup> Den ausführlichen Bericht des Projektnehmers zur Studie finden Sie unter:

[https://www.energieatlas.bayern.de/> Bürger > Bauen und Sanieren: Studie „Lebenszyklusanalyse für Wohngebäude“](https://www.energieatlas.bayern.de/>Bürger>Bauen%20und%20Sanieren:Studie%20„Lebenszyklusanalyse%20für%20Wohngebäude“)

<sup>2</sup> DIN EN 15978: „Nachhaltigkeit von Bauwerken – Bewertung der umweltbezogenen Qualität von Gebäuden – Berechnungsmethode“

<sup>3</sup> DIN EN 15804: „Nachhaltigkeit von Bauwerken – Umweltproduktdeklarationen – Grundregeln für die Produktkategorie Bauprodukte“

### 3 Umfang und Methodik der Lebenszyklusanalyse

Grundlage für die Untersuchungen ist ein Einfamilienhaus ohne Keller, das eine Nettoraumfläche von 150 m<sup>2</sup> besitzt. Davon sind 135 m<sup>2</sup> reine Wohnfläche. Das Flächen-zu-Volumen (A/V)-Verhältnis entspricht mit einem Wert von 0,73 einer kompakten Bauweise ohne Versprünge. Das Gebäude ist in zwei Geschosse untergliedert, die es durch das neben dem Eingang befindliche Treppenhaus und die Sanitäranlagen auf beiden Etagen ermöglichen, das Haus im Bedarfsfall in zwei separate Wohnungen aufzuteilen. 33 % der Fensterflächen zeigen nach Süden, die Decke zum Dachgeschoss ist gedämmt und stellt somit den Abschluss der thermischen Hülle nach oben dar. Anstelle eines Kellergeschosses ist ein Technikraum im Erdgeschoss konzipiert, in dem die Heizungstechnik untergebracht ist. Eine Übersicht über das Gebäude bieten die nachfolgenden Außenansichten in Abbildung 2 sowie die Grundrisse des Einfamilienhauses in Abbildung 3.



Abb. 2: Süd- und Westansicht (Schnitt) des untersuchten Einfamilienhauses

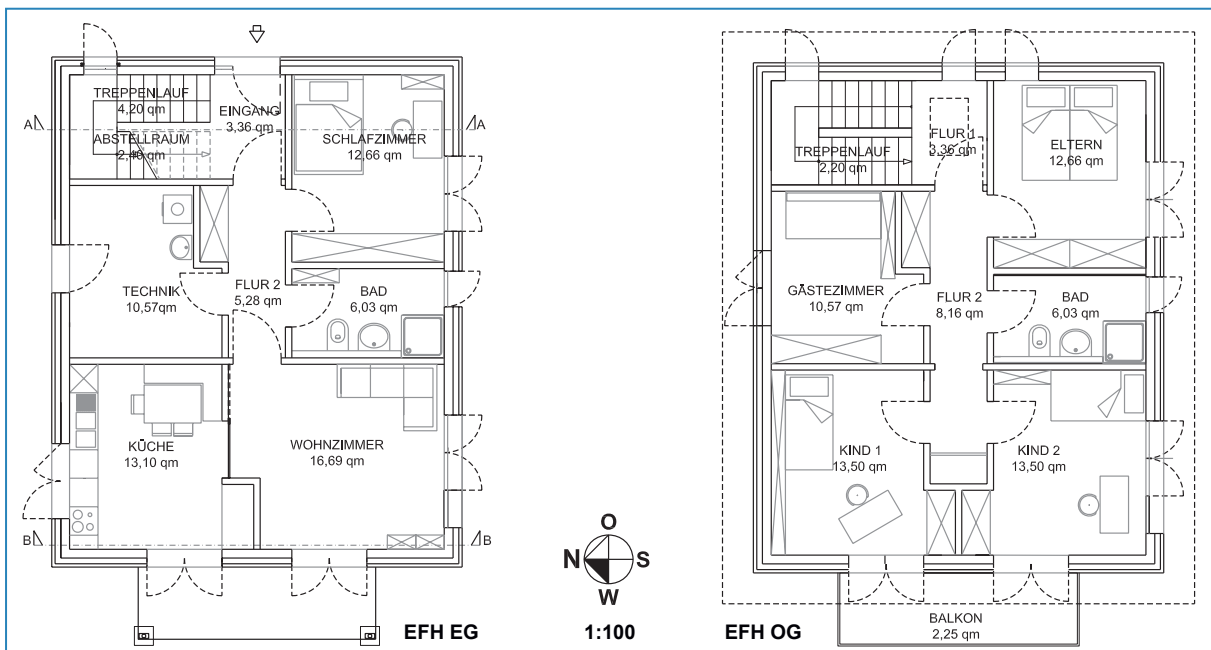


Abb. 3: Grundrisse des untersuchten Einfamilienhauses (links: EG, rechts: OG)



Für die Lebenszyklusanalyse wurden sechs unterschiedliche Bauweisen untersucht, bei denen jeweils eine Putzfassade angenommen wurde. Des Weiteren wurde das Haus mit drei verschiedenen Energieniveaus, berechnet nach der Energieeinsparverordnung (EnEV), und vier verschiedenen Heizungstechniken modelliert und analysiert.

Bauweisen:

- Kalksandsteinkonstruktion mit verputztem Wärmedämmverbundsystem (EPS-WDVS)
- Ziegelkonstruktion in monolithischer Ausführung mit und ohne Dämmstofffüllung
- Porenbetonkonstruktion in monolithischer Ausführung
- Hybridkonstruktion mit schwerer Bauweise im Gebäudekern und leichten Hüllflächen
- Massivholzsystem mit verputztem Wärmedämmverbundsystem (Holzfaser-WDVS)
- Holzständerbauweise mit verputztem Wärmedämmverbundsystem (Zellulose- und Holzfaser-WDVS)

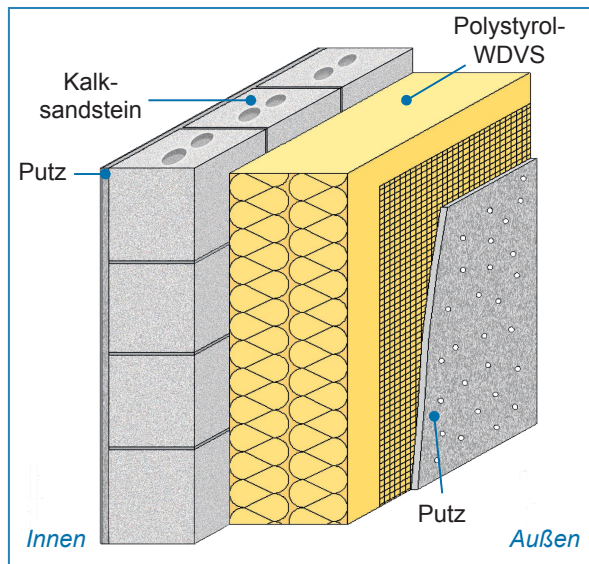


Abb. 4: Wandaufbau Kalksandsteinkonstruktion

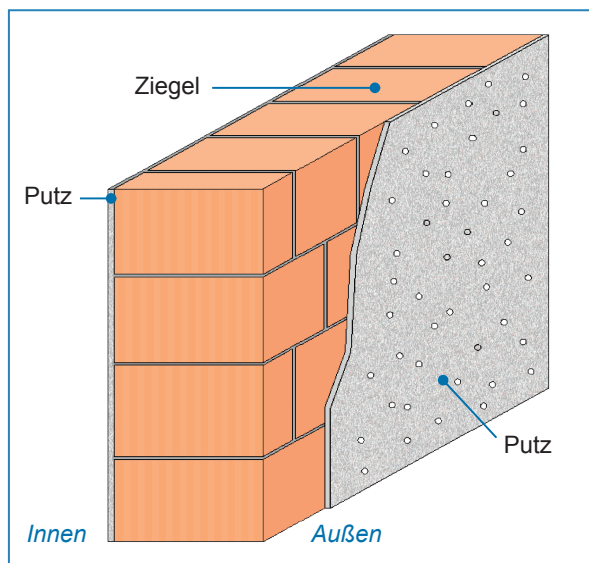


Abb. 5: Wandaufbau Ziegelkonstruktion

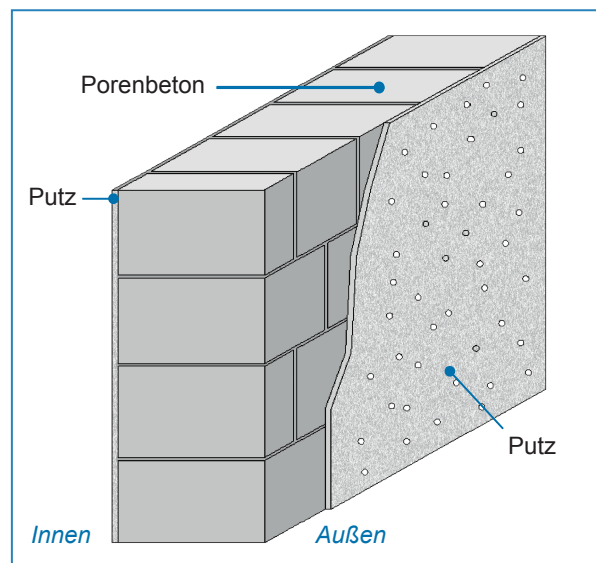


Abb. 6: Wandaufbau Porenbetonkonstruktion

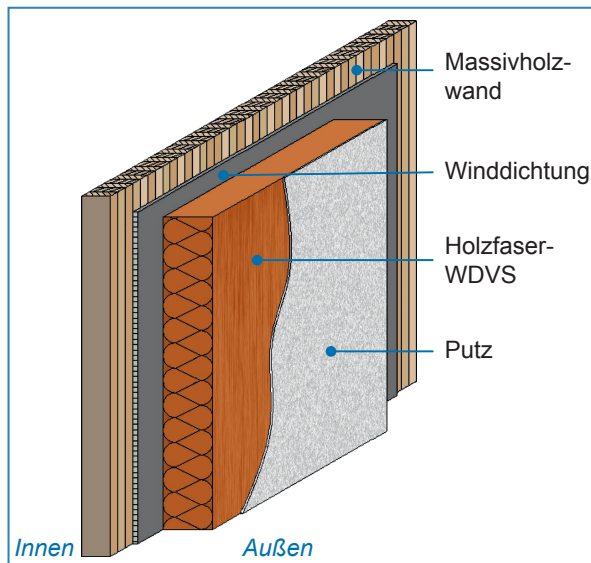


Abb. 7: Wandaufbau Massivholzsystem

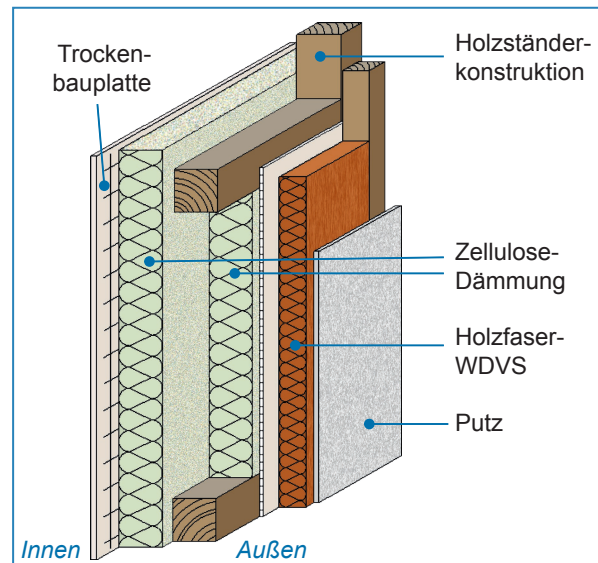


Abb. 8: Wandaufbau Holzständerbauweise / Hybridbauweise

Heizsysteme:

- Gasbrennwertkessel mit solarthermischer Warmwasserbereitung
- Holzpelletkessel
- Luft-Wasser-Wärmepumpe
- Wasser-Wasser-Wärmepumpe

Energieniveaus:

- EnEV Neubauanforderung<sup>4</sup> (seit 01.01.2016), ohne Lüftungsanlage
- 30 kWh/(m<sup>2</sup>·a) Heizwärmebedarf, mit Abluftanlage
- 15 kWh/(m<sup>2</sup>·a) Heizwärmebedarf, mit Lüftungsanlage inklusive Wärmerückgewinnung

Die sich daraus ergebenden 72 verschiedenen Varianten wurden mittels computergestützter Simulation durch die Software TRNSYS17 mit einem Sieben-Zonen-Modell thermisch-dynamisch untersucht. Hierdurch konnten sowohl Wärmespeichereffekte betrachtet als auch Nachtlüftung und solare Gewinne berücksichtigt werden und somit deren Einfluss auf den Heizwärmebedarf und den sommerlichen thermischen Komfort des Gebäudes untersucht werden. Die Beurteilung der Ökobilanzen wurde mit Hilfe der Software LEGEP und Daten der ÖKOBAUDAT 2016 vorgenommen.

<sup>4</sup> nach Berechnungsgrundlagen von DIN 4108 und DIN 4701

## 4 Bewertungskriterien

Zu den Bewertungskriterien zählen neben quantifizierbaren Aspekten aus den Bereichen der Ökologie und Ökonomie auch weitere qualitative Aspekte. Im Bereich der Ökologie wurden die Umweltauswirkungen hinsichtlich des Ressourcenverbrauchs (Primärenergie erneuerbar, nicht erneuerbar und gesamt), des Treibhausgas-, Eutrophierungs-, Sommersmog- sowie Versauerungspotenzials untersucht. Bei den qualitativen Aspekten stehen thermischer Komfort, Langlebigkeit, Akustik, Schadstoffe in der Raumluft sowie das Brandverhalten im Fokus. Im Bereich der Ökonomie wurden die Kosten verschiedener Bauweisen (nur für EnEV-Standard) betrachtet. Einen gesamten Überblick über alle Kriterien liefert Abbildung 9.



Abb. 9: Übersicht der untersuchten Kriterien für den Vergleich der verschiedenen Gebäudearten

## 5 Heizwärmebedarf

Mit einer thermisch-dynamischen Simulation wurde der Heizwärmebedarf der jeweiligen Gebäudetypen auf Basis der Wärmedurchgangskoeffizienten (U-Werte) der Hüllflächen bestimmt. Hierbei wurden ebenso die Wärmespeichereffekte der verschiedenen schweren Materialien berücksichtigt. Als Sollraumtemperatur wurden dabei 20 °C vorgegeben und als Wetterinput die Daten des Testreferenzjahres Nummer 13 (München) verwendet.

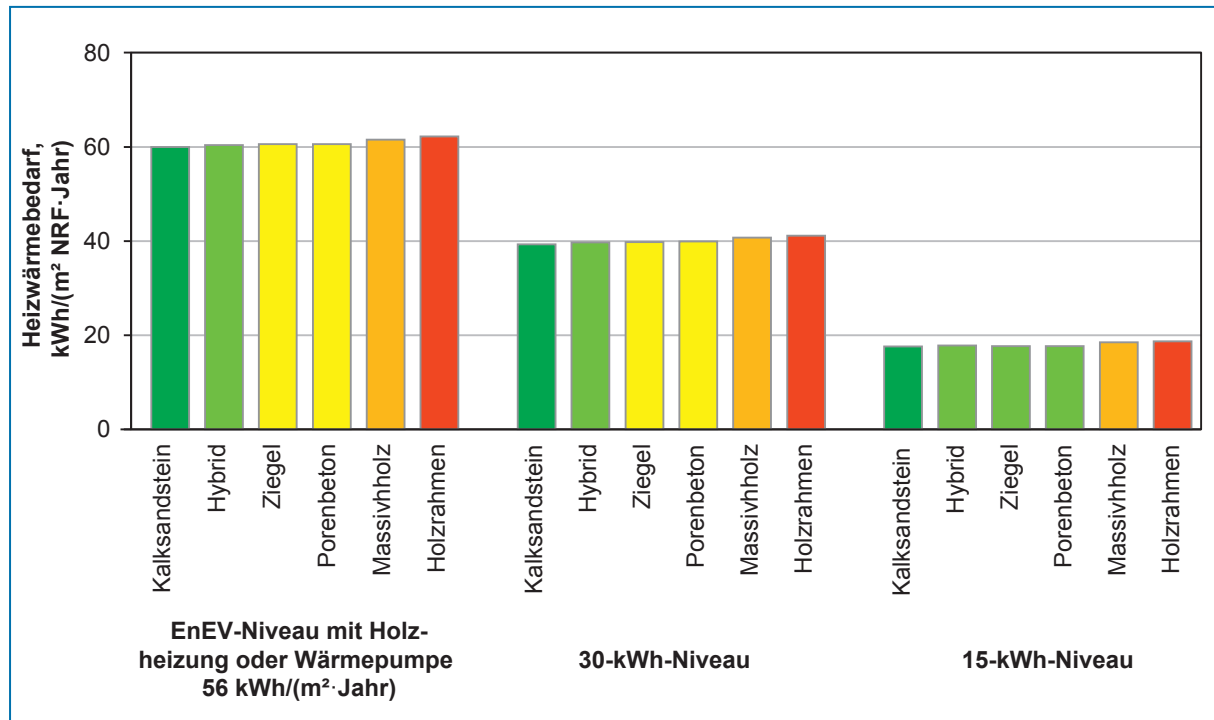


Abb. 10: Heizwärmebedarfswerte der einzelnen Bauweisen und Energieniveaus

Es zeigt sich, dass die Bauweisen mit einer geringeren wirksamen thermischen Masse zu leicht höheren Heizwärmebedarfen führen als massive Bauweisen (Abbildung 10). Die Spreizung beträgt hierbei je nach energetischem Standard zwischen 3,6 und 6,3 %. Je besser der gewählte energetische Standard ausfällt, desto höher liegt jeweils der prozentuale Unterschied zwischen dem höchsten und niedrigsten Heizwärmebedarf. Im Optimalfall ist wegen der Wärmespeicherwirkung zwischen Warm- und Kaltphasen eine Einsparung des Heizwärmebedarfs von mehr als 10 % gegenüber einer Leichtbauweise möglich. Auch mit der Hybridbauweise wird ein vergleichsweise geringer Heizwärmebedarf über die verschiedenen Energieniveaus erzielt.

Allgemein ist bei allen Bauweisen eine deutliche Abnahme des Heizwärmebedarfs vom EnEV- zum 15-kWh-Niveau in einer Größenordnung von rund 70 % erkennbar.

## 6 Ökobilanz

Nach einer ausführlichen Modellierung des Gebäudes wurden die Auswirkungen der verschiedenen Bauweisen durch die Prozesse der Herstellung, Instandhaltung und Entsorgung sowie während des Betriebs in Form einer Ökobilanz untersucht. Die Ökobilanzen wurden dabei anhand energetischer und ökologischer Parameter erstellt.

### 6.1 Primärenergiebedarf

Beim Parameter Primärenergieaufwand der einzelnen Gebäudetypen verhält es sich anders als beim Parameter Heizwärmebedarf aus Punkt 5. Hier schneiden die Leichtbauweisen beim nicht erneuerbaren sowie gesamten Primärenergiebedarf, der für die Prozesse der Herstellung, Instandhaltung und Entsorgung der Gebäude aufgewendet werden muss, günstiger ab als die massiven Bauweisen (Abbildung 11). Durch den Einsatz von Holz und anderen nachwachsenden Rohstoffen liegt der Anteil des erneuerbaren Primärenergiebedarfs am Gesamt-Primärenergiebedarf im Bereich der Leichtbauweise über dem der Massivbauweise. Die Hybridbauweise reiht sich bei Betrachtungen des Primärenergiebedarfs zwischen den beiden Bauweisen ein.

Mit zunehmendem Effizienzniveau steigt der bauliche Aufwand etwas an, um einen geringeren Energiebedarf des Gebäudes zu erreichen, woraus ein erhöhter Primärenergiebedarf resultiert: je nach Bauweise im Fall der Luft-Wasser-Wärmepumpe um 9–19 %, der Wasser-Wasser-Wärmepumpe um 9–17 %, der Holzpellettheizung um 10–18 % und der Gasbrennwerttechnik mit Solarthermie um 1–13 %.

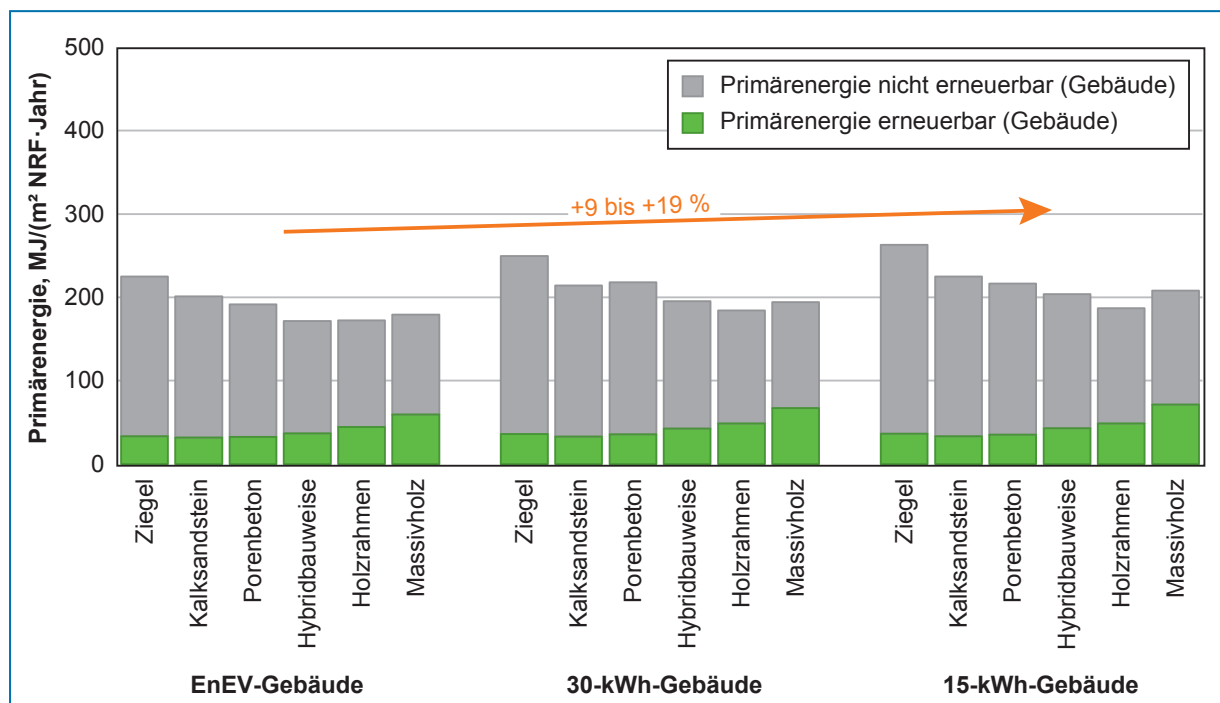


Abb. 11: Primärenergiebedarfswerte der Gebäude (Herstellung, Instandhaltung, Entsorgung) der einzelnen Bauweisen und Energieniveaus am Beispiel der Luft-Wasser-Wärmepumpe



Dieser bauliche Mehraufwand für das Gebäude wird jedoch wiederum durch einen geringeren Energiebedarf im Betrieb ausgeglichen, sodass letztlich sogar ein Einsparpotenzial entsteht (Abbildung 12). Im Fall der Luft-Wasser-Wärmepumpe beträgt dieses je nach Bauweise 27–34 % vom EnEV- zum 15-kWh-Niveau. Bei Verwendung der anderen untersuchten Heizungstechnikarten ergeben sich folgende Einsparungspotenziale: 15–22 % bei der Wasser-Wasser-Wärmepumpe, 8–16 % bei der Holzpellettheizung und 25–32 % bei der Gas-Brennwertheizung mit Solarthermie.

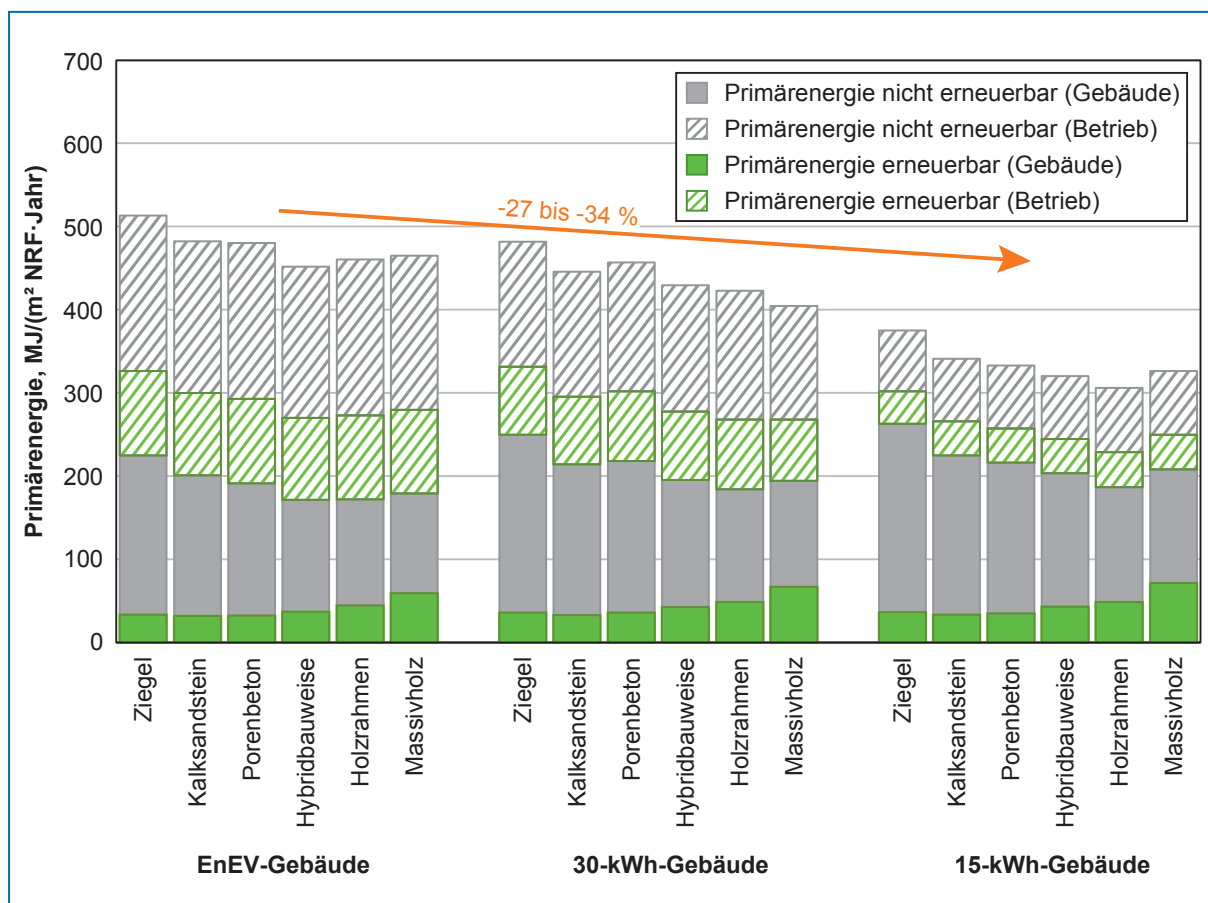


Abb. 12: Primärenergiebedarfswerte (Gebäude + Betrieb) der einzelnen Bauweisen und Energieniveaus am Beispiel der Luft-Wasser-Wärmepumpe

## 6.2 Umweltindikator – Treibhausgaspotenzial

Als Umweltindikator wird hier in erster Linie das Treibhausgaspotenzial betrachtet, da die Ergebnisse der anderen Indikatoren absolut gesehen eine untergeordnete Bedeutung zeigen. Das Treibhausgaspotenzial fällt bei der Herstellung von Gebäuden im Leichtbau niedriger aus als im Massivbau (Abbildung 13). Wie auch bei dem Ergebnis des Gesamt-Primärenergiebedarfs reiht sich die Hybridbauweise zwischen den beiden Bauweisen ein. Die zusätzlichen Treibhausgasemissionen für die Herstellung werden bei den effizienteren Gebäuden während des Betriebs über einen Zeitraum von 50 Jahren bei Weitem ausgeglichen: 20–32 % Verringerung je nach Bauweise im Fall der Luft-Wasser-Wärmepumpe, 10–22 % bei der Wasser-Wasser-Wärmepumpe und 22–34 % bei der Gasbrennwertheizung mit Solarthermie. Im Falle der Holzpellettheizung fallen die Einsparpotenziale mit 2–8 % für die Hybrid- und Leichtbauweisen geringer aus, die Massivbauweisen weisen bei der

angenommenen Kalkulationszeit von 50 Jahren sogar eine Erhöhung der Treibhausgasemissionen von 1–15 % auf. Denn bereits beim EnEV-Niveau wird ein verhältnismäßig geringer Emissionswert erreicht, sodass die zusätzlichen Treibhausgasemissionen für die Herstellung eines besseren Gebäudeeffizienzstandards nicht während der hier kalkulierten Betriebszeit von 50 Jahren ausgeglichen werden können. Allerdings können Gebäude mit ihrer Rohkonstruktion deutlich länger als 50 Jahre bestehen. Weiterhin bleibt zu beachten, dass das Potenzial an holzbasierten Brennstoffen begrenzt ist und ein hoher fossiler Rohstoffverbrauch nicht durch einen hohen Verbrauch an erneuerbaren Energieträgern ersetzt werden sollte.

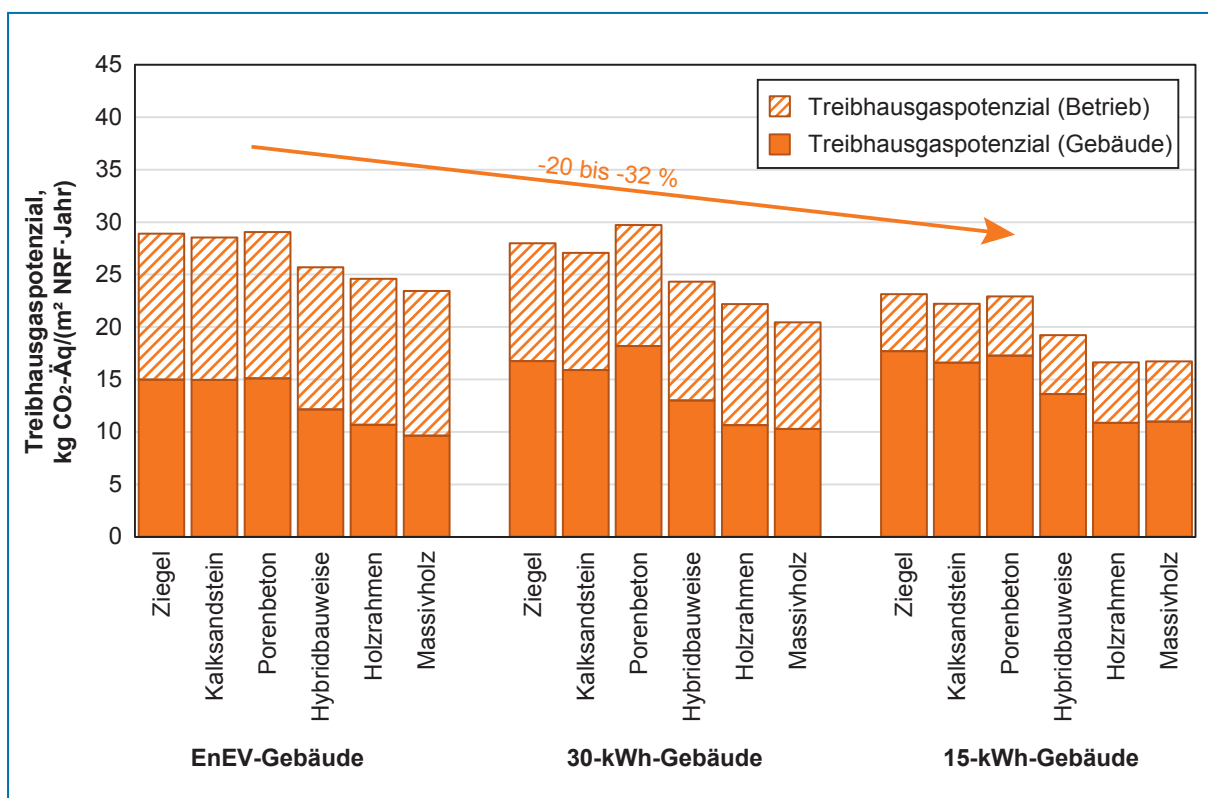


Abb. 13: Treibhausgaspotenziale der einzelnen Bauweisen und Energieniveaus am Beispiel der Luft-Wasser-Wärmepumpe

Im Rahmen der Studie wurde zu Vergleichszwecken ebenfalls ein Bestandsgebäude der 80er-Jahre untersucht, das eine Ziegelkonstruktion und einen Ölbrenner als Heizungstechnik aufweist. Aufgrund einer mäßigen Dämmung besitzt das Bestandsgebäude einen relativ hohen errechneten Heizwärmebedarf von 183 kWh/(m²·a). Abbildung 14 zeigt die Relationen der Parameter Gesamt-Primärenergiebedarf und Treibhausgaspotenzial zwischen den verschiedenen Bauweisen und Energiestandards und dem Bestandsgebäude auf.

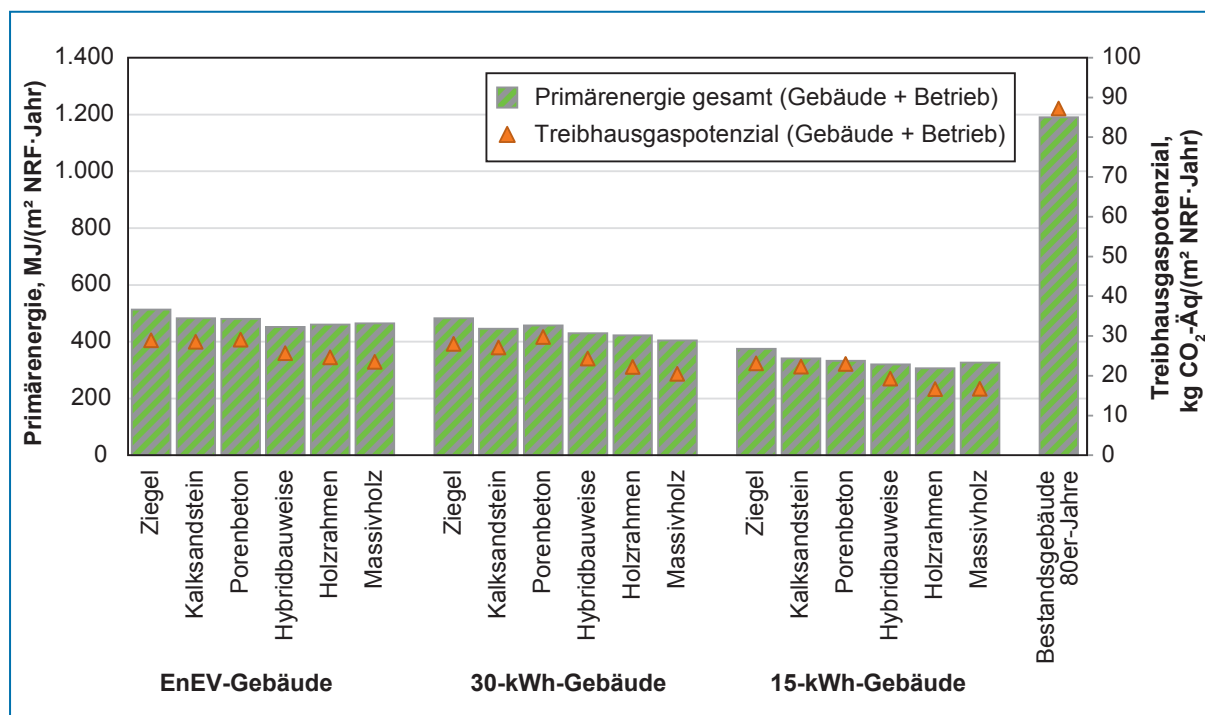


Abb. 14: Gegenüberstellung der Gesamt-Primärenergien und Treibhausgaspotenziale der einzelnen Bauformen mit denen des Bestandsgebäudes am Beispiel der Luft-Wasser-Wärmepumpe

### 6.3 Heizungstechnikvergleich

Des Weiteren wurde untersucht, wie sich der Primärenergiebedarf und das Treibhausgaspotenzial in Abhängigkeit der verwendeten Heizungstechnik verändern. Hierfür wurden für eine spezifische Bauweise verschiedene Heizungstechniken variiert.

Dabei zeigt sich beim Parameter Primärenergiebedarf am Beispiel der Hybridbauweise (die anderen Bauweisen bilden vergleichbare Ergebnisse ab): Je niedriger der Heizwärmebedarf des Gebäudes ist, desto weniger Einfluss haben die unterschiedlichen Heiztechniken auf den Primärenergiebedarf (Abbildung 15). Die Steigerung der Energieeffizienz selbst erzielt den größten Einspareffekt. Durch den geringen Anteil an nicht erneuerbarer Primärenergie während des Betriebs erreicht die Holzpellettheizung allerdings schon im EnEV-Standard einen geringen Gesamt-Primärenergiebedarf. Hierdurch resultiert das geringste relative Primärenergieeinsparungspotenzial vom EnEV- zum 15-kWh-Niveau von 13 %. Im Falle der Luft-Wasser-Wärmepumpe werden 29 % erreicht, 20 % bei der Wasser-Wasser-Wärmepumpe und 30 % bei der Gas-Brennwertheizung mit Solarthermie. Bei der Gas-Brennwertheizung mit kombinierter solarthermischer Warmwassererzeugung führen die solaren Energiegewinne zu einem niedrigeren Wärmebedarf, woraus eine relativ hohe Energieeinsparung resultiert.

Für die Betrachtung des Parameters Treibhausgaspotenzial decken sich die Ergebnisse qualitativ mit denen des Primärenergiebedarfs (Abbildung 15).



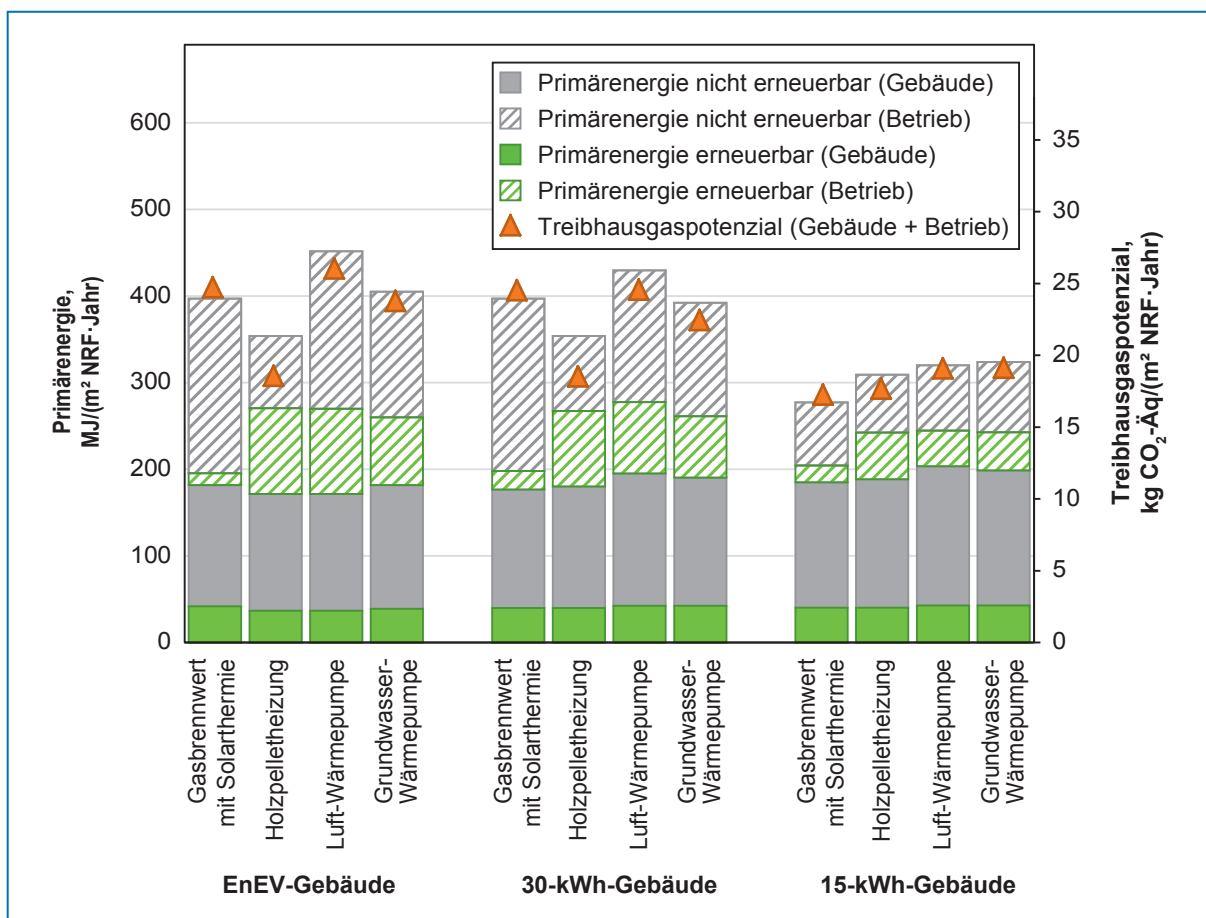


Abb. 15: Primärenergiebedarfswerte (Gebäude + Betrieb) sowie Treibhausgaspotenziale der einzelnen Heizungstechniken und Energieniveaus am Beispiel der Hybridbauweise

## 6.4 Sensitivitäten

Um zu überprüfen, wie stark die betrachteten Kriterien von Änderungen der Eingangsparameter abhängen, wurden Sensitivitätsanalysen durchgeführt. Dabei wurde der Einfluss folgender Sensitivitäten auf die Ökobilanz der Gebäude untersucht:

- Variation des Betrachtungszeitraums der Ökobilanz von 30, 50 und 80 Jahren
- Gebäude mit und ohne Kellergeschoss
- Einsatz unterschiedlicher Dämmstoffvarianten
- Anhebung der Raumtemperatur des Gebäudes von 20 °C auf 22 °C

### Variation des Betrachtungszeitraums

Entscheidend für die Gesamtbilanz eines Gebäudes ist – nach dem einmaligen Aufwand von Ressourcen und Primärenergie bei der Herstellung und Errichtung – die Nutzungsdauer der Primärkonstruktion und deren Komponenten. Eine möglichst lange Nutzungsdauer der Grundstruktur eines Gebäudes senkt den relativen Primärenergiebedarf (graue Energie) des Gebäudes, da sich die Energie zur Errichtung auf einen längeren Zeitraum verteilt. Um dies zu untersuchen, wurde eine Sensitivitätsanalyse mit einer Variation des Betrachtungszeitraums von 30, 50 und 80 Jahren am

Beispiel des EnEV-Gebäudes durchgeführt. Das Einsparpotenzial in Bezug auf den Gesamt-Primärenergiebedarf des Gebäudes wurde bei einer Verlängerung des Betrachtungszeitraums von 30 auf 50 Jahre je nach Bauweise und verwendeter Heizungstechnik mit durchschnittlich 27 % ermittelt. Bei der Verlängerung von 50 auf 80 Jahre kann unter Berücksichtigung größerer Reparaturarbeiten nochmals ein Einsparpotenzial von durchschnittlich 10 % erzielt werden (Abbildung 16).

Bei allen Bauweisen kann durch eine lange Nutzungsdauer der relative Primärenergiebedarf des Gebäudes deutlich gesenkt werden. Dies wird durch eine hohe Qualität der Ausführung, flexible Grundrisse und eine qualitativ hochwertige Planung erreicht. Des Weiteren sollte auf langlebige Produkte zurückgegriffen, ein angemessener Schutz vor Witterung – auch während der Bauphase – sowie eine hohe Luftdichtigkeit des Gebäudes zum Schutz der Bausubstanz angestrebt werden.

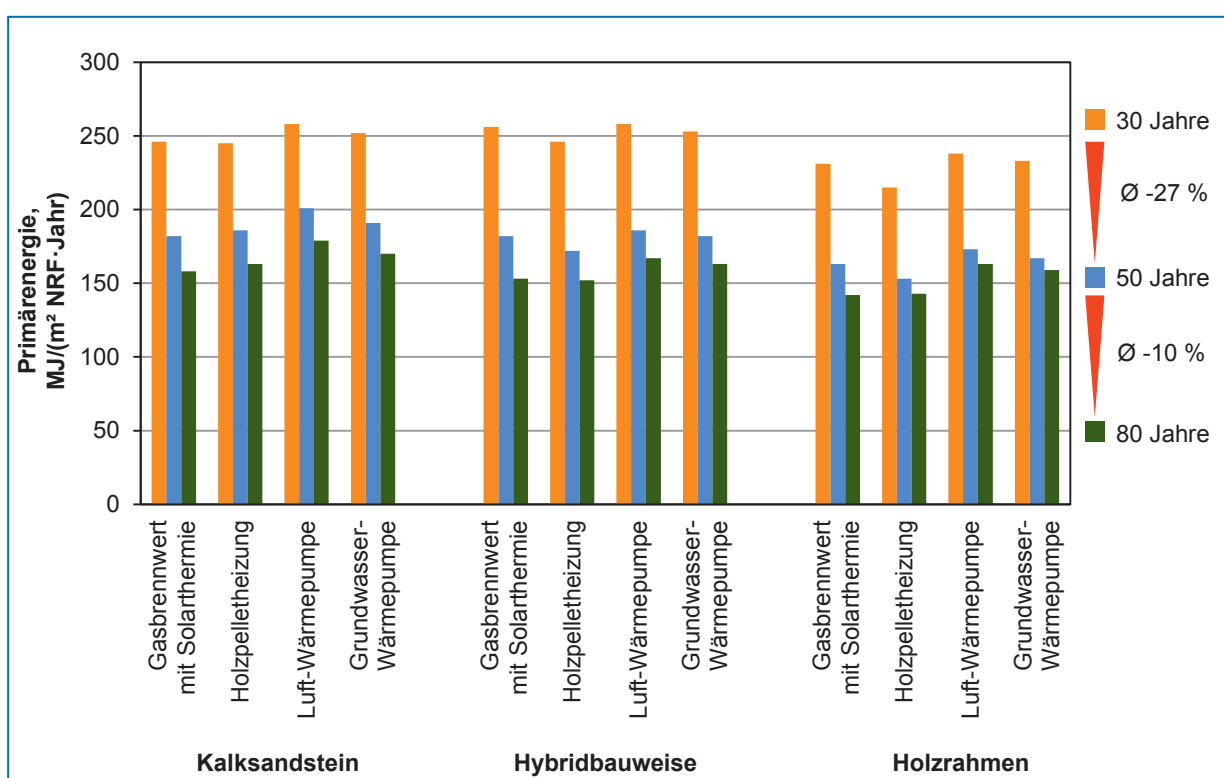


Abb. 16: Vergleich der Gesamt-Primärenergiebedarfswerte der einzelnen Bauweisen und Heizungstechniken über die Nutzungszeiträume von 30, 50 und 80 Jahren am Beispiel des EnEV-Standards

### Kellergeschoss

Des Weiteren wurde untersucht, wie sich ein zusätzlicher Keller auf die Ökobilanz auswirkt. Mit einem Kellergeschoss benötigt das Gebäude absolut gesehen mehr Energie bei der Errichtung. Allerdings steht somit auch mehr Nutzraumfläche zur Verfügung, sodass sich relativ betrachtet geringere Umweltbelastungen ergeben. Beim Verzicht eines Kellers muss bedacht werden, eventuell nachträglich errichtete Wohnersatzräume wie Schuppen oder Ähnliches in die ökologische Bewertung einfließen zu lassen. Daher sollte bereits bei der Planung ausführlich abgewogen werden, wie viel Nutzfläche über die gesamte Nutzungsdauer benötigt wird und ob somit ein Keller erforderlich ist oder nicht.

## Variation der Dämmstoffe

Um das Optimierungspotenzial der Ökobilanz der Dämmstoffe beurteilen zu können, wurden drei Sensitivitäten für die Bauweisen Kalksandstein und Holzrahmenbau durchgeführt. Hierbei wurden die Herstellung, Instandsetzung und Entsorgung des Gebäudes eines 15-kWh-Niveaus – ohne Betrieb – untersucht. Bei den beiden Bauweisen wurden eine standardmäßige Dämmung, eine Variante aus Dämmstoffen synthetischer Art und eine Variante aus nachwachsenden Rohstoffen (plus Schaumglasschotter für die Bodenplatte) gegenübergestellt.<sup>5</sup>

Die Varianten aus nachwachsenden Rohstoffen erreichen die niedrigsten Werte bei den Parametern Primärenergie und Treibhausgaspotenzial (Abbildung 17). Beim Parameter Überdüngungspotenzial zeigt die Dämmvariante aus nachwachsenden Rohstoffen etwas höhere Werte. Die Dämmvariante aus synthetischen Rohstoffen weist je nach Bauweise ein um den Faktor 2–5 höheres Sommersmogpotenzial auf als die Variante mit nachwachsenden Rohstoffen. Insgesamt haben die errechneten Werte allerdings ein sehr niedriges Niveau, sodass deren Unterschiede für eine absolute Umweltbetrachtung keine große Relevanz darstellen.

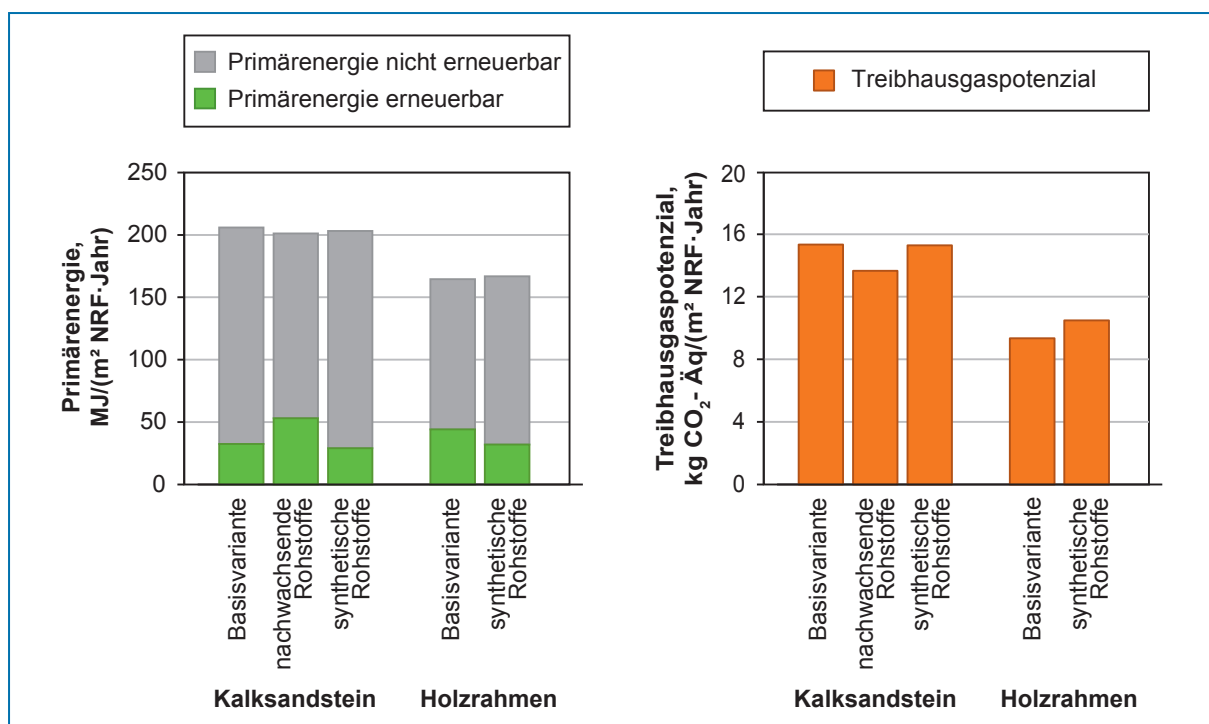


Abb. 17: Primärenergiebedarfswerte und Treibhausgaspotenziale der verschiedenen Dämmvarianten am Beispiel der Kalksandstein- und Holzrahmenbauweise beim 15-kWh-Niveau ohne Betrieb

<sup>5</sup>Eine vollständige Auflistung der verwendeten Materialien finden Sie im Anhang auf Seite 23.

## Raumtemperatur

Als weitere Sensitivitätsanalyse wurde die Sollraumtemperatur von 20 °C auf 22 °C angehoben. Abbildung 18 gibt einen Überblick über die Anstiege des Heizwärmebedarfs bei Erhöhung der Raumtemperatur. Zu Vergleichszwecken wird das Bestandsgebäude den anderen Energieeffizienzstandards gegenübergestellt.

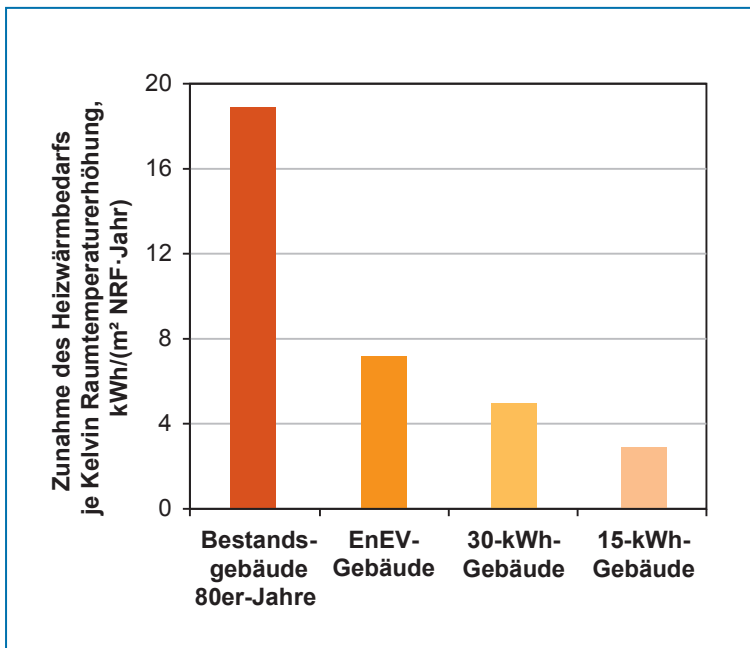


Abb. 18: Zunahme des Heizwärmebedarfs je Kelvin Raumtemperaturerhöhung der verschiedenen energetischen Niveaus (Durchschnitt über alle Bauweisen)

Relativ gesehen steigt die Zunahme des Heizwärmebedarfs, je höher das Energieeffizienzniveau des Gebäudes ist. Der absolute Wert hingegen sinkt stetig durch eine Energieeffizienzsteigerung. Für das Bestandsgebäude bedeutet eine Raumtemperaturerhöhung um 1 Kelvin eine Zunahme des Heizwärmebedarfs von rund 19 kWh/(m²·a), die höher liegt als der jährliche Gesamtheizwärmebedarf eines 15-kWh-Gebäudes.

## 7 Qualitative Aspekte

### 7.1 Sommerlicher Komfort

Mit der thermisch-dynamischen Simulation konnten ebenfalls Aussagen über den sommerlichen thermischen Komfort getroffen werden. Dabei wurden eine Verschattung und eine Nachtlüftung, um eine sommerliche Überwärmung des Gebäudes zu vermindern, in die Simulation integriert. Es hat sich gezeigt, dass massive Gebäude aufgrund einer hohen wirksamen thermischen Masse (Temperaturpufferung) eine deutlich geringere Überwärmung während der Sommermonate aufweisen (Abbildung 19). Als Grenztemperatur gelten hierbei 26 °C. Auch die Hybridbauweise weist vergleichsweise ein sehr niedriges Überwärmungspotenzial auf. Steigt das Dämmniveau und damit der Effizienzstandard des Gebäudes, kann die Zahl der flächengewichteten Überwärmungsstunden über 26 °C drastisch minimiert und der Grenzwert nach DIN 4108-2 von 1200 Kh/a für alle Bauweisen unterschritten werden. Hierfür sind neben thermisch massiven Bauteilen, die als Wärmepuffer dienen, ebenso ein außenliegender Sonnenschutz mit einem Sonnenverminderungsfaktor von maximal 0,3 (wie z. B. ein Rollladen) und eine Entwärmung mittels Außenluft nötig, die durch eine erhöhte nächtliche Luftwechselrate erreicht werden kann.

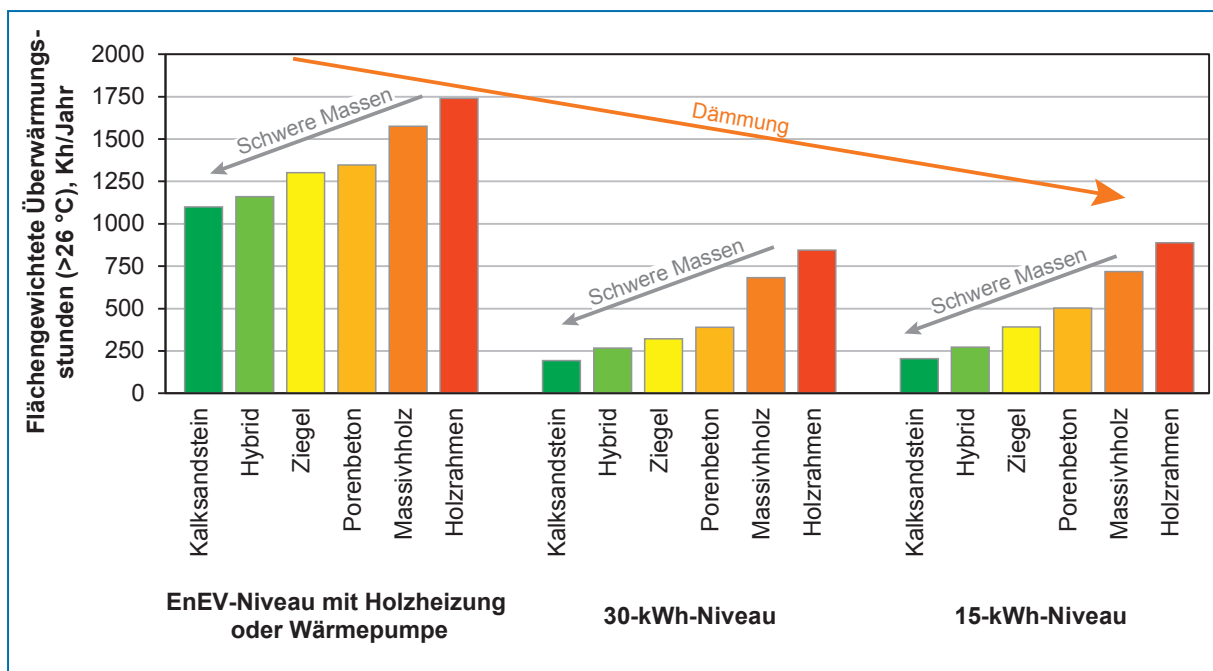


Abb. 19: Flächengewichtete Überwärmungsstunden der einzelnen Bauweisen und Energieniveaus

## 7.2 Weitere Aspekte

Im Haus kann **Schall** bei Überschreitung bestimmter Schwellenwerte als störend empfunden werden. Durch eine schwere Bauweise von Wänden und Decken (Ziegel, Kalksandstein, Hybridbauweise) lässt sich der Luftschall in der Regel gut in seiner Ausbreitung begrenzen, sodass hier ein über die Mindestanforderungen hinausgehender Schallschutz erreicht werden kann. Dagegen sind im Leichtbau (Holzständer- oder Massivholzbauweise) oft erhebliche zusätzliche Maßnahmen notwendig, die einen Materialmehraufwand darstellen. So kann die Zwischendecke zwischen Erdgeschoss und Obergeschoss zur Schallreduktion mit einer zusätzlichen Beschwerungsschicht aus Beton, Lehm oder Schotter versehen werden.



Alle Bauweisen erfüllen die gesetzlichen Anforderungen an den **Brandschutz**. Bauweisen aus Stein erfüllen die Feuerwiderstandsdauer von 90 Minuten (F 90), Holzkonstruktionen erreichen normalerweise eine Feuerwiderstandsdauer von 30 Minuten (F 30). Gebäudeversicherer erheben bei Gebäuden in Holzbauweise in der Regel höhere Prämien als für mineralische Gebäudekonstruktionen.

Um **Schadstoffe in der Raumluft** gering zu halten, sollten die verwendeten Produkte möglichst umweltfreundlich und gesundheitlich unbedenklich sein. So ist darauf zu achten, dass aus Holzprodukten Formaldehyd und andere flüchtige organische Verbindungen (VOC) entweichen können, vor allem wenn diese mit Lacken und Leimen behandelt wurden. Aber auch bei der Steinbauweise sollte darauf geachtet werden, dass die eingesetzten Putze, Kleber und Dichtungen nicht ausgasen. Dabei kann auf zertifizierte Bauprodukte, die mit dem „Blauen Engel“ gekennzeichnet sind, zurückgegriffen werden.



## 8 Ökonomie

In einer **Lebenszykluskostenanalyse** wurden für den EnEV-Standard die unterschiedlichen Herstellungs- und Folgekosten verschiedener Bauweisen über einen Zeitraum von 50 Jahren betrachtet und verglichen. Die Kosten für Herstellung, Instandsetzung, Betrieb, Wartung, Rückbau und Entsorgung wurden dabei anhand der Barwertmethode beziehungsweise in Anlehnung an die Methodik der Zertifizierungssysteme DGNB<sup>6</sup>, NaWoh<sup>7</sup> und BNK<sup>8</sup> berücksichtigt. Als Rahmenbedingungen der Berechnung wurden festgelegt: Barwertzins 1 %, Baukostensteigerung 1 %, Energiepreissteigerung 4 %. Untersucht wurden die vier Bauweisen Ziegel-, Kalksandstein-, Hybrid- und Holzrahmenbauweise, die das EnEV-Energieniveau erfüllen und als Heizungstechnik eine Holzpelletheizung installiert haben.

Die Kosten der einzelnen Bauweisen liegen allesamt in der gleichen Größenordnung. Lediglich die Kalksandsteinbauweise weist erhöhte Kosten über den Betrachtungszeitraum von 50 Jahren auf, die ausschließlich dem kalkulatorisch einmaligen Austausch des Wärmeverbundsystems nach 40 Jahren geschuldet ist. Im Falle längerer Haltbarkeit des WDVS tritt dieser Effekt nicht auf (Abbildung 20)<sup>9</sup>.

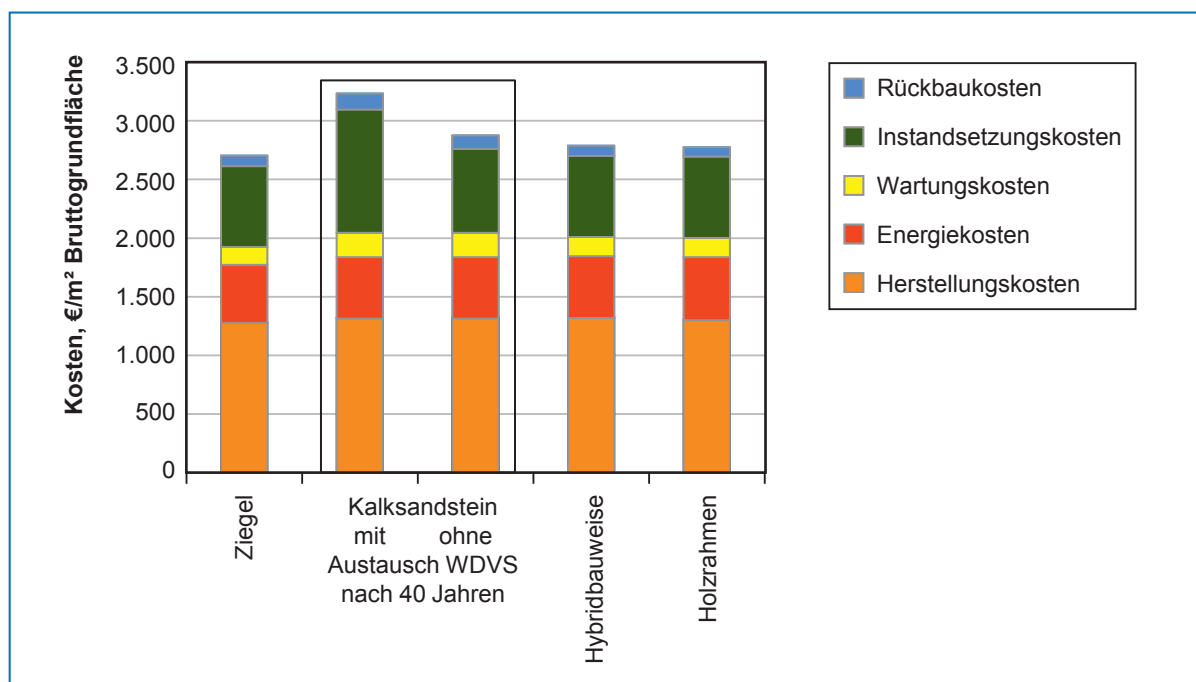


Abb. 20: Investitionsbeträge ausgewählter Bauweisen im EnEV-Standard über eine Nutzungsdauer von 50 Jahren am Beispiel der Holzpelletheizung

<sup>6</sup> „Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen“ (DGNB) in der Fassung der Steckbriefe von 2015

<sup>7</sup> „Bewertungssystem Nachhaltiger Wohnungsbau“ (NaWoh) von 2011

<sup>8</sup> „Bewertungssystem Nachhaltiger Kleinwohnhausbau“ (BNK) von 2016

<sup>9</sup> Erfahrungsgemäß werden längere Nutzungsdauern von WDVS-Systemen erreicht, siehe zum Beispiel Studie „Beurteilung der Langzeitbewahrung von ausgeführten Wärmedämmverbundsystemen“, Fraunhofer IBP-Bericht HTB-06/2015



## 9 Zusammenfassung

Jede Bauweise besitzt sowohl Stärken als auch Schwächen, sodass weder die Massiv- noch die Leichtbauweise alleinig favorisiert werden kann.

**Schwere massive Bauformen** erreichen durch ihre hohe thermisch wirksame Masse eine hohe Wärmepufferwirkung. Dadurch kann der Heizwärmebedarf in einer Größenordnung von 10 % verringert sowie eine sommerliche Überwärmung des Gebäudes stark reduziert werden. Ebenso lassen sich ein hohes Schallschutzniveau und ein gutes Brandschutzverhalten einfach erreichen.

Die Vorteile der leichteren **Holzbauweisen** liegen vor allem in der Energieeinsparung bei der Herstellung und Errichtung des Gebäudes (graue Energie) sowie den geringeren Emissionen im Bereich Treibhausgasausstoß, Versauerung, Eutrophierung und Sommersmogbildung.

Die Ergebnisse zeigen ein vielversprechendes Potenzial der **Hybridbauweise** auf, das viele Vorteile der beiden Varianten vereint. So können in der Herstellung der Energieeinsatz und damit die Umweltbelastungen reduziert, aber auch der Heizwärmebedarf während des Betriebes gesenkt werden.

Allgemein wurde bestätigt, dass eine Steigerung der **Energieeffizienz** eine Reduktion der Umweltauswirkungen im Lebenszyklus des Gebäudes zur Folge hat, weshalb diese anzustreben ist. Der energetische Mehraufwand bei der Herstellung, um eine erhöhte Effizienz des Gebäudes zu erreichen, wird typischerweise durch Einsparungen während der Nutzungsdauer bei den Parametern Primärenergieaufwand und Treibhausgaspotenzial deutlich überkompensiert. Ebenfalls lässt sich hierdurch der Wohnkomfort steigern, insbesondere durch eine geringe Überwärmung des Gebäudes im Sommer.

Außerdem hat sich gezeigt, dass bei einer hohen Energieeffizienz die **Wahl der Heizungstechnik** eine untergeordnete Rolle spielt. Bei Holzheizungen sollten allerdings die höheren Staubemissionen bedacht werden, die nicht Gegenstand der Untersuchungen in dieser Studie waren.

Vor allem durch eine **lange Nutzungsdauer** kann der relative Primärenergiebedarf gesenkt und die Ökobilanz des Gebäudes verbessert werden. Daher sollte auf eine qualitativ hohe Ausführung und eine gründlich überdachte Planung des Gebäudes (z. B. mit variablen Grundrissen) für einen Nutzungszeitraum von 50 Jahren und mehr geachtet werden.



## 10 Anhang

Übersicht über die Dämmstoffe der einzelnen Dämmvarianten für die Konstruktionen der Kalksandsteinbauweise

| Bauweise Kalksandstein | Standardausführung  | Synthetische Dämmstoffe | Dämmstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen |
|------------------------|---------------------|-------------------------|--|
| Bodenplatte unterhalb  | Schaumglasschotter  | Polystyrol XPS          | Schaumglasschotter                       |
| Fußboden Holz          | Holzfaserplatten    | Polystyrol EPS          | Holzfaserplatten                         |
| Fußboden Estrich       | Mineralwolleplatten | Polystyrol EPS          | Korkplatten                              |
| Außenwand WDVS         | Polystyrol EPS      | Polystyrol EPS          | Holzfaserplatten                         |
| Decke über OG          | Mineralwolleplatten | Polystyrol EPS          | Zellulosedämmung                         |

Übersicht über die Dämmstoffe der einzelnen Dämmvarianten für die Konstruktionen der Holzrahmenbauweise

| Bauweise Holzrahmenbau | Standardausführung | Synthetische Dämmstoffe | Dämmstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen |
|------------------------|--------------------|-------------------------|--|
| Bodenplatte unterhalb  | Schaumglasschotter | Polystyrol XPS          | -  |
| Fußboden Holz          | Holzfaserplatten   | Polystyrol EPS          | -  |
| Fußboden Estrich       | Korkplatten        | Polystyrol EPS          | -  |
| Außenwand Hohlraum     | Zellulosedämmung   | Mineralwolle            | -  |
| Außenwand WDVS         | Holzfaserplatten   | Polystyrol EPS          | -  |
| Decke über OG          | Zellulosedämmung   | Polystyrol EPS          | -  |





