

Karsten Tichelmann, Annekatriin Koch

## **energy<sup>+</sup>Home2.0 – Effizienzhaus Plus im Gebäudebestand**

**Vergleichende technologische, ökologische  
und ökonomische Untersuchung der  
Umwandlung von identischen, bewohnten  
Geschosswohnungsbauten**

F 3107

Bei dieser Veröffentlichung handelt es sich um die Kopie des Abschlussberichtes einer vom Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR) im Rahmen der Forschungsinitiative »Zukunft Bau« geförderten Forschungsarbeit. Die in dieser Forschungsarbeit enthaltenen Darstellungen und Empfehlungen geben die fachlichen Auffassungen der Verfasser wieder. Diese werden hier unverändert wiedergegeben, sie geben nicht unbedingt die Meinung des Zuwendungsgebers oder des Herausgebers wieder.

Dieser Forschungsbericht wurde mit modernsten Hochleistungskopierern auf Einzelanfrage hergestellt.

Die Originalmanuskripte wurden reprototechnisch, jedoch nicht inhaltlich überarbeitet. Die Druckqualität hängt von der reprototechnischen Eignung des Originalmanuskriptes ab, das uns vom Autor bzw. von der Forschungsstelle zur Verfügung gestellt wurde.

© by Fraunhofer IRB Verlag

2019

ISBN 978-3-7388-0358-7

Vervielfältigung, auch auszugsweise,  
nur mit ausdrücklicher Zustimmung des Verlages.

**Fraunhofer IRB Verlag**

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau

Postfach 80 04 69

70504 Stuttgart

Nobelstraße 12

70569 Stuttgart

Telefon 07 11 9 70 - 25 00

Telefax 07 11 9 70 - 25 08

E-Mail [irb@irb.fraunhofer.de](mailto:irb@irb.fraunhofer.de)

[www.baufachinformation.de](http://www.baufachinformation.de)

[www.irb.fraunhofer.de/tauforschung](http://www.irb.fraunhofer.de/tauforschung)

---

# energy<sup>+</sup>Home2.0

## Effizienzhaus Plus im Gebäudebestand

Vergleichende technologische, ökologische und ökonomische Untersuchung der Umwandlung von identischen, bewohnten Geschosswohnungsbauten

---



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DARMSTADT

---

## Schlussbericht

*TU Darmstadt, Fachbereich Architektur,  
Fachgebiet Tragwerksentwicklung und Bauphysik,  
Prof. Dr. Karsten Tichelmann*

*Verfasser      Prof. Dr. Karsten Tichelmann  
                  Annekatriin Koch M.Sc.*

*Aktenzeichen    SWD-10.08.18.7-15.54*

*Der Forschungsbericht wurde mit Mitteln der Forschungsinitiative Zukunft  
Bau des Bundesinstituts für Bau-, Stadt- und Raumforschung gefördert.  
Die Verantwortung für den Inhalt des Berichtes liegt beim Autor.*

**FORSCHUNGSINITIATIVE**  
**ZukunftBAU**

---

---

Marc Schwarz  
Immobilien GmbH



TICHELMANN & BARILLAS  
TSB Ingenieurgesellschaft mbH



---

## Schlussbericht

*energy+Home2.0 - Effizienzhaus Plus im Gebäudebestand*

## Zuwendungsempfänger

*TU Darmstadt, FB Architektur, Fachgebiet Tragwerksentwicklung und Bauphysik*

## Bearbeitung

*Autoren*

*Prof. Dr. Karsten Tichelmann*

*Annekatriin Koch, M.Sc.*

## Kontakt

*TU Darmstadt, Fachbereich Architektur, Fachgebiet Tragwerksentwicklung und Bauphysik, Prof. Dr. Karsten Tichelmann*

*El-Lissitzky-Straße 1*

*D-64287 Darmstadt*

*tel +49 [0]6151 16-755-00*

*fax +49 [0]6151 16-755-10*

*info@twe.tu-darmstadt.de*

*a.koch@twe.tu-darmstadt.de*

*www.twe.architektur.tu-darmstadt.de*

## Aktenzeichen

*SWD-10.08.18.7-15.54*

## Vorhabensbezeichnung

*energy+Home2.0 - Effizienzhaus Plus im Gebäudebestand - Vergleichende technologische, ökologische und ökonomische Untersuchung zur Umwandlung von zwei identischen, bewohnten Geschosswohnungsbauten*

## Laufzeit des Vorhabens

*09.11.2015 bis 31.07.2018*



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DARMSTADT

FORSCHUNGSINITIATIVE  
**Zukunft BAU**

---

# Inhaltsverzeichnis

## 1. Einführung

|                                |    |
|--------------------------------|----|
| 1.1 Ausgangsanalyse.....       | 12 |
| 1.2 Ziele .....                | 13 |
| 1.3 Methodisches Vorgehen..... | 15 |

## 2. Grundlagenermittlung

|  |    |
|--|----|
| 2.1 Kirchtannensiedlung Darmstadt-Eberstadt.....                         | 21 |
| 2.2 Messungen .....  | 24 |
| 2.2.1. Thermografie .....  | 24 |
| 2.2.2. U-Wert-Messung.....   | 27 |
| 2.2.3. Energieverbrauch .....  | 31 |
| 2.3 Bestandsaufnahme Fritz-Dächert-Weg 52-54 .....                       | 32 |
| 2.4 Bestandsaufnahme Fritz-Dächert-Weg 56-58 .....                       | 44 |
| 2.5 Schlussfolgerung - Potenziale und Hemmnisse im bewohnten Bestand ... | 51 |

## 3. Entwicklung und energetische Untersuchung von drei Szenarien

|  |    |
|--|----|
| 3.1 Anforderungsprofile .....                              | 59 |
| 3.1.1. Energieeinsparverordnung EnEV 2016 .....            | 59 |
| 3.1.2. Effizienzhaus Plus nach BMU .....                   | 60 |
| 3.2 Sanierung nach Energieeinsparverordnung .....          | 62 |
| 3.3 Sanierung zum Effizienzhaus Plus .....                 | 74 |
| 3.4 Aufstockung und Sanierung zum Effizienzhaus Plus ..... | 87 |

## 4. Ökologische Untersuchung im Lebenszyklus

|  |     |
|--|-----|
| 4.1 Grundlagen und Randbedingungen ..... | 101 |
| 4.1.1. Wissenschaftliche Methode .....   | 101 |

---

---

|  |     |
|--|-----|
| 4.1.2. Untersuchungsrahmen .....                                     | 102 |
| 4.2 Der unsanierte Bestand als Ausgangspunkt der Untersuchungen..... | 107 |
| 4.2.1. Sachbilanz .....  | 107 |
| 4.2.2. Wirkungsabschätzung.....                                      | 108 |
| 4.2.3. Bewertung.....  | 110 |
| 4.3 Sanierung nach Energieeinsparverordnung 2016.....                | 112 |
| 4.3.1. Sachbilanz .....  | 112 |
| 4.3.2. Wirkungsabschätzung.....                                      | 117 |
| 4.3.3. Bewertung.....  | 121 |
| 4.4 Sanierung zum Effizienzhaus .....                                | 123 |
| 4.4.1. Sachbilanz .....  | 123 |
| 4.4.2. Wirkungsabschätzung.....                                      | 129 |
| 4.4.3. Bewertung.....  | 136 |
| 4.5 Aufstockung und Sanierung zum Effizienzhaus Plus .....           | 137 |
| 4.5.1. Sachbilanz .....  | 137 |
| 4.5.2. Wirkungsabschätzung.....                                      | 147 |
| 4.5.3. Bewertung.....  | 154 |

## **5. Ökonomische Untersuchung im Lebenszyklus**

|  |     |
|--|-----|
| 5.1 Grundlagen und Randbedingungen .....                             | 159 |
| 5.1.1. Wissenschaftliche Methode .....                               | 159 |
| 5.1.2. Untersuchungsrahmen .....                                     | 160 |
| 5.2 Der unsanierte Bestand als Ausgangspunkt der Untersuchungen..... | 166 |
| 5.2.1. Herstellung.....  | 166 |
| 5.2.2. Nutzung.....  | 166 |
| 5.2.3. Wirkungsabschätzung.....                                      | 167 |

---

---

---

|   |     |
|---|-----|
| 5.3 Sanierung nach Energieeinsparverordnung EnEV .....    | 168 |
| 5.3.1. Herstellung.....                                   | 168 |
| 5.3.2. Nutzung.....                                       | 169 |
| 5.3.3. Wirkungsabschätzung.....                           | 169 |
| 5.3.4. Bewertung.....                                     | 171 |
| 5.4 Sanierung zum Effizienzhaus Plus.....                 | 172 |
| 5.4.1. Herstellung.....                                   | 172 |
| 5.4.2. Nutzung.....                                       | 173 |
| 5.4.3. Wirkungsabschätzung.....                           | 173 |
| 5.4.4. Bewertung.....                                     | 175 |
| 5.5 Aufstockung und Sanierung zum Effizienzhaus Plus..... | 177 |
| 5.5.1. Herstellung.....                                   | 177 |
| 5.5.2. Nutzung.....                                       | 178 |
| 5.5.3. Wirkungsabschätzung.....                           | 179 |
| 5.5.4. Bewertung.....                                     | 180 |

## **6. Effizienzsteigerung**

|                                   |     |
|-----------------------------------|-----|
| 6.1 Integrale Fassade .....       | 185 |
| 6.2 PV-Luftkollektorfassade ..... | 190 |
| 6.3 PV-Batteriespeicher .....     | 192 |
| 6.4 Elektromobilität.....         | 204 |
| 6.5 Nutzerinterface .....         | 207 |
| 6.6 Energy Plot .....             | 210 |

## **7. Schlussbetrachtung**

|  |     |
|--|-----|
| 7.1 Gegenüberstellung und Bewertung der Ergebnisse aus den energetischen, ökologischen und ökonomischen Untersuchungen ..... | 217 |
|--|-----|

---

---

|   |     |
|---|-----|
| 7.1.1. Energetische Qualität .....  | 217 |
| 7.1.2. Ökologische Qualität.....  | 220 |
| 7.1.3. Ökonomische Qualität .....   | 227 |
| 7.1.4. Fazit .....  | 232 |
| 7.2 Potenzialanalyse für die Klimaziele in Deutschland .....  | 234 |
| 7.2.1. Nachweis der Übertragbarkeit auf Geschosswohnungsbauten<br>der Baualtersklasse 1949 bis 1978 ..... | 234 |
| 7.2.2. Potenzialanalyse .....   | 237 |
| 7.3 Resumee und Perspektive.....  | 239 |

## **8. Abbildungs- und Tabellenverzeichnis**

## **9. Literaturverzeichnis**

---

---

## Zusammenfassung

Die Auswirkungen des globalen, anthropogen verursachten Klimawandels werden auch in Deutschland immer spürbarer. Die Bundesregierung versucht ihren Beitrag zur Bekämpfung der Klimafolgen zu leisten. Dazu gehört das ehrgeizige Ziel, bis zum Jahr 2050 einen klimaneutralen Gebäudebestand umzusetzen (EU 2010). Immer mehr Studien weisen mittlerweile darauf hin, dass die bislang ergriffenen Maßnahmen dafür jedoch nicht ausreichen (DENA 2015).

Im Neubau zeichnet sich der Trend zum Effizienzhaus Plus bereits ab. Aber ist der Effizienzhaus Plus Standard im bewohnten Geschosswohnungsbau wirtschaftlich und ökologisch sinnvoll realisierbar? Welche Strategien sind zum Erreichen des Standards notwendig? Welche Synergiepotenziale liegen im Hinblick auf den angespannten Wohnungsmarkt in der Verbindung des Effizienzhaus Plus Standards mit einer Nachverdichtung? Was bedeuten die Erkenntnisse im Bezug auf die deutschen Klimaziele bis zum Jahr 2050?

Zur wissenschaftlichen Beantwortung dieser Fragestellungen werden drei Szenarien für zwei identische Geschosswohnungsbauten der Baualtersklasse 1949 bis 1978 auf einem Grundstück in Darmstadt-Eberstadt erarbeitet:

- Sanierung nach Energieeinsparverordnung 2016
- Sanierung zum Effizienzhaus Plus nach BMU
- Aufstockung und Sanierung zum Effizienzhaus Plus nach BMU

Aufbauend auf einer ausführlichen Bestandsaufnahme werden energetische, ökologische und ökonomische Lebenszyklusanalysen durchgeführt. Parallel werden Möglichkeiten zur Steigerung der Effizienz evaluiert. Darauf aufbauend wird die Übertragbarkeit auf vergleichbare Gebäude nachgewiesen und das Potenzial hinsichtlich der Klimaziele im Jahr 2050 ausgelotet.

Die energetischen Untersuchungen weisen nach, dass der Effizienzhaus Plus Standard im bewohnten Geschosswohnungsbau erreichbar ist. Dabei führt die zusätzliche Berücksichtigung der anzusetzenden Pauschale für Haushaltsstrom dazu, dass in Verbindung mit einer Aufstockung eine dachintegrierte Photovoltaikanlage nicht ausreicht. Auch die Fassade muss dann energetisch aktiviert werden. Insgesamt erreicht die Sanierung zum Effizienzhaus Plus einen Jahres-Primärenergiebedarf von  $-63 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$  und einen Jahres-Endenergiebedarf von  $-15 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ . Die Aufstockung und Sanierung zum Effizienzhaus Plus erzielt einen Jahres-Primärenergiebedarf von  $-38 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$  und einen Jahres-Endenergiebedarf von  $-8 \text{ kWh}/(\text{m}^2\text{a})$ .

Nicht nur end- und primärenergetisch werden Überschüsse erzeugt. Die Guthabenschriften aus dem erneuerbar erzeugten Strom schlagen sich auch positiv in den ökologischen und ökonomischen Lebenszyklusbilanzen nieder: Die verursachten Umweltwirkungen können teilweise sogar mehrfach wieder ausge-

---

glichen werden. Das Treibhauspotenzial wird beispielsweise von ursprünglich 487 kg CO<sub>2</sub>-Äq./(m<sup>2</sup><sub>NGF</sub>a) auf -303 kg CO<sub>2</sub>-Äq./(m<sup>2</sup><sub>NGF</sub>a) bei der Sanierung zum Effizienzhaus Plus und auf -268 kg CO<sub>2</sub>-Äq./(m<sup>2</sup><sub>NGF</sub>a) in Verbindung mit der Aufstockung gesenkt.

Die energiebedingten Mehrkosten für den Effizienzhaus Plus Standard liegen zwischen 187 bis 264 €<sub>netto</sub>/m<sup>2</sup><sub>BGF</sub> und sind damit etwa 60 bis 70 % höher als bei der Sanierung nach Energieeinsparverordnung. Gleichwohl erreicht der Standard durch das Minimum an Energiekosten die höchsten Kapitalwerte von bis zu 730 €<sub>netto</sub>/m<sup>2</sup><sub>BGF</sub>.

Alles in allem kann der Effizienzhaus Plus Standard sowohl wirtschaftlich als auch ökologisch sinnvoller Standard für den bewohnten Geschosswohnungsbau nachgewiesen werden. Bedeutende Vorteile und Potenziale können in der Verbindung mit einer Nachverdichtung erzielt werden. Angesichts der fortschreitenden Optimierung und Entwicklung neuer Technologien kann davon ausgegangen werden, dass der Weg zum Effizienzhaus Plus im bewohnten Geschosswohnungsbau weiter geebnet wird.

Energieeffizientes Bauen im und mit dem Bestand muss dabei über die Grenzen von Architektur und Technik hinausgehen. Dies zeigt sich vor allem an den Potenzialen, die im Rahmen der Effizienzsteigerung untersucht werden.

Zukunftsorientierte und nachhaltige Architektur entsteht nicht ungeachtet von Energie, Ökologie und Ökonomie. Auch umgekehrt sind Gebäude mit optimalen energetischen, ökologischen und ökonomischen Bilanzen, aber ohne einen Anspruch auf architektonische Qualität weder zukunftsorientiert noch nachhaltig, da sie von den Menschen nicht akzeptiert und damit nicht dauerhaft bewohnt und gepflegt werden.



---

## 1. Einführung

**Einführung**

---

## 1.1 Ausgangsanalyse

---

Schäden durch Stürme, Starkregen und Hochwasser, steigende Jahresdurchschnittstemperaturen und Hitzewellen ... Die Auswirkungen des globalen, anthropogen verursachten Klimawandels werden auch in Deutschland immer spürbarer. Die Bundesregierung versucht mit einer Vielfalt an Leitbildern und ambitionierten Instrumenten ihren Beitrag zur Bekämpfung der Klimafolgen zu leisten. Dazu gehört auch das ehrgeizige Ziel, bis zum Jahr 2050 einen klimaneutralen Gebäudebestand umzusetzen (EU 2010). Der Primärenergiebedarf soll innerhalb der nächsten 33 Jahre um 80 % gegenüber 2008 reduziert werden. Die Treibhausgasemissionen sollen um 80 bis 95 % gegenüber 1990 reduziert werden (BMUB 2016b). Immer mehr Studien weisen jedoch mittlerweile darauf hin, dass die bislang ergriffenen Maßnahmen nicht ausreichen, um einige der Meilensteine zu erfüllen (DENA 2015).

Ein entscheidendes Potenzial liegt in der Senkung des Wärmebedarfs von Gebäuden der Baualtersklasse 1949 bis 1978. Fast zwei Drittel des deutschen Gebäudebestands sind vor 1978 und somit vor Inkrafttreten der ersten Wärmeschutzverordnung, errichtet worden (siehe Abb. 1). Sie sind für den Großteil des Wärmeverbrauchs und damit für bedeutende Umweltbelastungen verantwortlich. Pro Jahr werden jedoch nicht einmal 1 % der vorhandenen Gebäude ertüchtigt.

Sowohl die Praxis als auch die Fachliteratur und Programme legen ihren Fokus indessen stärker auf den Neubau. Die Anforderungen bei der Planung und Umsetzung sind bei Weiterentwicklung des Bestands jedoch häufig wesentlich höher als beim Neubau. Der bereits sehr dicht bebaute und teure, städtische Raum begrenzt ohnehin das Erschließen neuer Bauflächen. Angesichts des zunehmenden Wohnraumbedarfs von jährlich etwa 400.000 und einer nur vergleichsweise geringen Neubaurate von 0,7 %, rücken die Potenziale, die in der Nachverdichtung des Gebäudebestands liegen, ebenfalls in den Fokus (TICHELMANN 2016).



Abb. 1: Zwischen 1949 bis 1978 war in Deutschland die intensivste Bautätigkeit

---

## 1.2 Ziele

---

Ziel des Forschungsvorhabens ist die wissenschaftliche Untersuchung zweier identischer Geschosswohnungsbauten der Baualtersklasse 1949 bis 1978 im Hinblick auf die energetischen, ökologischen und ökonomischen Auswirkungen der Sanierungsszenarien der Energieeinsparverordnung im Vergleich zum Effizienzhaus Plus Standard und im Vergleich zu einer Aufstockung und Sanierung zum Effizienzhaus Plus. Neben dem Nachweis der technischen Anpassungsfähigkeit soll zudem der Nachweis einer signifikanten baukulturellen Verbesserung des Gebäudebestandes im Effizienzhaus Plus Standard erbracht werden.

Eine wesentliche Fragestellung ist dabei unter anderem, ob eine Weiterentwicklung zum Effizienzhaus Plus im bewohnten bzw. teilbewohnten Zustand im Geschosswohnungsbau umsetzbar ist. Mit welchen Strategien lässt er sich wirtschaftlich sinnvoll und ökologisch nachhaltig darstellen? Liegen Synergieeffekte in der Verbindung des Effizienzhaus Plus Standards mit einer Nachverdichtung in Form einer Aufstockung?

Die bisherigen Erkenntnisse und Entwicklungen der erfolgreichen Sanierung eines Bestandsgebäudes zum Effizienzhaus Plus „energy+Home1.0“ (TICHELMANN 2011) sollen erstmals auf den Geschosswohnungsbau der Baualtersklasse 1949 bis 1978 übertragen und die Umsetzbarkeit in Form eines Demonstrativ-Bauvorhabens, dem energy+Home2.0 in der Fritz-Dächert-Siedlung in Darmstadt-Eberstadt konzeptioniert und wissenschaftlich vorbereitet werden. Das Foto in Abb. 2 zeigt die unsanierten Untersuchungsgebäude im Fritz-Dächert-Weg 52 bis 58.



Abb. 2: Die Untersuchungsgebäude im Fritz-Dächert-Weg 52-58

---

Die Darstellung des Sanierungskonzepts sowie die Gegenüberstellung der Ergebnisse aus den energetischen, ökologischen und ökonomischen Untersuchungen der Szenarien sollen im Rahmen dieses Forschungsprojekts dokumentiert werden, um als allgemeiner Planungsleitfaden für zukünftige Weiterentwicklungen hin zu klimaneutralen Gebäuden zu dienen.

Eine wesentliche Bedeutung liegt neben der energetischen Optimierung hin zum Effizienzhaus Plus in der architektonischen Metamorphose des Gebäudebestands als Beitrag zur baukulturellen Aufwertung des Wohnquartiers.

---

### 1.3 Methodisches Vorgehen

---

Am Beispiel des energy+Home2.0 wird gezeigt, wie für einen repräsentativen Geschosswohnungsbau der Baualtersklasse 1949 bis 1978 mit Erdgasversorgung eine CO<sub>2</sub>-neutrale Energieversorgung wirtschaftlich umsetzbar ist und mit der Schaffung von neuem Wohnraum ohne zusätzliche Flächenversiegelung verbunden werden kann. Dabei geht eine architektonische Aufwertung der äußeren Erscheinung und der inneren Struktur mit der Umwandlung in ein emissionsfreies und zeitgemäßes Wohngebäude einher. Anhand von zwei bewohnten, bautypologisch repräsentativen Geschosswohnungsbauten (Bj. 1956) werden drei verschiedene Szenarien entwickelt und untersucht:

- Sanierung nach Energieeinsparverordnung
- Sanierung zum Effizienzhaus Plus nach BMU
- Aufstockung und Sanierung zum Effizienzhaus Plus nach BMU

Bei positiven Ergebnissen sollen die Maßnahmen am Referenzgebäude im Fritz-Dächert-Weg 56 bis 58 in Darmstadt-Eberstadt als verallgemeinerungsfähiges Demonstrativprojekt umgesetzt werden. Das Projekt wird anhand folgender Arbeitspakete durchgeführt:

- [AP 1] Grundlagenermittlung
- [AP 2] Entwicklung und energetische Untersuchung von drei Szenarien
- [AP 3] Ökologische Untersuchung im Lebenszyklus
- [AP 4] Ökonomische Untersuchung im Lebenszyklus
- [AP 5] Effizienzsteigerung
- [AP 6] Gegenüberstellung der Ergebnisse
- [AP 7] Nachweis der Übertragbarkeit und Potenzialanalyse

Die Erkenntnisse zu dem in Abb. 3 gezeigten „energy+Home1.0“, der ersten Sanierung eines Einfamilienhauses zu einem Effizienzhaus Plus mit Elektromobilität (TICHELMANN 2011), bilden die Ausgangsbasis des Forschungsvorhabens. Das realisierte Projekt wurde in dem von der Deutschen Bundesumweltstiftung geförderten Forschungsprojekt „Ökologische und ökonomische Untersuchung zur Umwandlung eines repräsentativen Wohngebäudes zu einem Plusenergiehaus mit Elektromobilität. Anwendungsempfehlungen für vergleichbare Bauten“ hinsichtlich seiner ökologischen und ökonomischen Qualität untersucht. Es gehört in das vom Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) geförderte Programm zur messtechnischen Begleitung von Effizienzhäusern Plus im Rahmen der Forschungsinitiative ZukunftBau.

---

Abb. 3: energy+Home 1.0

Quelle: diephotodesigner, TSB-Ingenieure



#### *[AP 1] Grundlagenermittlung*

Im ersten Schritt werden sowohl die Untersuchungsgebäude als auch die Siedlung analysiert und dokumentiert. Dazu gehören die baurechtlichen Rahmenbedingungen, Messungen sowie die Aufnahme von Gebäudegeometrie und Anlagentechnik. Auf dieser Basis wird die energetische Qualität der Untersuchungsgebäude ermittelt. Anhand der Gebäudeaufnahme können Potenziale und Hemmnisse für die Weiterentwicklung von bewohnten Geschosswohnungsbauten identifiziert und die Szenarien entwickelt werden.

#### *[AP 2] Entwicklung und energetische Untersuchung von drei Szenarien*

Für die Untersuchungsgebäude werden drei alternative Sanierungsszenarien entwickelt. Die Sanierung nach Energieeinsparverordnung 2016 stellt das gesetzlich geforderte Minimum dar. Die Sanierung zum Effizienzhaus Plus nach BMU repräsentiert eine zukunftsorientierte Strategie. Das dritte, ebenfalls zukunftsorientierte Szenario ist die Verbindung der Sanierung zum Effizienzhaus Plus mit der Schaffung von neuem Wohnraum, indem das Gebäude aufgestockt wird. Die energetische Bilanzierung erfolgt nach DIN 18599.

#### *[AP 3] Ökologische Untersuchung*

Die umweltbezogene Qualität der Szenarien wird anhand einer Lebenszyklusanalyse untersucht. Damit soll aufgezeigt werden, ob die Mehrbelastungen für die Sanierung zum Effizienzhaus Plus gegenüber dem Bestand und einer EnEV-

---

Sanierung ökologisch ausgeglichen werden. Die Ökobilanzierung dient zudem der Beurteilung von Umweltwirkungen verschiedener Baukonstruktionen über den Lebenszyklus und damit als Entscheidungsgrundlage im Planungsprozess.

#### *[AP 4] Ökonomische Untersuchung*

Im Rahmen dieses Arbeitspaketes wird der Frage nachgegangen, ob sich die Mehrkosten des Effizienzhaus Plus gegenüber dem EnEV-Szenario im Lebenszyklus amortisieren und ob die Aufstockung und/oder Sanierung zum Effizienzhaus Plus aus immobilienökonomischer Sicht eine ernsthafte Alternative darstellt. Für jedes Szenario erfolgt eine Lebenszykluskostenanalyse nach der Kapitalwertmethode.

#### *[AP 5] Effizienzsteigerung*

Für den Effizienzhaus Plus Standard sind sowohl end- als auch primärenergetisch negative Jahresnettoenergiebilanzen nachzuweisen. In bewohnten Altbauten mit vorgegebenen Strukturen müssen bei den Maßnahmen an der Gebäudehülle und bei der technischen Gebäudeausstattung stets Kompromisse und kreative Lösungen gefunden werden. Exemplarisch werden daher Möglichkeiten zur Steigerung der Effizienz untersucht: Integrale Fassade, PV-Luftkollektor, PV-Batteriespeicher, Elektromobilität und Nutzerinterface.

#### *[AP 6] Gegenüberstellung der Ergebnisse*

Eine Gegenüberstellung der energetischen, ökologischen und ökonomischen Kennwerte soll Investoren, Bauherren und Planern als Entscheidungshilfe für zukünftige Sanierungen dienen. Gleichzeitig gehört sie zu den Grundlagen der Potenzialanalyse.

#### *[AP 6] Nachweis der Übertragbarkeit und Potenzialanalyse*

Anhand der Daten aus der Gebäudeaufnahme wird die Repräsentativität der Untersuchungsgebäude für Geschosswohnungsbauten der Baualtersklasse 1949 bis 1978 und damit auch die Übertragbarkeit des Konzepts nachgewiesen. Auf dieser Basis werden die Umweltauswirkungen bei einer Übertragung des Konzeptes auf Geschosswohnungsbauten der Baualtersklasse 1949 bis 1978 in Deutschland abgeschätzt und der Beitrag zu den deutschen Klimazielen prognostiziert.



---

## 2. Grundlagenermittlung

**Grundlagen**

---

Im ersten Schritt werden sowohl die Untersuchungsgebäude als auch die Siedlung analysiert und dokumentiert. Dazu gehören baurechtliche Rahmenbedingungen, Messungen sowie die Aufnahme von Gebäudegeometrie und Anlagentechnik. Auf dieser Basis wird die energetische Qualität der Untersuchungsgebäude ermittelt. Anhand der Eigenschaften wird die Repräsentativität der Untersuchungsgebäude für Geschosswohnungsbauten der Baualtersklasse 1949 bis 1978 nachgewiesen.

---

## 2.1 Kirchtannensiedlung Darmstadt-Eberstadt

---

### Geografische Einordnung

Die Untersuchungsgebäude befinden sich im südlichen Stadtbezirk „Kirchtannensiedlung“ des Stadtteils Eberstadt. Eberstadt liegt etwa 6 km südlich von Darmstadt (Abb. 4 bis Abb. 6).

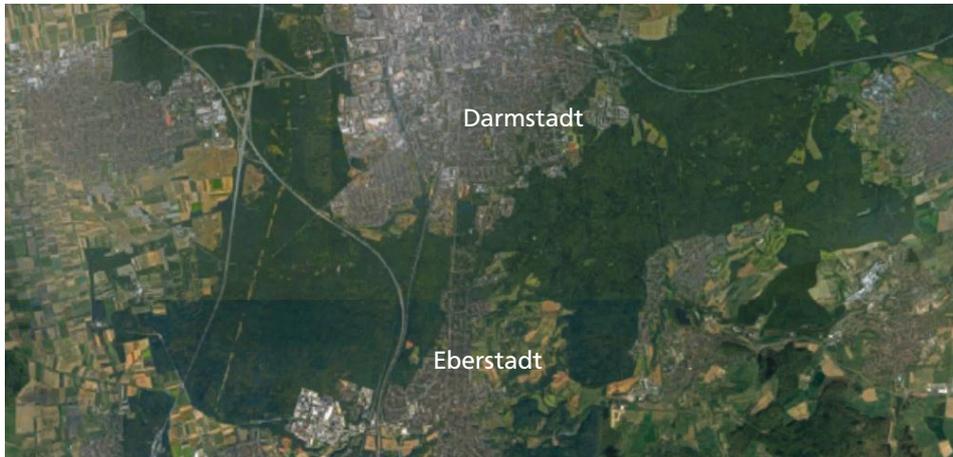


Abb. 4: Luftbild Darmstadt und Umgebung

Die Kirchtannensiedlung umfasst 1,29 km<sup>2</sup> und weist eine heterogene Zusammensetzung aus unsanierten und modernisierten Geschosswohnungsbauten, Ein- und Zweifamilienhäusern, Gebäuden mit Flach- und solchen mit Satteldächern auf (Abb. 7). Der aktuelle Mietspiegel in Eberstadt liegt bei durchschnittlich etwa 9,65 € je Quadratmeter.

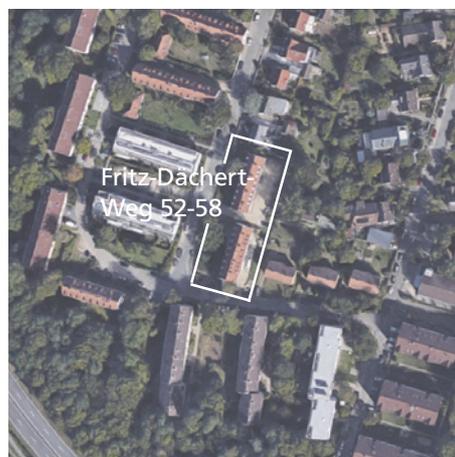
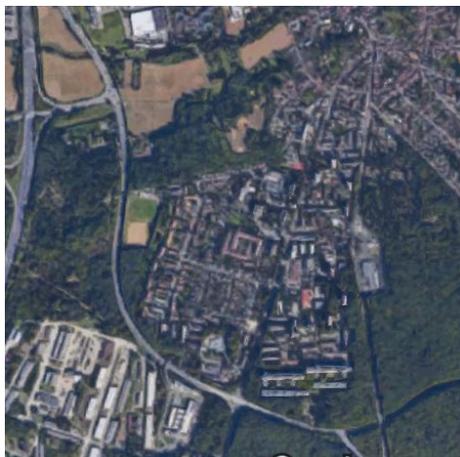


Abb. 5: Luftbild Darmstadt-Eberstadt

Abb. 6: Luftbild Fritz-Dächert-Weg 52-58



Abb. 7: Die Kirchtannensiedlung weist eine heterogene Bebauungsstruktur auf

Für die Kirchtannensiedlung liegt kein Bebauungsplan vor. Die durchschnittliche Grundflächenzahl (GRZ) der Umgebung um den Fritz-Dächert-Weg 52-58 beträgt 0,19. Die mittlere Geschossflächenzahl (GFZ) liegt bei 0,50. Für die Bebauung des Gebiets sind Kubatur und absolute Gebäudehöhen maßgebend. Die maximal vorgefundene Traufhöhe gilt als höchst zulässiger Wert. Bei der maximal vorgefundene Firsthöhe kann beim Entwurf gegebenenfalls verhandelt werden. Das Grundstück, auf dem sich die Untersuchungsgebäude befinden, umfasst eine Fläche von 2.981 m<sup>2</sup>. Die GRZ liegt aktuell bei 0,18, die GFZ bei 0,37 (Abb. 8).

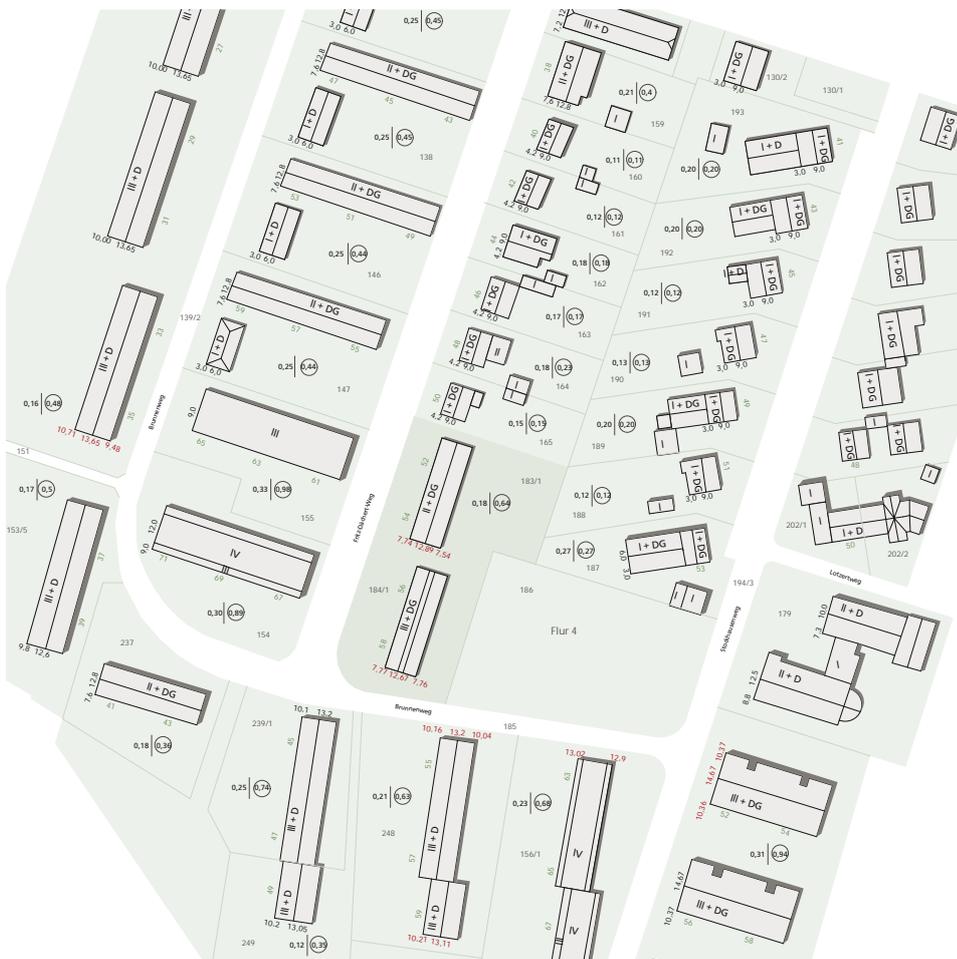


Abb. 8: Lageplan mit GRZ, GFZ, Gebäudehöhen

---

## 2.2 Messungen

---

### 2.2.1. Thermografie

#### Messverfahren und Randbedingungen

Zur Beurteilung der energetischen Qualität der beiden Wohngebäude wurden am 15. Januar 2015 in der Zeit von 14:00 bis 16:00 Uhr Außen- und Innenthermographien der Gebäudehülle erstellt. Verwendet wurde dazu das hochauflösende Thermographiesystem „VarioCam High Resolution“ der Firma Jenoptik. Zur Bearbeitung der Aufnahmen wurde das Programm „IRBIS 3+“ der Firma InfraTec GmbH verwendet. Tab. 1 zeigt die klimatischen Wetterbedingungen:

| MESSBEDINGUNGEN   |                   |
|---|-------------------|
| Außentemperatur Vortag: 14.01.15, 15:00 Uhr bis 15.01.2015, 14:00 Uhr | 5,9 °C            |
| <b>Außentemperatur 15.05.15, 14:00 Uhr bis 16:00 Uhr</b>              | 10,3 °C           |
| <b>Windbedingungen</b>  | schwacher Wind    |
| <b>Niederschlag</b>   | kein Niederschlag |

Tab. 1: Messbedingungen der Thermografie

Die dargestellten IR-Bilder werden immer mit dem zugehörigen Lichtbild dargestellt, welches direkt im Anschluss an die Untersuchung aufgenommen wurde.

Zugunsten der Vergleichbarkeit werden alle mit derselben Temperaturskala (6 bis 13 °C) dargestellt. Bei der Beurteilung der Aufnahmen ist zu beachten, dass die Emissivität der Verglasung von der Emissivität der Putzoberflächen abweicht.

Zur Kontrolle der Temperaturmessung wurde ein Oberflächentempersensor des Typs PT 100 Platin auf die Putzoberfläche der Westfassade des Gebäudes im Fritz-Dächert-Weg 56 aufgebracht und mit einem Messverstärkersystem der Firma bmcm verbunden. Mit dem Oberflächensensor wurde eine Temperatur von 10,1 °C gemessen. Das IR-Bild zeigt im Durchschnitt an derselben Stelle eine Oberflächentemperatur von 10,2 °C. Die Abweichung von 0,1 K ist für die Auswertung hinreichend genau.

#### Nordfassade

Die Abb. 10 und Abb. 11 zeigen das Referenzbild sowie die Thermografieaufnahme. Die niedrigen Oberflächentemperaturen im Bereich des unbeheizten Dachstuhls sowie an der Nord-Ost-Ecke des Gebäudes sind deutlich erkennbar. An dieser Stelle befindet sich zum einen eine geometrische Wärmebrücke (Au-

---

ßenwanddecke), als auch ein undichtes Regenfallrohr, sodass es an dieser Stelle aufgrund von Verdunstungskälte zu einer niedrigen Oberflächentemperatur von bis zu 6,6 °C kommt.

Die ungedämmten Stürze sowie die Heizkörper unterhalb der Fenster zeichnen sich durch sehr warme Oberflächentemperaturen auf der Thermografieaufnahme ab. Dies gilt auch für die einbindende Geschossdecke sowie Innenwände (stoffliche Wärmebrücke). Im Überschneidungsbereich von einbindender Innenwand, Geschossdecke und innenliegender Heizungsleitung verstärkt sich dieser Effekt und führt zu einer Oberflächentemperatur von 11,3 °C. Die hohen Oberflächentemperaturen der Fenster sind nur bedingt aussagekräftig, da sich in den Glasscheiben das gegenüberliegende Gebäude und dessen Wärmestrahlung widerspiegelt.

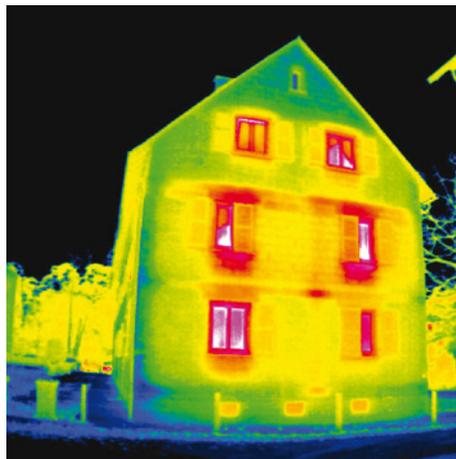


Abb. 10: Nordfassade des Fritz-Dächert-Wegs 56

Abb. 11: Thermografie der Nordfassade des Fritz-Dächert-Wegs 56

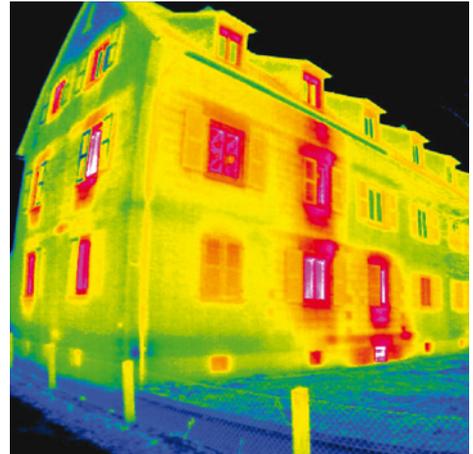
#### Westfassade

In den Abb. 12 und Abb. 13 sind das Referenzfoto und die Thermovision dargestellt. Zum Zeitpunkt der Thermografieaufnahme waren lediglich die Wohnungen im Fritz-Dächert-Weg 56 (auf dem Bild links) beheizt. Daher sind in diesem Bereich die Außenwandoberflächen 1-2 K höher als im Bereich vom Fritz-Dächert-Weg 58. Die Lage des Heizraumes im Untergeschoss sowie die Wärmeverluste im Bereich der Fensterstürze und -brüstungen ist deutlich erkennbar. Auch die unterschiedlichen Wärmeleitfähigkeiten aus Stein und Mörtelfugen sowie die einbindende Geschossdecke werden durch die Thermovision sichtbar. Eine Undichtigkeit der Regenrinne im Bereich der unteren Befestigung zeichnet sich durch deutlich niedrigere Oberflächentemperaturen ab (7,1 °C im Bereich der Befestigung des Regenfallrohres gegenüber 9,4 °C im Bereich des Zimmers).

Abb. 12: Westfassade des  
Fritz-Dächert-Wegs 56-58



Abb. 13: Thermografie der  
Westfassade des Fritz-  
Dächert-Wegs 56-58



#### Ostfassade

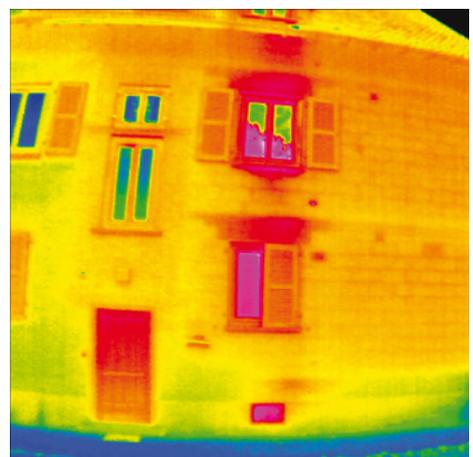
Die Abb. 14 und Abb. 15 zeigen das Referenzbild sowie die Thermografieaufnahme. Die Oberflächentemperatur der Wand liegt im Bereich der beheizten Zimmer bei 10,2 °C, im Bereich der Geschossdecken bei 9,9 °C, im Bereich des Kellers bei 9,4 °C und im Bereich der Stürze bei 11,5 °C.

Erkennbar ist auch die ungenügende Wärmedämmung der Hauseingangstür sowie punktuelle Wärmebrücken in Form von Lüftungsöffnungen von Bad und der Abstellkammer der Küchen. Auffällig ist die hohe Oberflächentemperatur des Kellerfensters von 12,1 °C. Die Temperaturerhöhung der unbeheizten Kellerräume erfolgt hauptsächlich durch Transmissionsverluste der Erdgeschoss-Wohnung.

Abb. 14: Ostfassade des  
Fritz-Dächert-Wegs 58



Abb. 15: Thermografie  
der Ostfassade des Fritz-  
Dächert-Wegs 56



## Innenraum

In den Abb. 16 und Abb. 17 sind das Referenzfoto und die Thermovision des Innenraums dargestellt. Es handelt sich dabei um das Eckzimmer im Erdgeschoss vom Fritz-Dächert-Weg 56 an der nordwestlichen Gebäudeecke. Die Innenraumtemperatur betrug zum Zeitpunkt der Messung  $23,6\text{ °C}$ . Die Wand links der Außenwand mit dem Fenster ist eine Innenwand. Diese weist daher deutlich höhere Oberflächentemperaturen ( $22,2$  bis  $24,1\text{ °C}$ ) als die Außenwände auf. Je nach Höhe im Raum weisen die Außenwände im Bereich der Steine eine Oberflächentemperatur von  $19,9$  bis  $21,8\text{ °C}$  auf, im Bereich der Mörtelfugen jeweils ca.  $0,4\text{ °C}$  kälter. Deutlich erkennbar ist die geometrische Wärmebrücke im Bereich der Außenwanddecke. Hier sinkt die Oberflächentemperatur bis auf  $16,8\text{ °C}$  ab. Mit einer Oberflächentemperatur von ca.  $20,2\text{ °C}$  weist das abgebildete Fenster eine durchaus gute Wärmedämmeigenschaft auf.

Aufgrund der konstruktiven Ausbildung der Fensterleibungen mit Anschlag sind keine größeren Undichtigkeiten in diesem Bereich erkennbar, lediglich im Bereich der Fensterbank sinkt die Oberflächentemperatur auf  $18,4\text{ °C}$ . Die Fußbodentemperatur beträgt  $22\text{ °C}$ , die Deckentemperatur  $23,1\text{ °C}$ .

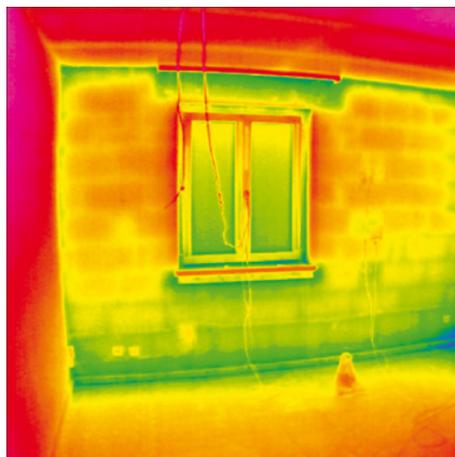


Abb. 16: Innenraum  
Nordwestecke EG Fritz-  
Dächert-Weg 56

Abb. 17: Thermografie  
Innenraum Nordwestecke  
EG Fritz-Dächert-Weg 56

### 2.2.2. U-Wert-Messung

#### Messverfahren und Randbedingungen

Zur Ermittlung der Wärmedurchgangskoeffizienten (U-Werte) der Außenwände, der Kellerdecke, der Dachschräge sowie der Decke unter dem Dachboden wurden in den äußeren Wohnungen am nördlichen Ende des Gebäudes im

Fritz-Dächert-Weg 56 Messungen durchgeführt. Sie fanden unter folgenden Bedingungen statt (Tab. 2):

Tab. 2: Messbedingungen der U-Wert-Messung

| MESSBEDINGUNGEN                                   |                               |
|---|-------------------------------|
| Einstellung Heizkörper am Vortag                  | von Frostschutz auf Stufe 3,5 |
| Außentemperatur 15.01.15, 10:00 Uhr bis 18:00 Uhr | 9,2 bis 10,4 °C               |
| Windbedingungen                                   | schwacher Wind                |

Für die Messungen wurden auf beiden Seiten der Bauteile die Oberflächentemperaturen  $\Theta_i$  (innen) und  $\Theta_e$  (außen) mit PT100 Oberflächenfühlern erfasst. Die Messfühler wurden zu diesem Zweck jeweils aufgeklebt. Die Wärmestromdichte wurde mit einer 144 cm<sup>2</sup> großen Wärmestromplatte (Thermoelement) gemessen (siehe dazu Abb. 18 bis Abb. 21).

Abb. 18: U-Wert-Messung Außenwand, innen



Abb. 19: U-Wert-Messung Außenwand, außen



Abb. 20: U-Wert-Messung Dach, innen

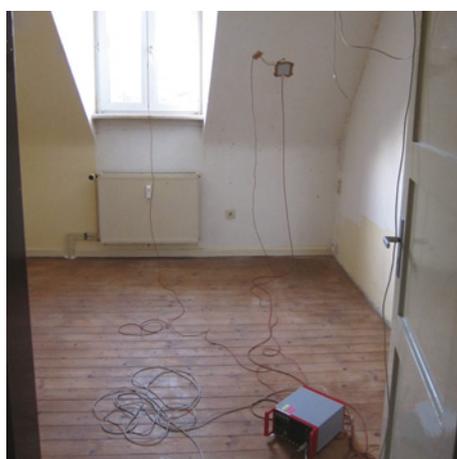
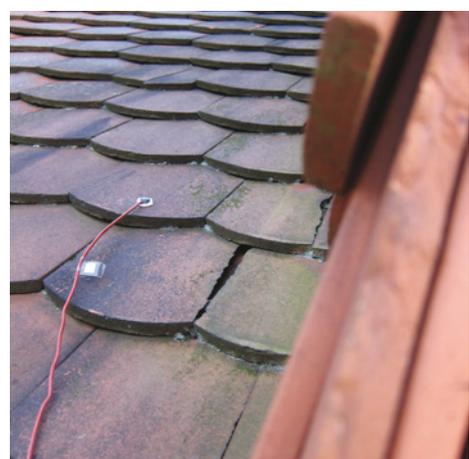


Abb. 21: U-Wert-Messung Dach, außen



Mithilfe der beiden Temperaturgrößen und des Wärmestroms wurde der Wärmedurchgangskoeffizient U entsprechend DIN EN ISO 6946 berechnet ( $R_{se}$  und  $R_{si}$  bilden die Wärmeübergangswiderstände (außen und innen) nach DIN EN ISO 6946):

$$U = 1 / (R_{se} + \frac{\theta_{si} - \theta_{se}}{\dot{q}} + R_{si})$$

Parallel wurde jeweils die Raumtemperatur  $\theta_i$  des beheizten Raumes erfasst und zur Kontrolle aus den drei gemessenen Temperaturgrößen unter der Vorgabe des Wärmeübergangswiderstandes nach DIN EN ISO 6946 ein weiterer Wert für den Wärmedurchgangskoeffizienten U berechnet.

$$U = 1 / (R_{se} + \frac{\theta_i - \theta_{se}}{\theta_i - \theta_{si}} \cdot R_{si})$$

Der U-Wert der Außenwände wurde im nach Nordwesten orientierten Eckraum im ersten Obergeschoss an der westlichen Außenwand gemessen. Die Messpositionen auf der Wand befanden sich in einer Höhe von etwa 1,2 m und etwa 60 cm seitlich des Fensters. In dieser Wand befindet sich kein Heizkörper. Der angegebene U-Wert wurde von den individuellen Eigenschaften des Steins, auf dem die Messsensoren befestigt waren, auf die mittleren Wandeigenschaften transferiert. Hierfür wurde die thermographisch gemessene Verteilung der Oberflächentemperatur der Innenwand ausgewertet. Der gemittelte U-Wert berechnet sich folgendermaßen:

$$\bar{U} = 1 / (R_{se} + \frac{(\frac{1}{U} - R_{se})(\theta_{si} - \theta_{se})}{(\frac{1}{U} - R_{se})\theta_{si} - R_{si}\theta_{se} - (\frac{1}{U} - R_{se} - R_{si})\bar{\theta}_{si}} \cdot R_{si})$$

Im Fall von Außenwänden wird  $R_{se} = 0,04 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  und  $R_{si} = 0,13 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  angesetzt.

Eine auf Literaturangaben beruhende rechnerische Abschätzung des zu erwartenden U-Werts mit Werten für die Wärmeleitfähigkeit der verwendeten Hohlblocksteine (2-k Hbl nach 1952, Rohdichteklasse Hbl 50 < 1 kg/dm<sup>3</sup>, 24 cm dick)

mit Normalmörtel nach DIN 4108 von  $0,38 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  unter Berücksichtigung der Putzschichten (außen Kalkzementputz, innen Kalkgipsputz, je 2 cm dick) mit Wärmeleitfähigkeit  $1 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  bzw.  $0,7 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  ergibt einen U-Wert von  $1,18 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ . Der gemessene Wert liegt bei  $1,25 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ .

Bei der Bestimmung der U-Werte von Kellerdecke und Dachboden wurden für  $R_{se}$  die Werte für Innenräume verwendet, da der Wärmestrom nicht windgetrieben ist. Oberseitig der Kellerdecke wurde die Wärmestromplatte über einer Fuge des Dielenbodens im Erdgeschoss befestigt. Im Keller wurde der Temperaturfühler abseits der Betonträger der Kellerdecke befestigt. Für die Kellerdecke wird  $R_{se}=R_{si}=0,17 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  angesetzt.

Zur Bestimmung der U-Werte der Dachschräge und des Dachbodens wurden die Messungen im zweiten Obergeschoss in einem westlich orientierten Raum durchgeführt. Für die Messung des Wertes der Dachschräge befanden sich die Messfühler in einer Höhe von ca. 1,5 m und 60 cm seitlich der Dachgaube. Die Heizung befindet sich in diesem Raum unter dem Gaubenfenster. Bezüglich der Dachschräge wird  $R_{se}=0,04 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  und  $R_{si}=0,1 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  angesetzt, im Falle der Messung zum Dachboden  $R_{se}=R_{si}=0,1 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ .

### Ergebnisse

In der folgenden Tabelle (Tab. 3) werden die U-Werte der Bauteile des Fritz-Dächert-Wegs 52-58 dargestellt. Die ermittelten Werte der Bauteile der beheizten Hülle werden durch Literaturangaben ergänzt.

| BAUTEIL               | U-WERTE<br>[W/(m <sup>2</sup> K)] |
|-----------------------|-----------------------------------|
| Außenwände            | 1,25 <sup>1</sup>                 |
| Kelleraußenwände      | 1,25 <sup>1</sup>                 |
| Fenster               | 3,00 <sup>3</sup>                 |
| Außentüren            | 1,80 <sup>3</sup>                 |
| Oberste Geschossdecke | 0,91 <sup>1</sup>                 |
| Kellerdecke (52-54)   | 0,90 <sup>1</sup>                 |
| Kellerdecke (56-58)   | 0,43 <sup>2</sup>                 |
| Dach                  | 1,58 <sup>1</sup>                 |

Tab. 3: Ergebnisse der U-Wert-Messung

<sup>1</sup> Messwert

<sup>2</sup> Rechenwert

<sup>3</sup> Literaturwert

### 2.2.3. Energieverbrauch

Der Energiebedarf für Gebäude wird nach genormten Verfahren und zum Teil mit standardisierten Werten berechnet. Der Energieverbrauch basiert auf den tatsächlich gemessenen Verbrauchswerten und ist damit stark vom Nutzerverhalten abhängig. Für die beiden Untersuchungsgebäude liegen die Heizkostenabrechnungen für die Jahre 2014, 2015 und 2016 vor. Aufgrund der teilweise hohen Leerstände sind die Energieverbräuche nur bedingt aussagekräftig. Energieverbrauchsangaben sind nur zulässig bei Leerstandsfaktoren bis 0,3 (BMWi / BMUB 2015a).

#### Fritz-Dächert-Weg 52-54

Die Leerstandsfaktoren für das Gebäude im Fritz-Dächert-Weg 52-54 liegen für Warmwasser bei 0,22 und für Heizung bei 0,12. Damit die Erstellung eines Energieverbrauchsangabens noch zulässig. Die Energieverbräuche sind in Abb. 22 dargestellt.

#### Fritz-Dächert-Weg 56-58

Die Leerstandsfaktoren für das Gebäude im Fritz-Dächert-Weg 52-54 liegen für Warmwasser bei 0,53 und für Heizung bei 0,24. Damit die Erstellung eines Energieverbrauchsangabens in der Praxis nicht zulässig. Die Energieverbräuche sind in Abb. 23 dargestellt.

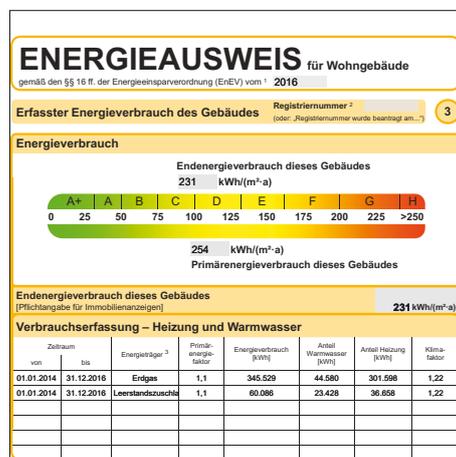
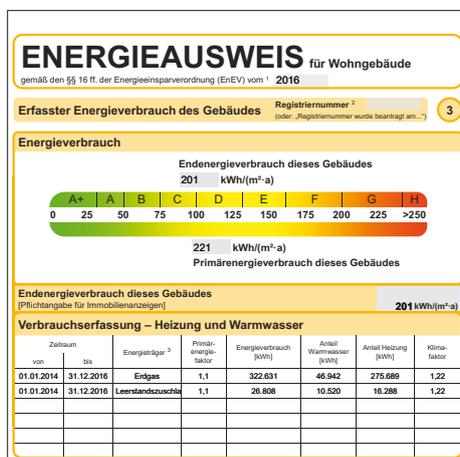


Abb. 22: Energieverbrauch Fritz-Dächert-Weg 52-54

Abb. 23: Energieverbrauch Fritz-Dächert-Weg 56-58

---

## 2.3 Bestandsaufnahme Fritz-Dächert-Weg 52-54

---

### Gebäude

| GEBÄUDEDATEN                      |  |
|-----------------------------------|--|
| Gebäudetyp                        | Mehrfamilienhaus   |
| Baujahr                           | 1958   |
| Lage                              | Stadtrand, offene Bebauung in ruhiger Wohnlage           |
| Bauweise                          | Massivbauweise, Satteldach mit 45° Neigung nach Ost/West |
| Vollgeschosse                     | 2 Geschosse und 1 Dachgeschoss                           |
| Wohneinheiten                     | 12   |
| Wohnfläche nach DIN 277 $A_{WFL}$ | 604 m <sup>2</sup>                                       |
| Grundfläche                       | 274 m <sup>2</sup>                                       |
| Traufhöhe Ost/West                | 7,54 m/7,74 m  |
| Firsthöhe                         | 12,89 m  |
| Beheiztes Volumen $V_e$           | 2.270 m <sup>3</sup>                                     |
| Hüllfläche A                      | 1.183 m <sup>2</sup>                                     |
| Beheizte Gebäudenutzfläche $A_N$  | 727 m <sup>2</sup>                                       |
| A/V-Verhältnis                    | 0,52   |

Tab. 4: Gebäudedaten  
Fritz-Dächert-Weg 52-54

Das zweigeschossige Gebäude mit einem ausgebauten Dachgeschoss wurde 1958 errichtet. Die Giebelseiten sind nördlich und südlich ausgerichtet. Die straßenseitige Traufkante orientiert sich nach Westen, die rückwärtige zum östlichen Teil des Grundstücks. Von den 12 Wohneinheiten sind aktuell 11 belegt. Der Spitzboden über dem Dachgeschoss und der Keller sind unbeheizt und begrenzen somit das beheizte Gebäudevolumen (Abb. 24).

Das Gebäude ist als Zweispänner organisiert. Sämtliche Wohnungsgrundrisse basieren auf demselben rationalen Schema einer funktionalen Dreizimmer-Wohnung mit ca. 52 m<sup>2</sup> Wohnfläche.

Die Erschließung erfolgt über einen Flur, von dem man in das nach Westen orientierte Schlafzimmer und das Wohnzimmer sowie in das nach Osten orientierte Tageslichtbad gelangt. Das Wohnzimmer führt zur Küche. Die Raumhöhe beträgt 2,50 m.

---

Die bestehenden Schächte sind nach einer Renovierung vollständig erhalten geblieben. Die Schächte in den Badezimmern werden für die Wasser- und Entsorgung genutzt. Die Schächte in den Fluren dienen zur Verteilung von Elektrokabeln. In den Aufenthaltsräumen sind die Schächte ungenutzt und leer. Einzige Ausnahme bildet der Schacht, der vom Heizungsraum ausgeht und die Abgase nach draußen leitet.

Die folgenden Abbildungen Abb. 25 bis Abb. 34 zeigen Grundrisse, Ansichten und Querschnitte des Gebäudes im Maßstab 1:200.



Abb. 24: Das beheizte Gebäudevolumen ist rot schattiert.

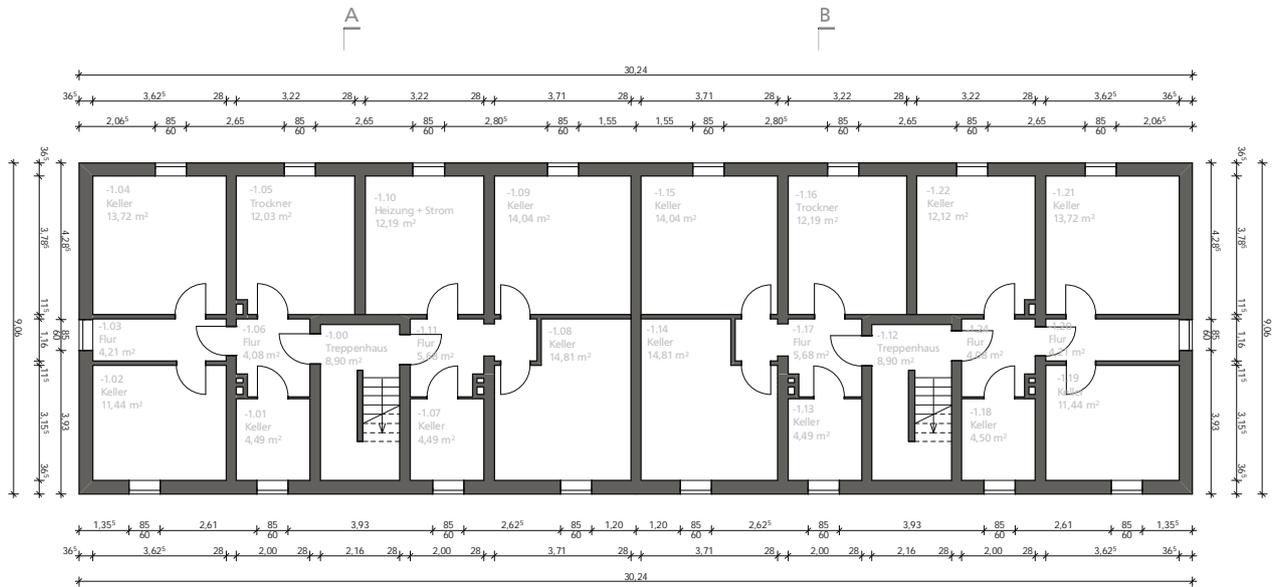


Abb. 25: Grundriss KG

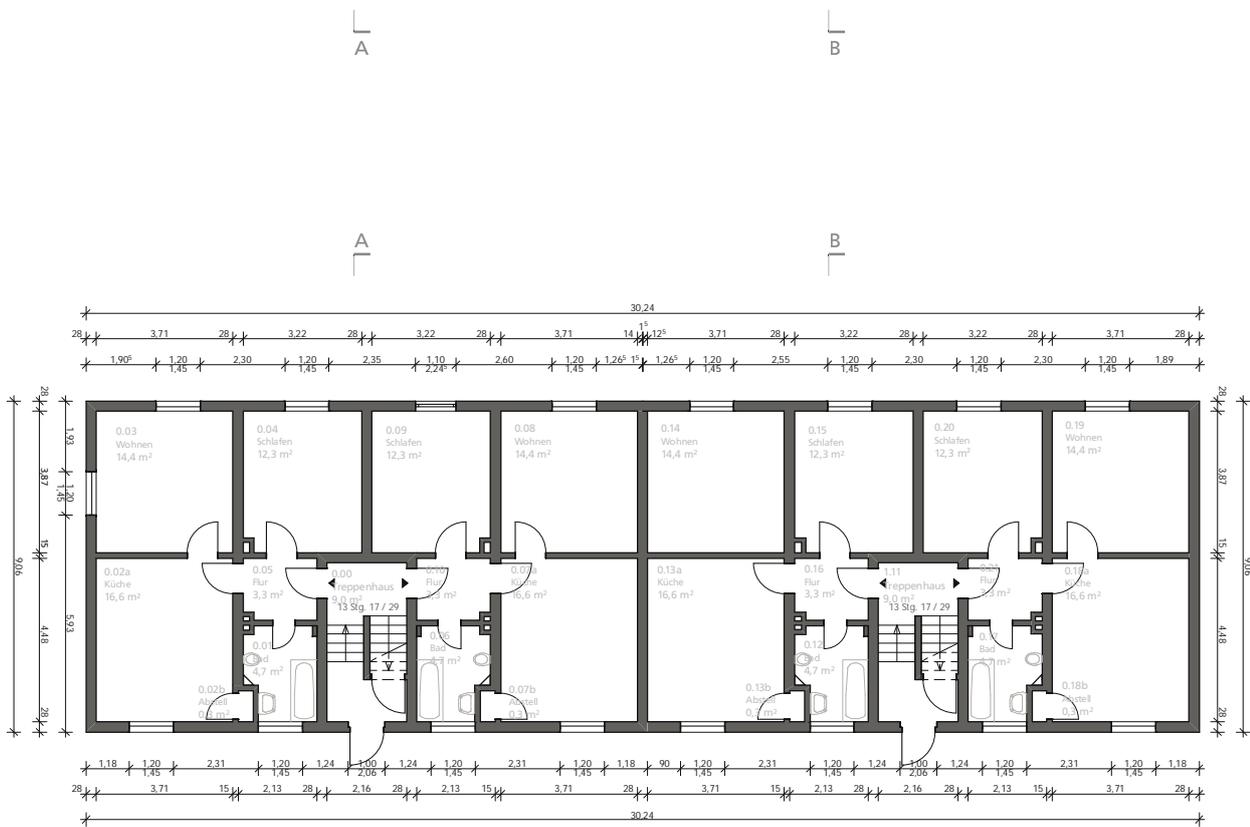


Abb. 26: Grundriss EG

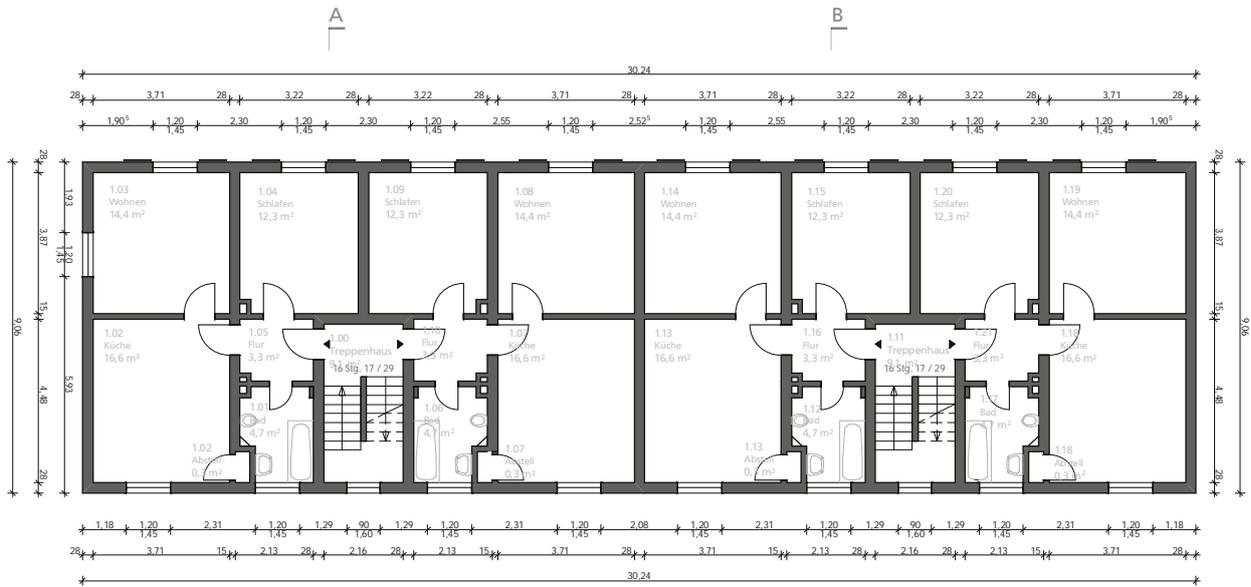


Abb. 27: Grundriss 1. OG

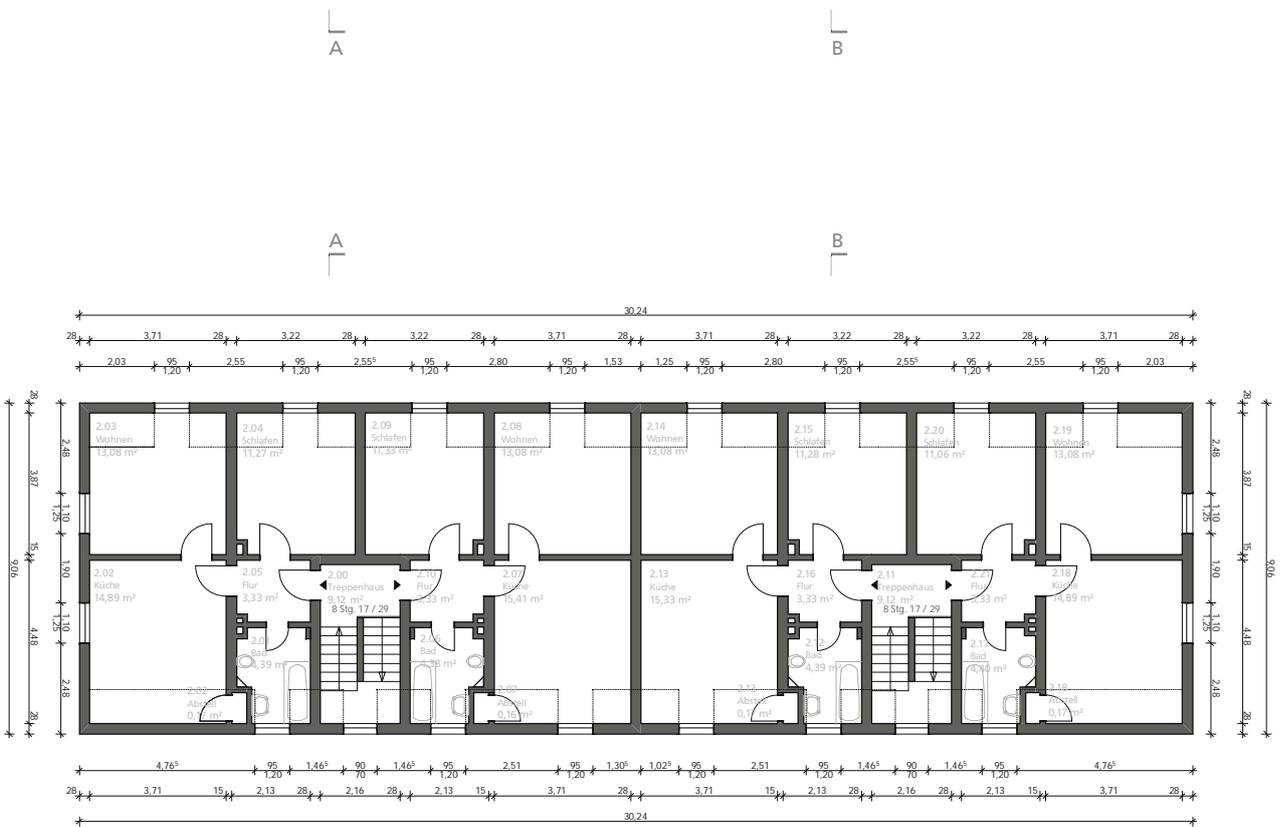


Abb. 28: Grundriss DG



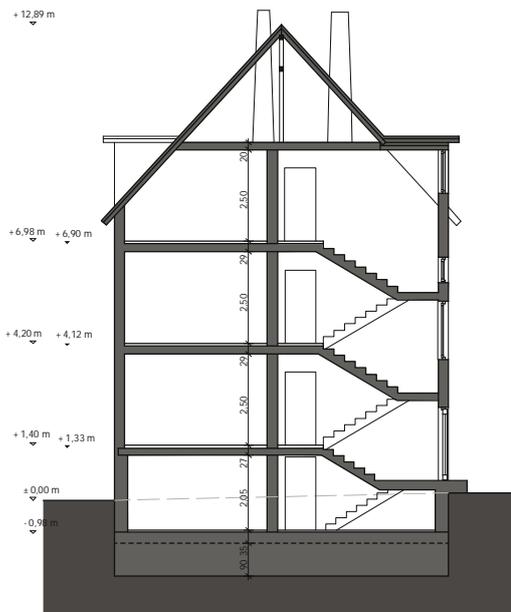


Abb. 29: Schnitt A-A

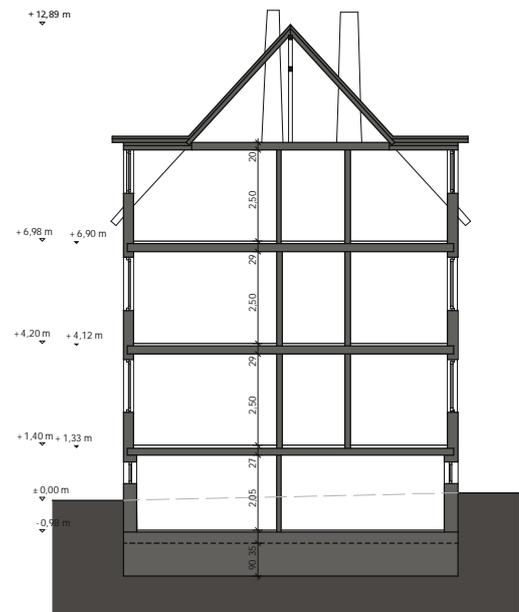


Abb. 30: Schnitt B-B

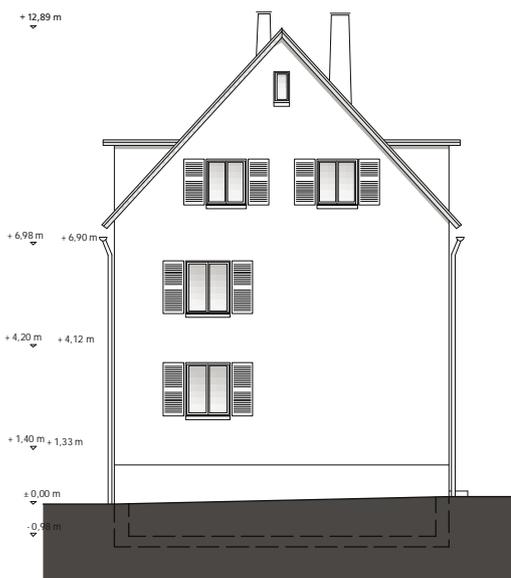


Abb. 31: Südensicht

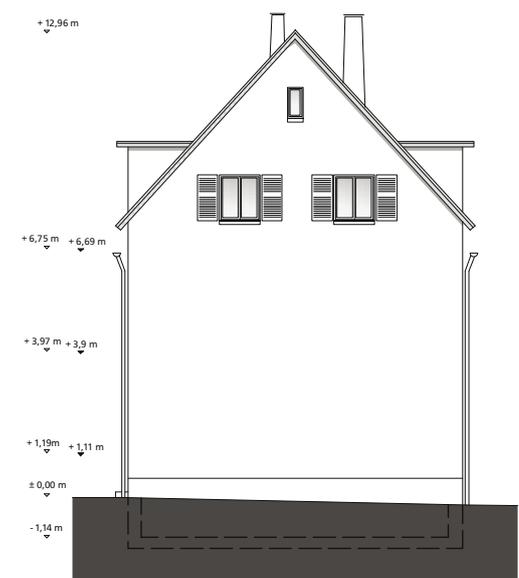


Abb. 32: Nordansicht



Abb. 33: Westansicht

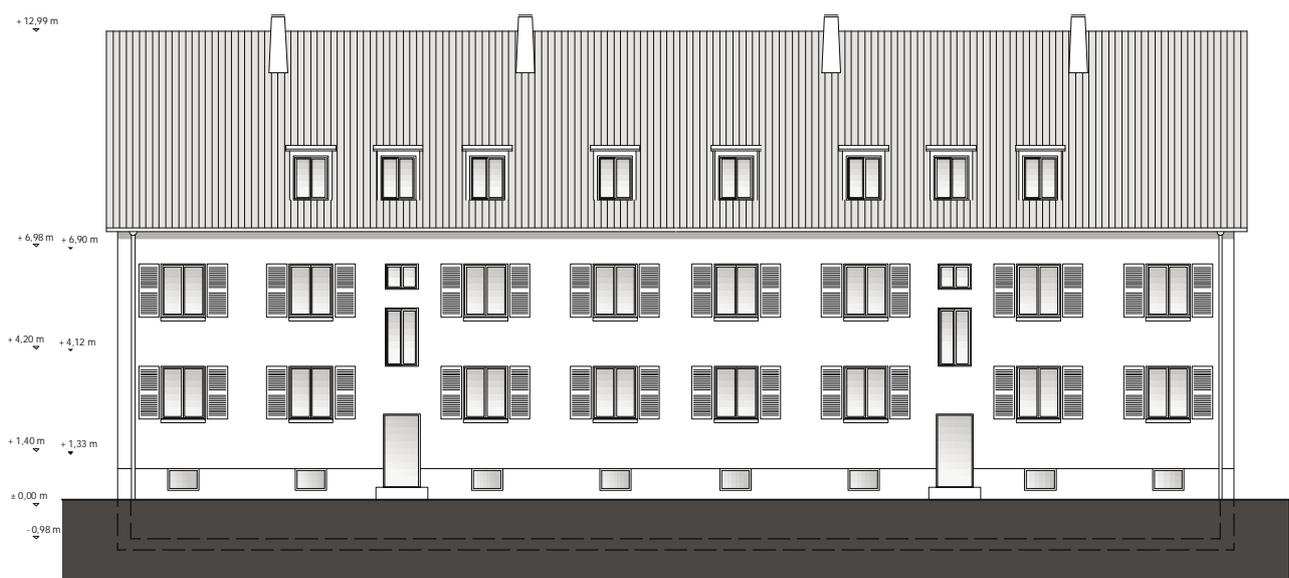
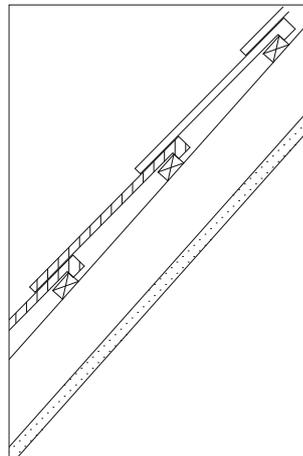


Abb. 34: Ostansicht

## Gebäudehülle

### Dach - Pfettendach

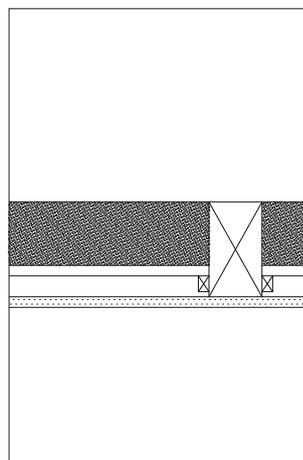
$$U = 1,58 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$$



| Baustoff                              | Dicke [cm] |
|---------------------------------------|------------|
| Biberschwanzziegel                    | 1,5        |
| Lattung 25/45                         | 2,5        |
| Sparren 11/8,5,<br>e = ca. 60 cm      | 11,0       |
| Kalziumsilikatplatte<br>(nur im 2.OG) | 2,5        |

### Oberste Geschossdecke - Holzbalkendecke

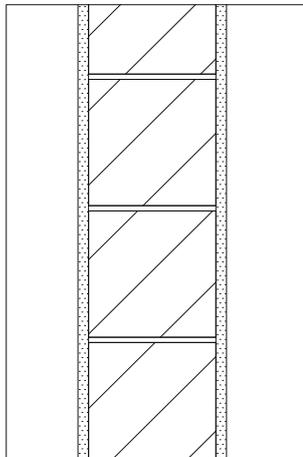
$$U = 0,91 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$$



| Baustoff                      | Dicke [cm] |
|-------------------------------|------------|
| Holzsparren 18/10             | 18,0       |
| Putz auf Schilfrohr-<br>matte | 2,0        |
| Strohlehm                     | 12,0       |
| Blindboden Holz               | 2,0        |
| Luftschicht                   | 4,0        |
| Putz auf Schilfrohr-<br>matte | 2,0        |

## Außenwand

$$U = 1,25 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$$



| Baustoff             | Dicke [cm] |
|----------------------|------------|
| Kalkzementputz       | 2,0        |
| Lattung 25/45        | 24,0       |
| Innenputz (Kalkgips) | 2,0        |

## Fenster und Außentüren

$$U = 3,5 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K}) \text{ und } 3,0 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$$

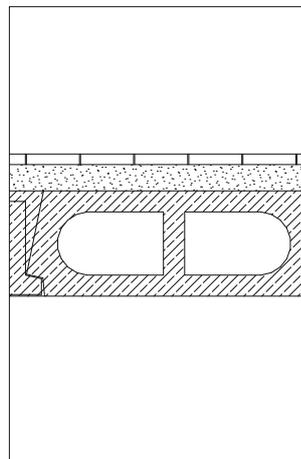


Fenster:  
1987: 2-Scheiben-Isolierverglasung, Kunststoffrahmen, teilweise mangelhafte Dichtung und fehlende Fensterbretter  
 $U_w = 3,0 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$   
 $U_g = 2,8 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$   
 $g = 0,75$

Außentüren:  
Einscheibenverglasung in Holzrahmen, teilweise mangelhafte Dichtung  
 $U = 3,5 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$

### Kellerdecke

$$U = 0,9 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$$



| Baustoff                     | Dicke [cm] |
|------------------------------|------------|
| Parkett (Rie-menboden)       | 2,0        |
| Lattung 50/70, Sandschüttung | ,0         |
| Betonrippendecke             | 20         |

### Allgemeine Undichtigkeiten



Die Türen von der beheizten zur unbeheizten Zone weisen unzureichende Dämmeigenschaften auf und sind nicht abgedichtet. Schwachpunkte sind vor allem die Kellertüren sowie die Dachbodenklappen. Die Fenster sind nicht abgedichtet. Teilweise fehlen die Fensterbretter. Dies führt zu einer mehrfachen Unterbrechung der Luftdichtheitsebene. Die Folge sind Wärmeverluste und das Risiko von Feuchteintritt. Es droht die Gefahr von Tauwasserausfall und Schimmelpilzbildung.

## Wärmeerzeuger

| WÄRMEERZEUGER                    |  |
|----------------------------------|--|
| Typ, Energieträger               | Gas-Spezialkessel<br>Buderus Lonagas<br>G224E Lownox |
| Baujahr                          | 1991   |
| Standort                         | im unbeheizten Keller                                |
|                                  | 64 kW  |
| Betriebsweise                    | Heizung, Warmwasser                                  |
| Vorlauf-/Rück-<br>lauftemperatur | 70 / 55 °C   |
| Nachtabsenkung                   | aktiv  |
| Kesseltemperatur                 | konstant, kein Mischer                               |



## Speicher

| SPEICHER                 |                                 |
|--------------------------|---------------------------------|
| Typ, Energieträger       | Multicell MC-H<br>(Fa. Fröling) |
| Baujahr                  | 1991                            |
| Standort                 | im unbeheizten Keller           |
| Speicherinhalt           | 500 l                           |
| Betriebsweise            | Warmwasser                      |
| Dämmung des<br>Speichers | ja                              |
| Erwärmung durch          | indirekt durch<br>Wärmeerzeuger |



## Verteilung Raumwärme

| VERTEILUNG RAUMWÄRME |   |
|----------------------|---|
| Bauart               | Pumpen-Wasser-System,<br>Zweirohr-System  |
| Verteilung           | untere Verteilung,<br>zentral über außen liegende,<br>ungedämmte Steigleitungen |

## Verteilung Warmwasser

| VERTEILUNG WARMWASSER |   |
|-----------------------|---|
| Bauart                | mit Zirkulation,<br>durchgängiger<br>Betrieb 24 h/d |
| Wassertemperatur      | 60 °C   |
| Verteilung            | innenliegende<br>Schächte                           |

## Wärmeabgabe

| WÄRMEABGABE            |   |
|------------------------|---|
| Wärmeabgabe            | Standard-Heizkörper (Plattenheizkörper) |
| Regelung               | Thermostatventile                       |
| hydraulischer Abgleich | nein, nicht bekannt                     |



## Energiekonzept

Ein Gas-Spezialkessel aus dem Jahr 1991 versorgt die Wohnungen zentral mit Wärme (Radiatoren). Er beheizt zudem (indirekt) den nebenstehenden Warmwasser-Speicher, über den Trinkwarmwasser zentral bereitgestellt wird. Die Lüftung erfolgt frei über die Fenster. Die Abb. 36 bis Abb. 38 zeigen das Energieflussdiagramm, das Energiekonzept im Schnitt sowie die Einordnung in die Energieeffizienzklasse.

Insgesamt werden Transmissionswärmeverluste von 1,303 W/K sowie ein Jahres-Primärenergiebedarf von 308 kWh/(m<sup>2</sup>K) festgestellt.

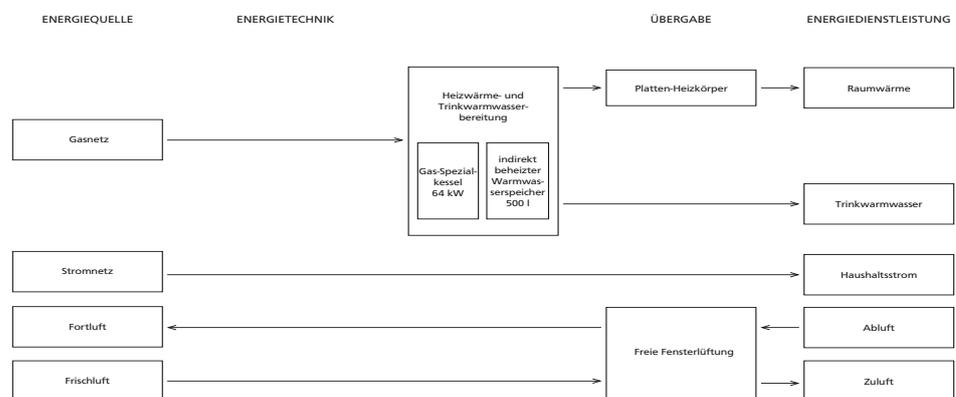


Abb. 36: Energieflussdiagramm Fritz-Dächert-Weg 52 bis 54

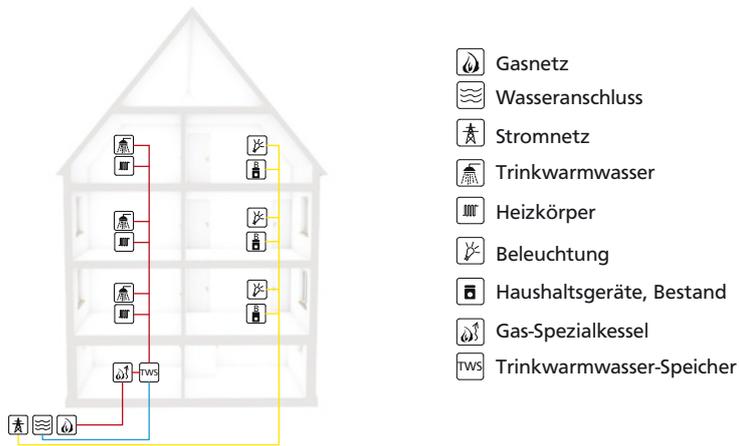


Abb. 37: Energiekonzept  
Fritz-Dächert-Weg 52-54

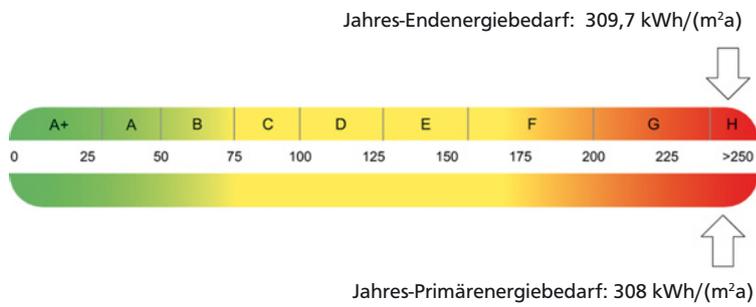


Abb. 38: Einordnung in  
Energieeffizienzklasse H

---

## 2.4 Bestandsaufnahme Fritz-Dächert-Weg 56-58

---

### Gebäude

| GEBÄUDEDATEN                      |  |
|-----------------------------------|--|
| Gebäudetyp                        | Mehrfamilienhaus   |
| Baujahr                           | 1956   |
| Lage                              | Stadtrand, offene Bebauung in ruhiger Wohnlage           |
| Bauweise                          | Massivbauweise, Satteldach mit 45° Neigung nach Ost/West |
| Vollgeschosse                     | 2 Geschosse und 1 Dachgeschoss                           |
| Wohneinheiten                     | 12   |
| Wohnfläche nach DIN 277 $A_{WFL}$ | 604 m <sup>2</sup>                                       |
| Grundfläche                       | 274 m <sup>2</sup>                                       |
| Traufhöhe Ost/West                | 7,76 m/7,77 m  |
| Firsthöhe                         | 12,67 m  |
| Beheiztes Volumen $V_e$           | 2.270 m <sup>3</sup>                                     |
| Hüllfläche A                      | 1.183 m <sup>2</sup>                                     |
| Beheizte Gebäudenutzfläche $A_N$  | 727 m <sup>2</sup>                                       |
| A/V-Verhältnis                    | 0,52   |

Tab. 5: Gebäudedaten  
Fritz-Dächert-Weg 52-54

Das zweigeschossige Gebäude mit einem ausgebauten Dachgeschoss wurde 1956 errichtet. Die Giebelseiten sind nördlich und südlich ausgerichtet. Die straßenseitige Traufkante orientiert sich nach Westen, die rückwärtige zum östlichen Teil des Grundstücks. Von den 12 Wohneinheiten sind aktuell 8 belegt. Die Wohnungen im Dachgeschoss sind zurzeit nicht bewohnt. Der Spitzboden über dem Dachgeschoss und der Keller sind unbeheizt und begrenzen somit das beheizte Gebäudevolumen (Abb. 39).

Das Gebäude ist als Zweispänner organisiert. Sämtliche Wohnungsgrundrisse basieren auf demselben rationalen Schema einer funktionalen Dreizimmer-Wohnung mit ca. 52 m<sup>2</sup> Wohnfläche.

Die Erschließung erfolgt über einen Flur, von dem man in das nach Westen orientierte Schlafzimmer und das Wohnzimmer sowie in das nach Osten orientierte Tageslichtbad gelangt. Das Wohnzimmer führt zur Küche. Die Raumhöhe beträgt 2,50 m.

---

Auch hier sind die bestehenden Schächte nach einer Renovierung vollständig erhalten geblieben. In den Badezimmern werden sie für die Wasser- und Entsorgung genutzt. In den Fluren dienen sie zur Verteilung von Elektrokabeln. In den Aufenthaltsräumen sind die Schächte ungenutzt und leer. Einzige Ausnahme bildet Schacht, der vom Heizungsraum ausgeht und die Abgase nach draußen leitet.

Die folgenden Abbildungen Abb. 41 bis Abb. 50 zeigen Grundrisse, Ansichten und Querschnitte des Gebäudes im Maßstab 1:200.

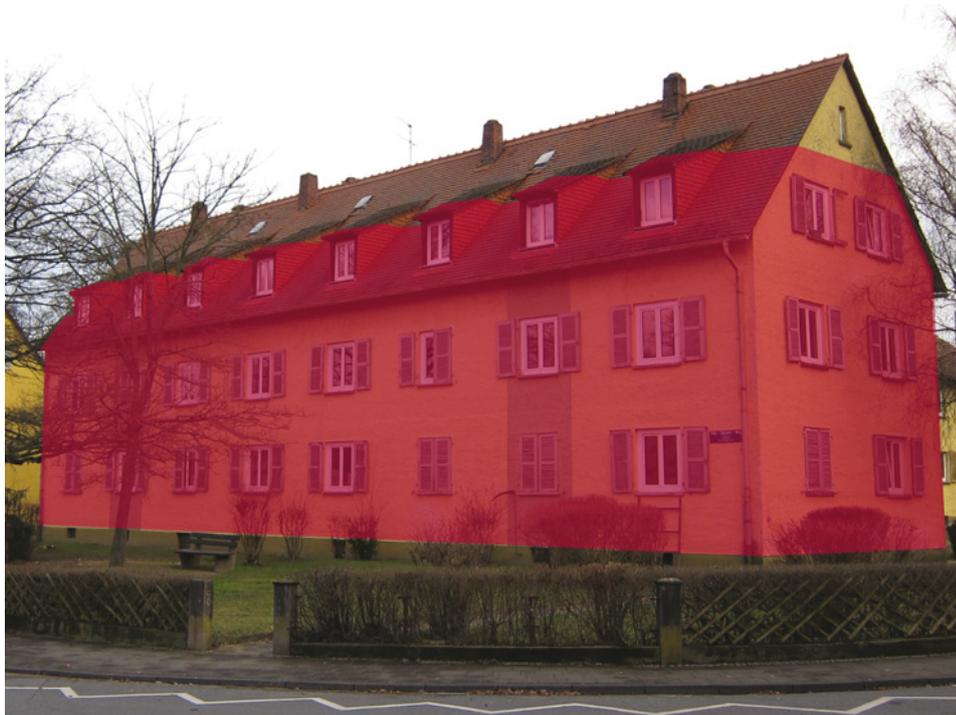


Abb. 39: Das beheizte Gebäudevolumen ist rot schattiert.

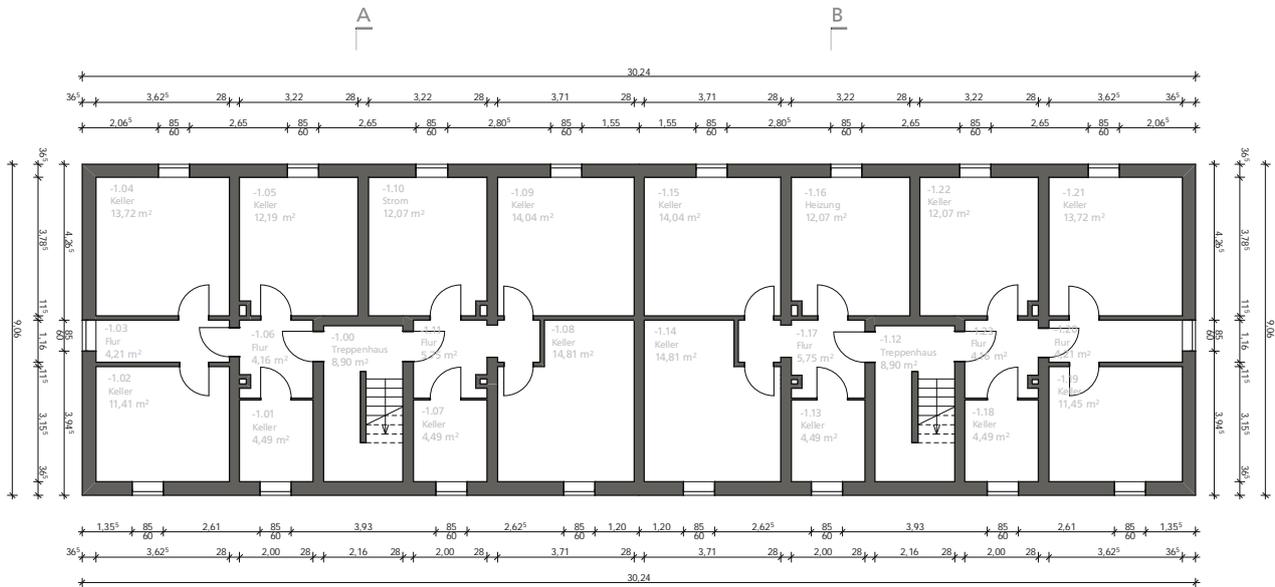


Abb. 41: Grundriss KG

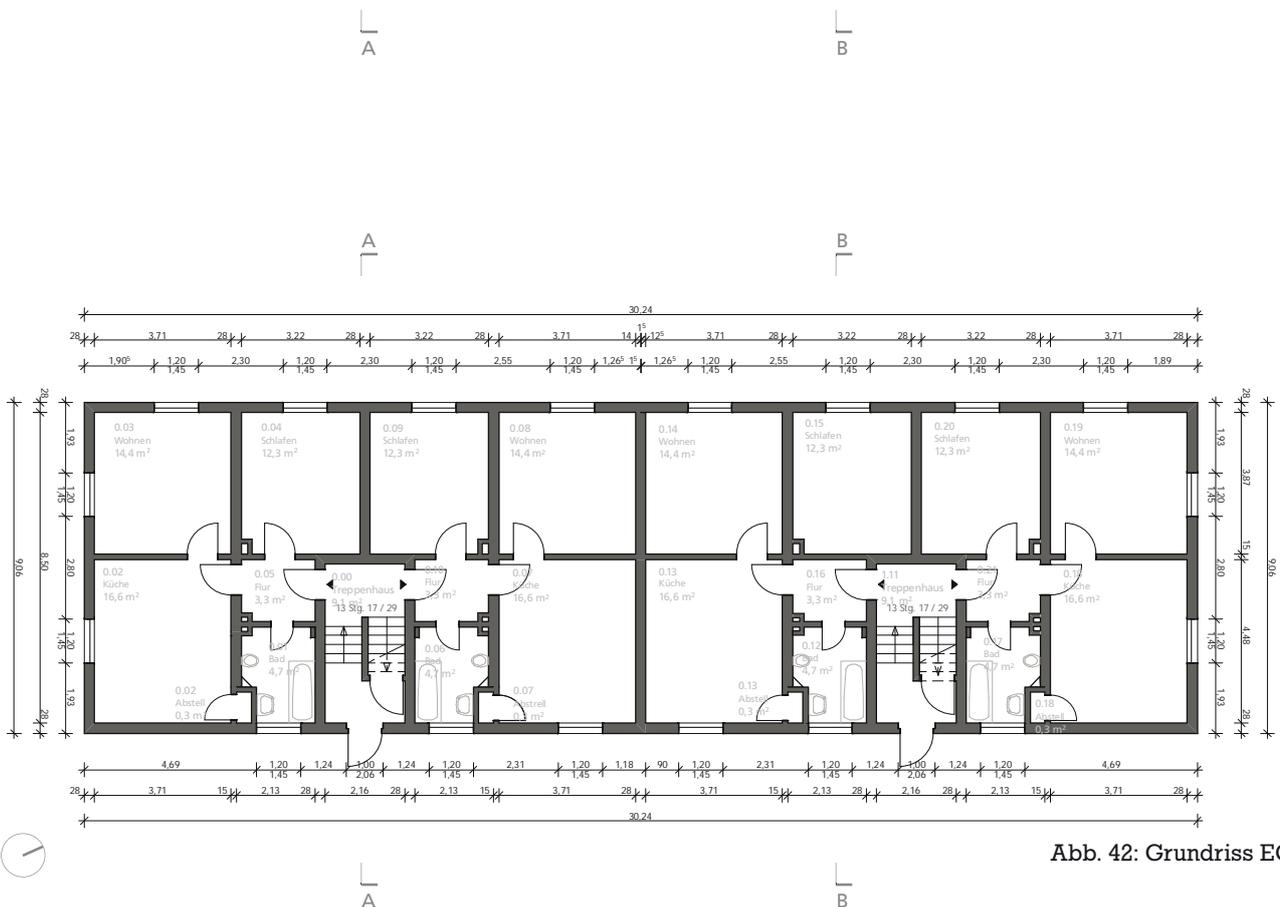


Abb. 42: Grundriss EG

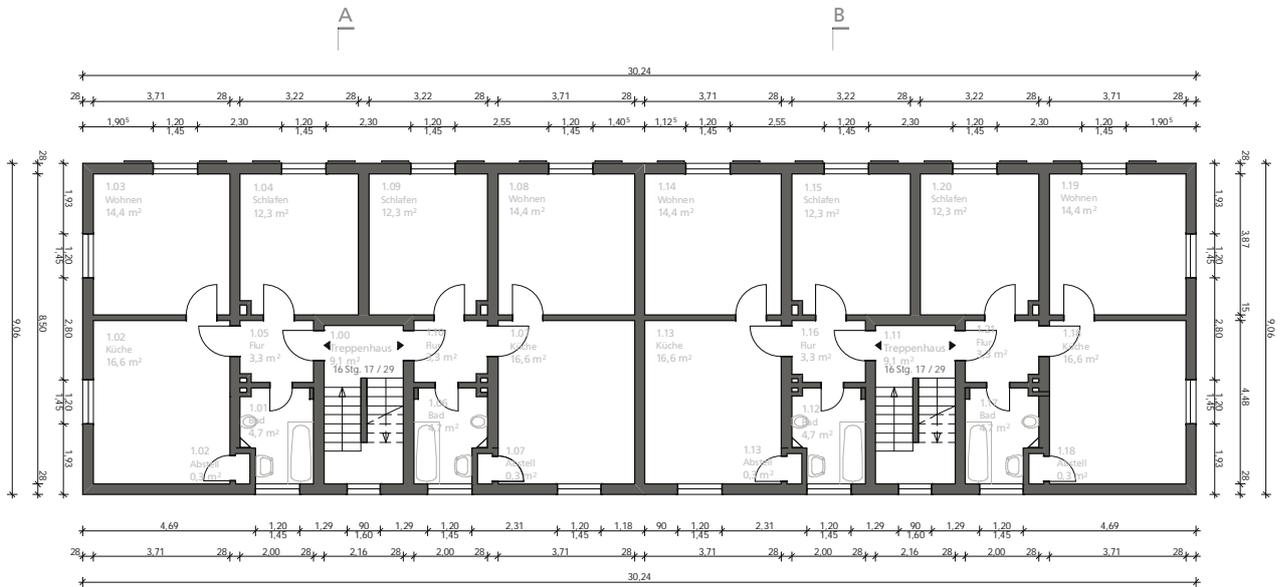


Abb. 43: Grundriss 1. OG

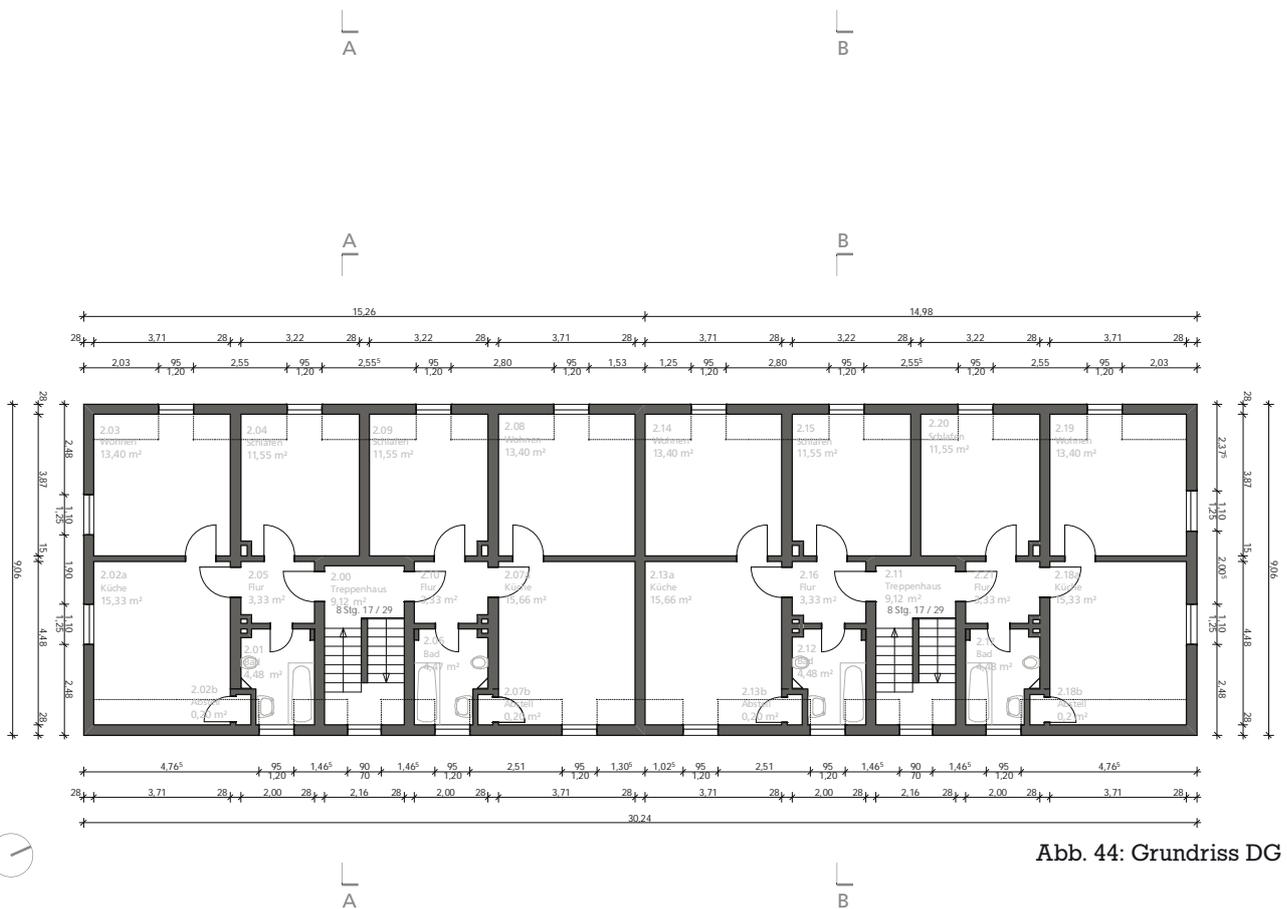


Abb. 44: Grundriss DG

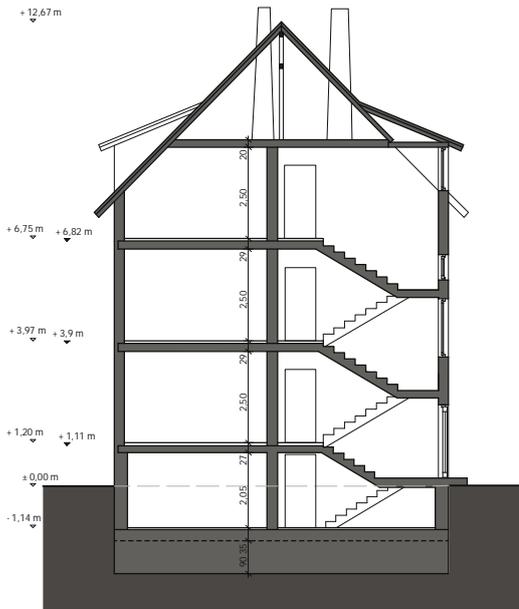


Abb. 45: Schnitt A-A

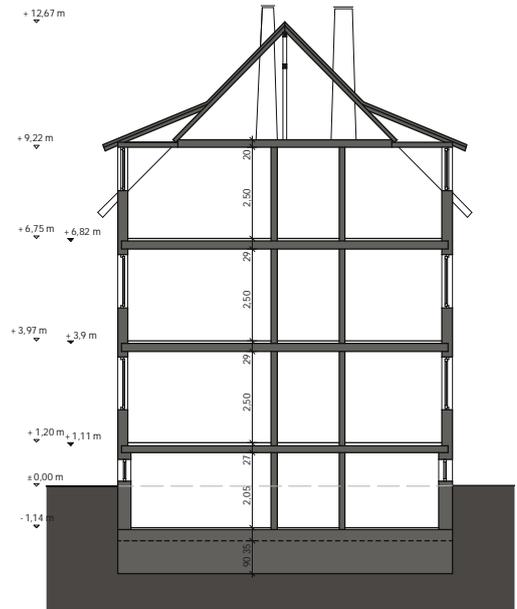


Abb. 46: Schnitt B-B

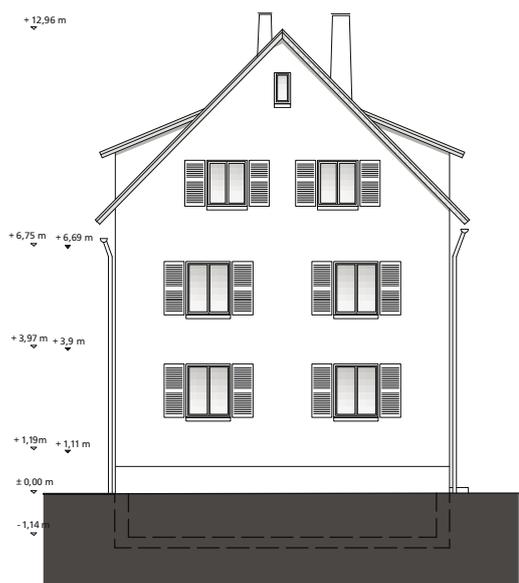


Abb. 47: Südansicht

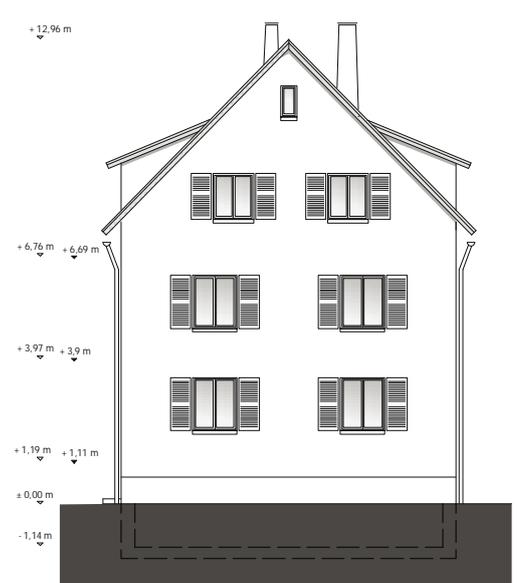


Abb. 48: Nordansicht



Abb. 49: Westansicht



Abb. 50: Ostansicht

## Gebäudehülle

Die Daten zur Gebäudehülle entsprechen den Daten des Gebäudes im Fritz-Dächert-Weg 52-54. Sie können im Abschnitt „2.3 Bestandsaufnahme Fritz-Dächert-Weg 52-54“ entnommen werden.

## Energiekonzept

Die Erläuterungen zum Energiekonzept können aufgrund der Analogie ebenfalls dem Kapitel „2.3 Bestandsaufnahme Fritz-Dächert-Weg 52-54“ entnommen werden. Abb. 51 zeigt die Einordnung in die Energieeffizienzklasse.

Insgesamt sind Transmissionswärmeverluste von 1,284 W/K sowie ein Jahres-Primärenergiebedarf von 297,2 kWh/(m<sup>2</sup>K) festzustellen.

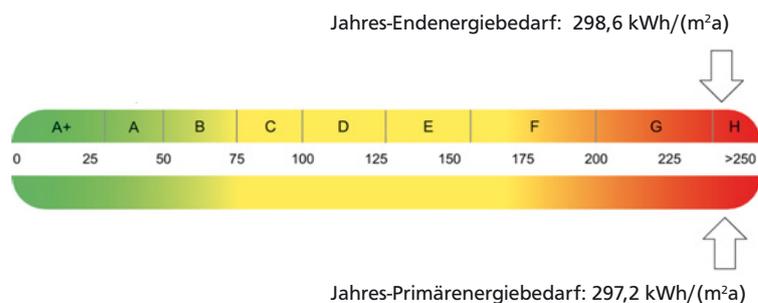


Abb. 51: Einordnung in Energieeffizienzklasse H

---

## 2.5 Schlussfolgerung - Potenziale und Hemmnisse im bewohnten Bestand

---

Die durchgeführten Standort- und Gebäudeaufnahmen dienen als Grundlage für die Sanierungsszenarien, die in den folgenden Arbeitspaketen entwickelt werden.

Die Gebäude sind fast vollständig bewohnt. Die Maßnahmen sollten entsprechend vorrangig beziehungsweise so weit wie möglich von außen durchgeführt werden. Eine lärm- und staubarme Bauphase ist anzustreben, um sowohl die Bewohner der betreffenden Gebäude als auch die der benachbarten Gebäude nicht zu belasten.

### Gebäudehülle

Der Wärmeschutz der Gebäudehülle ist insgesamt als sehr schlecht einzustufen. Geometrische Wärmebrücken an den Gebäudeecken, konstruktive Wärmebrücken bei den Bauteilanschlüssen sowie die generell fehlende Dämmung der Hüllbauteile und der Fensterlaibungen führen zu erheblichen Transmissionswärmeverlusten. Die Gefahr niedriger Oberflächen-Innentemperaturen wird durch undichte oder defekte Anschlüsse im Fensterbereich erhöht. Es besteht die Gefahr von Schimmelpilzbildung infolge Tauwasserausfall.

Da es sich nicht um geschützte Bausubstanz handelt und Eingriffe in die bewohnten Innenräume möglichst vermieden werden sollen, kann eine Dämmung der Gebäudehülle von außen erfolgen.

Der aktuelle Traufbereich und Ortgang des Bestandsdachs bieten nur bedingt Raum für die alleinige Dämmung der Fassade. Da im Dachbereich ebenfalls Sanierungsmaßnahmen erfolgen müssen, kann in diesem Fall die nachträgliche Dämmung der Außenwand als unproblematisch eingestuft werden. Die Fußbodenhöhe des Erdgeschosses liegt etwa 1,00 m oberhalb des Geländes. Um Wärmebrücken am Anschluss des beheizten zum unbeheizten Bereich zu vermeiden, sollte der Sockelbereich ebenfalls gedämmt werden.

Im Zuge der Dämmung der Außenwände sollten die Fenster ersetzt werden. Noch sind zwar die meisten Fenster weitestgehend intakt. Ein Austausch in einigen Jahren nach Erreichen ihrer tatsächlichen Lebenserwartung bedeutet jedoch zusätzlichen Anschlussaufwand an die Fassade und Mehrkosten sowie wiederholte Kosten (beispielsweise für Gerüste), die bei einem Austausch im Zuge der anstehenden Sanierung entfallen. Bleiben die Fenster dennoch bestehen, so sind in jedem Fall die Laibungen zu überdämmen. Werden die Fenster ausgetauscht oder eine neue Verglasung eingesetzt, ist eine kontrollierte Wohnraumlüftung

---

dringend empfehlenswert, um Schimmelgefahr vorzubeugen. Ist im Zuge der Erneuerung der Anlagentechnik eine Lüftungsanlage vorgesehen, sollten die Fenster in jedem Fall ausgetauscht/erneuert werden, um die erforderliche Luftdichtheit zu gewährleisten.

Die Sparrenebene ist weder gedämmt noch abgedichtet. Aufgrund des bewohnten Zustands muss die Dämmung der Sparrenzwischenräume von außen erfolgen. Hinsichtlich des sommerlichen Wärmeschutzes ist eine zusätzliche Aufsparrendämmung empfehlenswert. Die Dämmung muss nach außen durch eine Unterspannbahn, nach innen durch eine Dampfsperre geschützt werden. Eine Erhöhung der Dachkanten ist baurechtlich möglich, da die maximalen Trauf- und Firstkanten der Umgebungsbebauung eingehalten werden. Die Kellerdecke als unterer Abschluss der thermischen Hülle muss aufgrund des bewohnten Erdgeschosses von unten gedämmt werden. Die Dämmstärke ist aufgrund der niedrigen Deckenhöhe von 2,05 m auf maximal 5 cm begrenzt. Die direkt an der Decke befestigten Elektrokabel können abgenommen werden und in Trassen unterhalb der Dämmung verlegt werden. Die Verteilrohre für Heizung und Warmwasser müssen in die Dämmschicht integriert werden. Da die Gasleitung belüftet werden muss, kann die Dämmung entweder darunter verlegt werden oder der lineare Dämmverlust wird in Kauf genommen. Einige Kellerfenster schließen bündig mit der Decke ab. Sie müssten geschlossen werden und die Belüftung des Kellers mechanisch erfolgen.

#### Heizwärmeerzeuger

Der bestehende Gas-Spezialkessel ist momentan 27 Jahre alt. Ein Austausch muss laut Gesetzgeber spätestens im Jahr 2021 erfolgen. Infolge der Dämmmaßnahmen wird der Heizwärmebedarf reduziert und die Dauer der Heizperiode verkürzt, sodass der Kessel überdimensioniert sein wird. Konventionelle Gaskessel weisen im Teillastbetrieb eine geringe Effizienz auf. Daher sollte ein Austausch in Betracht gezogen werden oder weitere Bedarfe, wie beispielsweise eines größeren Warmwasserspeichers, zu decken. Die baulichen Umstände erlauben eine Umrüstung auf ein strombasiertes Heizungskonzept oder eine gasbetriebene Brennwerttherme. Eine Lagerung von alternativen Brennstoffen, wie beispielsweise Holzpellets, wäre aufgrund des Platzmangels nicht möglich. Der Anschluss an ein Wärmenetz liegt nicht vor.

#### Wärmeverteilung

Die Verteilungen im unbeheizten Keller sind bereits teilweise gedämmt. Die ungedämmten Leitungen innerhalb der thermischen Hülle liegen an den Außen-

---

wänden, was tendenziell zu höheren Wärmeverlusten führt. Infolge der Dämmung der Hülle verliert dies an Bedeutung. Die Lage und die Leitungslänge können aufgrund des bewohnten Zustands nicht verändert werden.

#### Wärmeübergabe Heizung

Zum aktuellen Zeitpunkt erfolgt die Wärmeübergabe über Radiatoren. Sie werden nach den Dämmmaßnahmen überdimensioniert sein. Das kann unter Umständen dazu genutzt werden, den Wärmebedarf über die bestehende Radiatorfläche mit einer geringen Vorlauftemperatur zu decken. Andernfalls müssen Flachheizkörper in den Wohnungen nachgerüstet werden. Eine integrierte Fußboden- oder Wandheizung kommt in den bewohnten Geschossen nicht in Frage.

#### Trinkwarmwasserbereitung

Die Trinkwarmwasserbereitung erfolgt momentan zentral über einen indirekt beheizten Warmwasserspeicher mit einem Fassungsvermögen von 500 l. Dieser ist ebenfalls fast 27 Jahre alt und sollte ersetzt werden. Der Vorteil der zentralen Warmwasserbereitung liegt in dem Potenzial, solare Energien oder zusätzlich Abwärme aus dem Wärmeereuger zu nutzen. Darüber hinaus wird der Heizkessel auch infolge des gesunkenen Wärmebedarfs besser ausgelastet. Je nach Konzept kann auch eine dezentrale Lösung von Vorteil sein, wenn beispielsweise die Effizienz von Wärmepumpen in den kühleren Monaten niedrig ist.

#### Potenziale für regenerative Energien

**Erdwärme:** Da momentan keine größeren Erdarbeiten geplant sind, bietet sich die Nutzung von Erdwärme nicht an.

**Abwasserwärme:** Die nachträgliche Integration einer Abwasserwärmepumpe kommt nicht in Betracht. Zum einen ist die Installation äußerst aufwendig. Zum anderen reichen die Durchflussmengen im Gebiet nicht aus.

**Lufttemperatur:** Die Nutzung der Außenluft kann über eine dezentrale Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung erfolgen. Eine zentrale Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung mit Wärmepumpe oder Wärmetauscher ist aufgrund des bewohnten Zustands nicht möglich. Das Klima in Hessen ist mild und warmgemäßigt. Die Durchschnittstemperatur liegt bei 9,5 °C und sinkt selten unter 0 °C

---

(CLIMATE DATA 2018). Zur Deckung des Wärmebedarfs wird eine Außenluft-Wasser-Wärmepumpe empfohlen.

Sonne: Da die Dachflächen ohnehin erneuert werden müssen, kann die Nutzung von Sonnenenergie bei der Planung berücksichtigt werden. Integrierte Photovoltaikmodule können die ansonsten notwendige konventionelle Dacheindeckung ersetzen oder ergänzen und somit Baukosten einsparen. Die Dachflächen sind zwar nicht nach Süden, dafür nach Osten und Westen ausgerichtet, werden nicht durch umgebende Bebauung oder Bäume verschattet und bieten mit etwa 45° eine geeignete Neigung. Die Kombination mit einer Wärmepumpe könnte unter Umständen das bestehende Heizungssystem komplett ersetzen.





---

### 3. Entwicklung und energetische Untersuchung von drei Szenarien

Szenarien

---

Das Erscheinungsbild der Gebäude im Fritz-Dächert-Weg 52 bis 58 repräsentiert einen Großteil des Geschosswohnungsbaus der Baualtersklasse 1949 bis 1978. Vor allem in Stadtrandgebieten zählen sie zu den ortsbildprägenden Gebäuden. Bedauerlicherweise gehören dazu oft auch unsanierte, äußerlich vernachlässigte Gebäude oder solche, bei denen bereits Sanierungen ohne einen wahrnehmbaren ästhetischen Anspruch durchgeführt wurden. Die stetig steigenden Anforderungen und Kosten dürfen nicht zulasten der Qualität gehen. Ein wesentliches Ziel beim Bauen im und mit dem Bestand sollte stets sein, eine Bereicherung für die Gestaltung der Siedlung zu initiieren.

Für die beiden Untersuchungsgebäude werden drei alternative Sanierungsszenarien entwickelt.

- Sanierung nach Energieeinsparverordnung 2016
- Sanierung zum Effizienzhaus Plus nach BMU
- Aufstockung und Sanierung zum Effizienzhaus Plus nach BMU

Bestand



Ausgangspunkt bildet der unsanierte Altbaubestand.

Sanierung nach EnEV



Die Sanierung nach Energieeinsparverordnung 2016 stellt das gesetzlich geforderte Minimum dar.

Sanierung zum Effizienzhaus Plus



Die Sanierung zum Effizienzhaus Plus nach BMU repräsentiert eine zukunftsorientierte Strategie.

Aufstockung und Sanierung zum Effizienzhaus Plus



Mit der Aufstockung und Sanierung zum Effizienzhaus Plus werden zusätzliche Potenziale zur Entlastung des angespannten Wohnungsmarkts ausgeschöpft.

Zunächst wird ein Überblick über die Grundlagen und Anforderungen der jeweiligen Standards illustriert. Im nächsten Schritt werden die jeweiligen Maßnahmen zur Umsetzung vorgestellt und die resultierenden Energiebedarfe nach DIN 18599 berechnet. Im Verlauf des Forschungsvorhabens werden mehrere Konzepte untersucht und bewertet. Bei den hier dargestellten Szenarien handelt es sich um drei möglichen Lösungsansätze, die mit der Bauherrenschaft abgestimmt wurden. Das Ziel des Forschungsvorhabens ist nicht der quantitative Überblick über eine Vielzahl von möglichen Konzepten, sondern eine qualitative Untersuchung.

---

## 3.1 Anforderungsprofile

---

### 3.1.1. Energieeinsparverordnung EnEV 2016

Die Energieeinsparverordnung EnEV entstand in erster Fassung im Jahr 2002 als Zusammenschluss der damals geltenden Wärmeschutzverordnung (WSchV 1995) und der Heizungsanlagenverordnung (HzAnlV 1998). Sie wird stetig an die sich verändernden technologischen Erkenntnisse und Möglichkeiten angepasst. Die EnEV stellt den gesetzlich vorgeschriebenen Mindeststandard dar und ist somit ein wesentliches Steuerelement der deutschen Bundesregierung zum Klimaschutz.

Sie stellt sowohl Anforderungen an die thermische Qualität der Gebäudehülle als auch an die Anlagentechnik. Im Rahmen von Sanierungen gilt maßgeblich § 9 „zur Änderung, Erweiterung und Ausbau von Gebäuden“. Die Nachweisführung variiert in Abhängigkeit des baulichen Eingriffs. Bezugnehmend auf das Vorhaben im Fritz-Dächert-Weg 52-54 gibt es zwei Möglichkeiten der Nachweisführung:

- Bauteilverfahren
- Referenzgebäudeverfahren

#### Bauteilverfahren

Das Bauteilverfahren kommt zur Anwendung bei erstmaligem Einbau oder Ersatz von Außenbauteilen oder der Erneuerung von mehr als 10 % der Bauteilfläche. Für den Nachweis müssen die maximalen Höchstwerte der Wärmedurchgangskoeffizienten der Bauteile die Werte der Tabelle 1 in Anlage 3 der EnEV eingehalten werden. In Tab. 6 sind die bestehenden U-Werte und die maximal zulässigen U-Werte einander gegenübergestellt.

| Bauteil               | Fritz-Dächert-Weg 52-54<br>U [W/(m <sup>2</sup> K)] | EnEV 2016<br>U <sub>max</sub> [W/(m <sup>2</sup> K)] |
|-----------------------|---|--|
| Dachfläche            | 1,58  | 0,24   |
| Oberste Geschossdecke | 0,91  | 0,24   |
| Außenwand             | 1,25  | 0,24   |
| Fenster               | 3,0   | 1,3  |
| Kellerdecke           | 0,9   | 0,3  |

Tab. 6: Gegenüberstellung der vorhandenen U-Werte mit den maximal zulässigen nach EnEV 2016

## Referenzgebäudeverfahren

Die Anforderungen von Tab. 6 gelten als erfüllt, wenn nach der Sanierung der Jahres-Primärenergiebedarf sowie der spezifische, auf die wärmeübertragende Umfassungsfläche bezogene Transmissionswärmeverlust des Untersuchungsobjekts bis maximal 40 % schlechter sind als die entsprechenden Werte des sogenannten Referenzgebäudes nach § 3 Absatz 1 bzw. nach Anlage 1 Tabelle 2. Das Referenzgebäude ist ein Vergleichsobjekt gleicher Geometrie, Gebäudenutzfläche und Ausrichtung, jedoch mit einer festgelegten technischen Ausführung, die in Anlage 1 Tabelle 1 der EnEV geregelt ist.

Beim alternativen Nachweis über das Referenzgebäudeverfahren nach DIN V 8599:2016-10 ergibt sich folgende Gegenüberstellung (Tab. 7):

Tab. 7: Gegenüberstellung der vorhandenen Kennwerte mit den maximal zulässigen nach EnEV 2016

| Kennwert  | Fritz-Dächert-Weg 52-54 | EnEV 2014 |
|---|-------------------------|-----------|
| Jahres-Primärenergiebedarf $Q_p$ [kWh/(m <sup>2</sup> a)] | 308,0                   | 119,8     |
| Transmissionswärmeverlust $H'_T$ [W/(m <sup>2</sup> K)]   | 1,303                   | 0,700     |

Es geht deutlich hervor, dass das Untersuchungsgebäude im Fritz-Dächert-Weg 52-54 den gesetzlichen Mindeststandard im aktuellen Zustand nicht einhalten kann.

### 3.1.2. Effizienzhaus Plus nach BMU

Das Effizienzhaus Plus nach BMU entstand als Forschungsinitiative des Bundes. Bereits 2011 wurde ein erstes Pilotgebäude in Berlin errichtet. Im Forschungsförderungsprogramm des Bundesministeriums werden seither einige Neubauvorhaben und Sanierungen von Modellhäusern unterstützt, die den Effizienzhaus Plus-Standard erfüllen.

Der Standard gilt als erreicht, wenn sowohl ein negativer Jahres-Primärenergiebedarf als auch ein negativer Jahres-Endenergiebedarf vorliegen. Zusätzlich sind alle Anforderungen nach der aktuellen Energieeinsparverordnung einzuhalten.

Der Nachweis ist nach DIN 18599, alternativ DIN 4108-6 in Verbindung mit DIN 4701-10, zu führen. In Ergänzung zu den Berechnungen nach EnEV muss zusätzlich auch der Nutzerstrom berücksichtigt werden. Für Mehrfamilienhäuser liegt dieser Wert bei 35 kWh/(m<sup>2</sup>a<sub>WFL</sub>), jedoch maximal bei 2.500 kWh/a je Wohneinheit. Die Bilanzgrenze der EnEV (direkter räumlicher Zusammenhang mit dem

Haus) wird erweitert auf das gesamte Grundstück. Als Nebenanforderung zur Erfüllung des Standards gilt die ausschließliche Ausstattung des Gebäudes mit hocheffizienten Geräten (mindestens A+++ ) sowie mit intelligenten Zählern. Zusätzlich muss das Verhältnis von erzeugtem zu selbst genutztem Strom (Eigennutzungsgrad) ausgewiesen werden. In Tab. 8 sind die bestehenden und die angeforderten Werte einander gegenübergestellt.

| Kennwert  | Fritz-Dächert-Weg 56-58 | Effizienzhaus Plus nach BMUB |
|---|-------------------------|------------------------------|
| Jahres-Primärenergiebedarf $Q_p$ [kWh/(m <sup>2</sup> a)] | 297,2                   | < 0                          |
| Transmissionswärmeverlust $H_T$ [W/(m <sup>2</sup> K)]    | 1,284                   | 0,700                        |
| Jahres-Endenergiebedarf $Q_e$ [kWh/(m <sup>2</sup> a)]    | 298,6                   | < 0                          |

Tab. 8: Gegenüberstellung der vorhandenen Kennwerte mit den maximal zulässigen für das Effizienzhaus Plus nach BMU

### Gegenüberstellung der Anforderungsprofile

Der Effizienzhaus Plus-Standard nach BMU baut auf den Anforderungen der Energieeinsparverordnung auf. Teilweise werden sie verschärft oder ergänzt. Das Fraunhofer IBP veröffentlichte im Jahr 2015 erste Ergebnisse der Begleitforschung und Querauswertung von 36 Modellvorhaben in diesem Standard (ERHORN / BERGMANN 2015). Daraus geht hervor, dass die Modellbauten 40 bis 60 % bessere U-Werte als das EnEV-Referenzgebäude erzielen. Es ergeben sich Transmissionswärmeverluste zwischen 0,130 und 0,40 W/(m<sup>2</sup>K) und somit eine Unterschreitung der EnEV-Anforderungen um durchschnittlich 50 %. In Abb. 52 sind die unterschiedlichen Anforderungen grafisch aufgearbeitet.

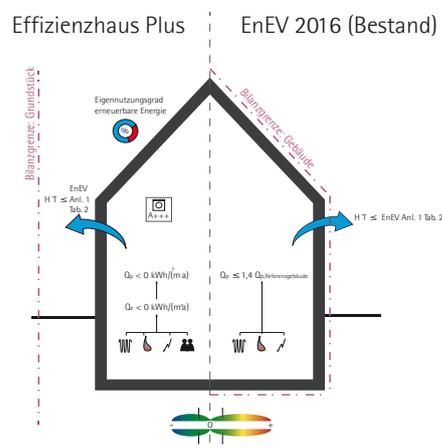


Abb. 52: Grafische Gegenüberstellung EnEV-Standard und Effizienzhaus Plus nach BMU

---

## 3.2 Sanierung nach Energieeinsparverordnung

---

Abb. 53: Perspektive Sanierung nach EnEV



Das Gebäude im Fritz-Dächert-Weg 52-54 wird nach der Energieeinsparverordnung 2016 saniert. Es gilt maßgeblich EnEV § 9 zur Änderung, Erweiterung und Ausbau von Gebäuden. Der Nachweis wird über das Referenzgebäudeverfahren nach DIN 18599 erbracht. Das Bauteilverfahren ist ebenfalls möglich. Der Zielkorridor der EnEV berücksichtigt sowohl die Qualität der Gebäudehülle als auch die Effizienz der Anlagentechnik. Bei Sanierungen im (bewohnten) Bestand kommt es aufgrund der vorgegebenen Bausubstanz oft zu Kompromissen. Die Anforderungen können daher unter Umständen leichter über das Referenzgebäudeverfahren erfüllt werden, da Schwachstellen in der Gebäudehülle über eine effiziente Anlagentechnik und umgekehrt ausgeglichen werden können.

### Architektur

Der Charakter des Gebäudes als ortsbildprägender Geschosswohnungsbau der Baualtersklasse 1949 bis 1878 soll erhalten werden. Die Maßnahmen zum Erfüllen der gesetzlichen Mindestanforderungen haben nur einen geringen Einfluss auf die Kubatur des Gebäudes. Durch die umlaufende Dämmung wird sie insgesamt nur geringfügig voluminöser. Die Fensterleibungen werden ebenfalls nur minimal tiefer und führen zu keinem wahrnehmbaren Einfluss auf die Tageslichtqualität. In der vernachlässigten, gelblich-ocker-farbenen Fassade und dem undichten roten Ziegeldach liegen Potenziale für eine architektonische Aufwertung. Das neue Dach wird mit Dachsteinen in Anthrazit belegt. Die Fassaden werden mit einem weißen, linearen Kammputz versehen. Dieser gezielte Einsatz von Kontrasten, wie er in Abb. 54 dargestellt wird, verleiht dem Gebäude nach der Sanierung ein zeitloses, klares Erscheinungsbild (Abb. 53).



Abb. 54: Materialcollage

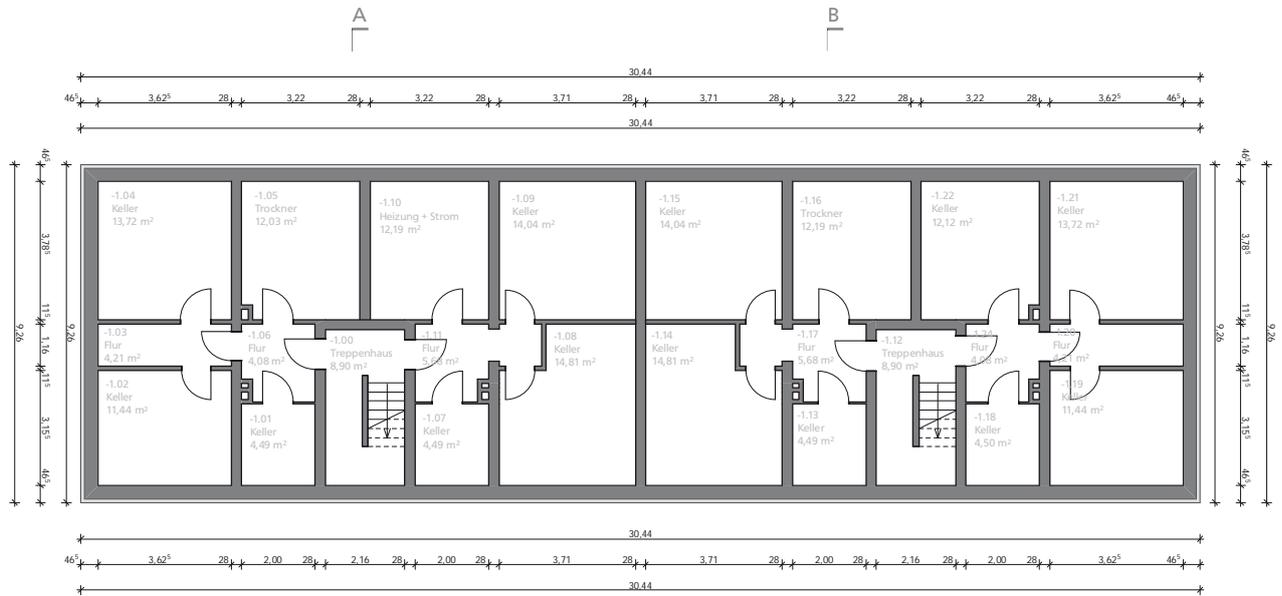


Abb. 55: Grundriss KG

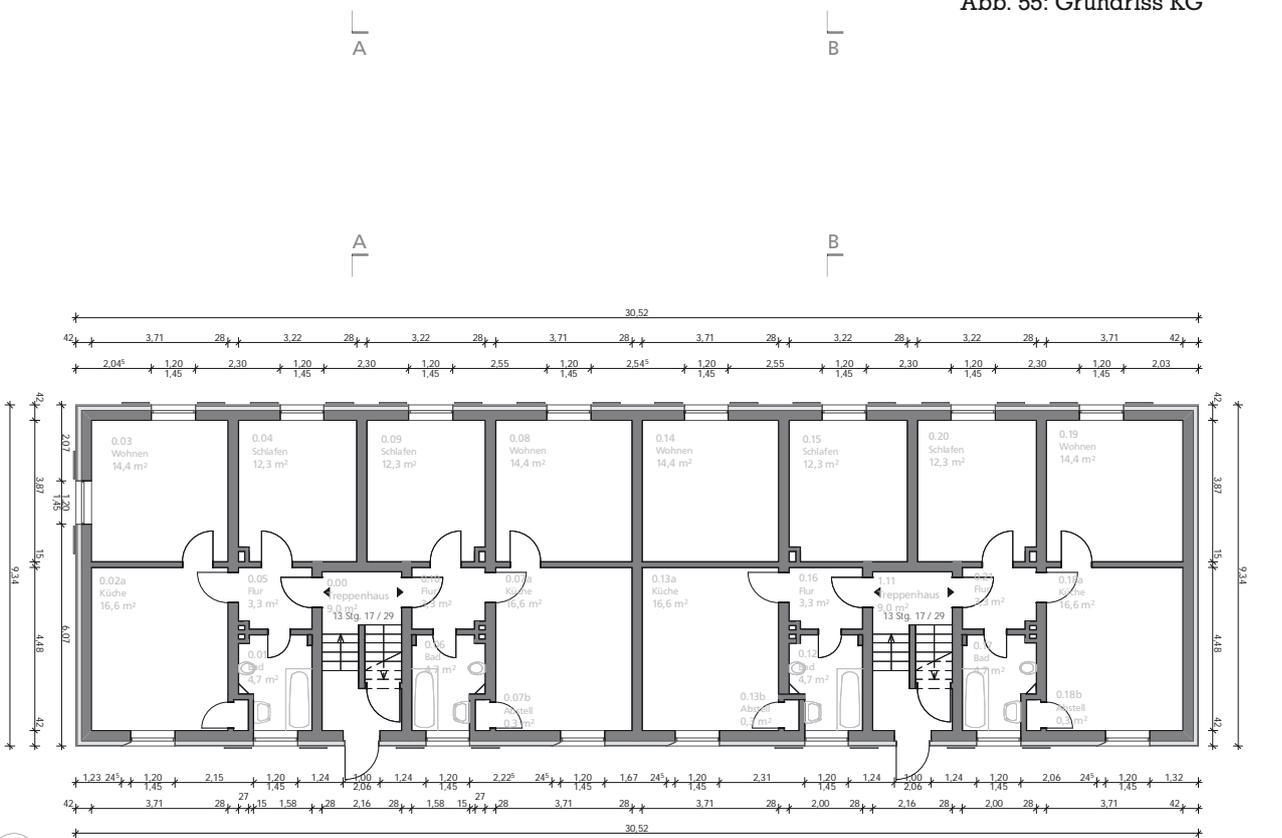


Abb. 56: Grundriss EG

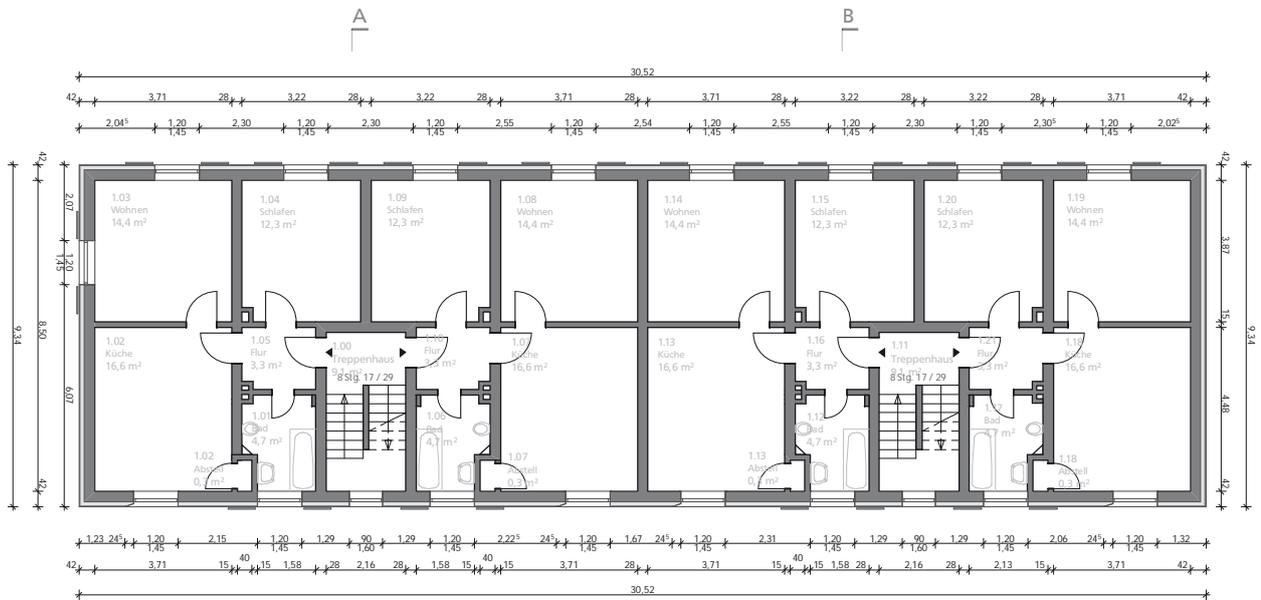


Abb. 57: Grundriss 1.OG

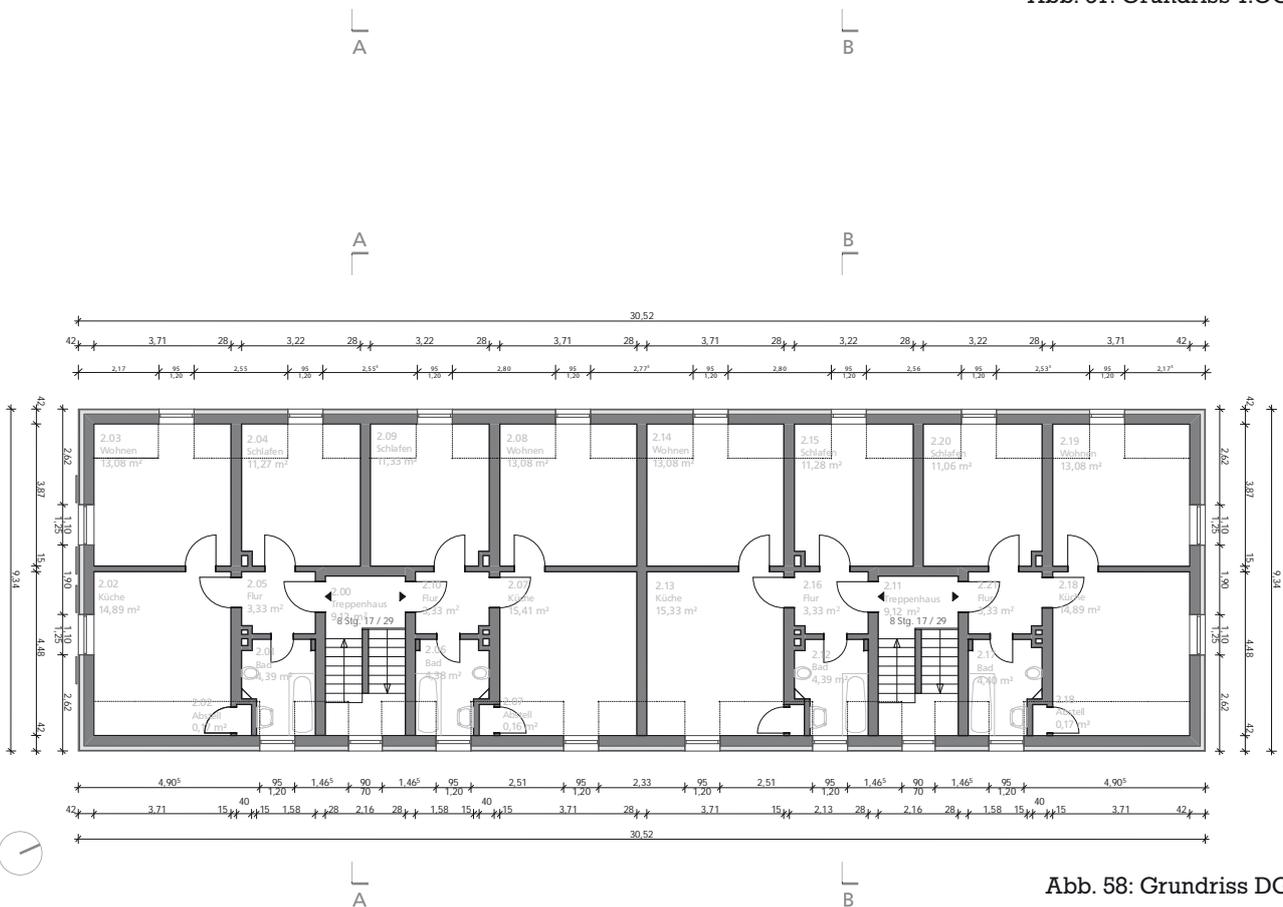


Abb. 58: Grundriss DG

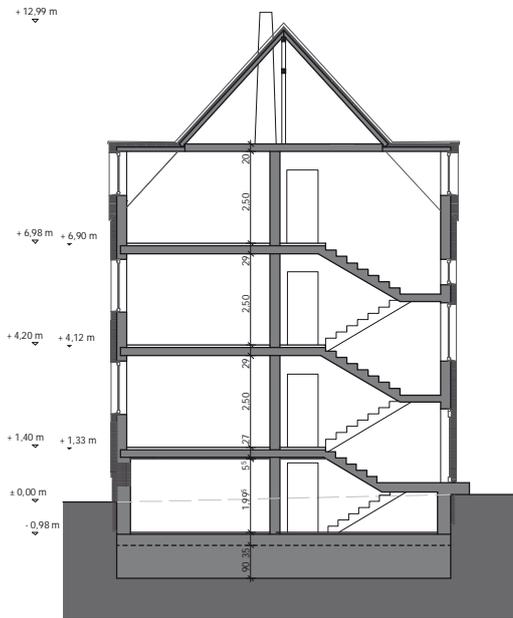


Abb. 59: Schnitt A-A

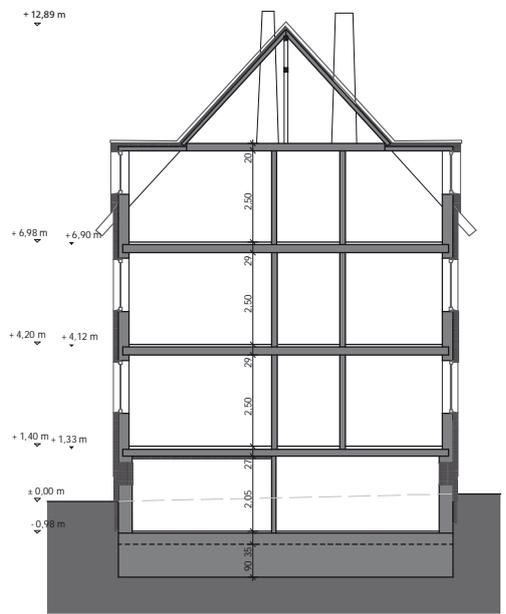


Abb. 60: Schnitt B-B

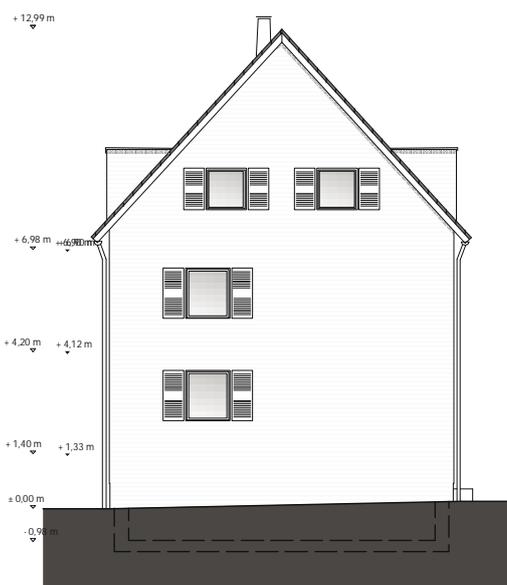


Abb. 61: Südensicht

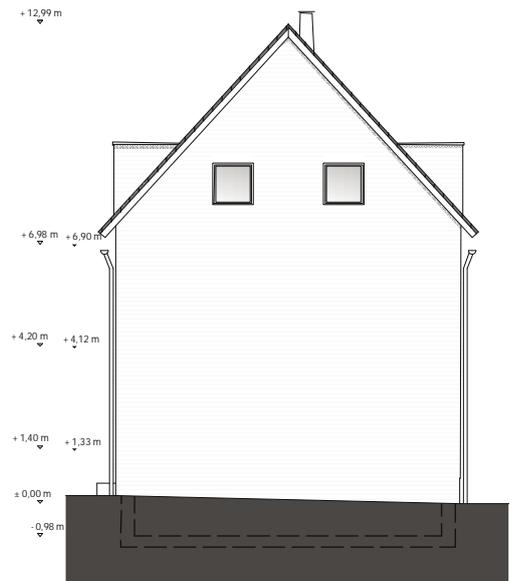


Abb. 62: Nordansicht

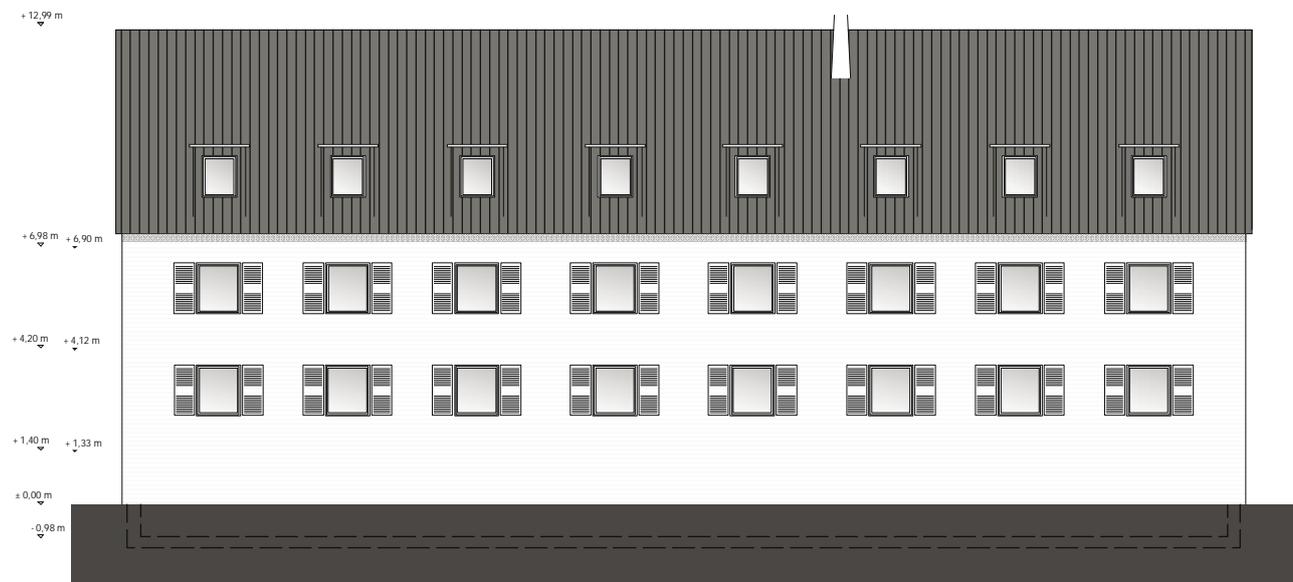


Abb. 63: Westansicht

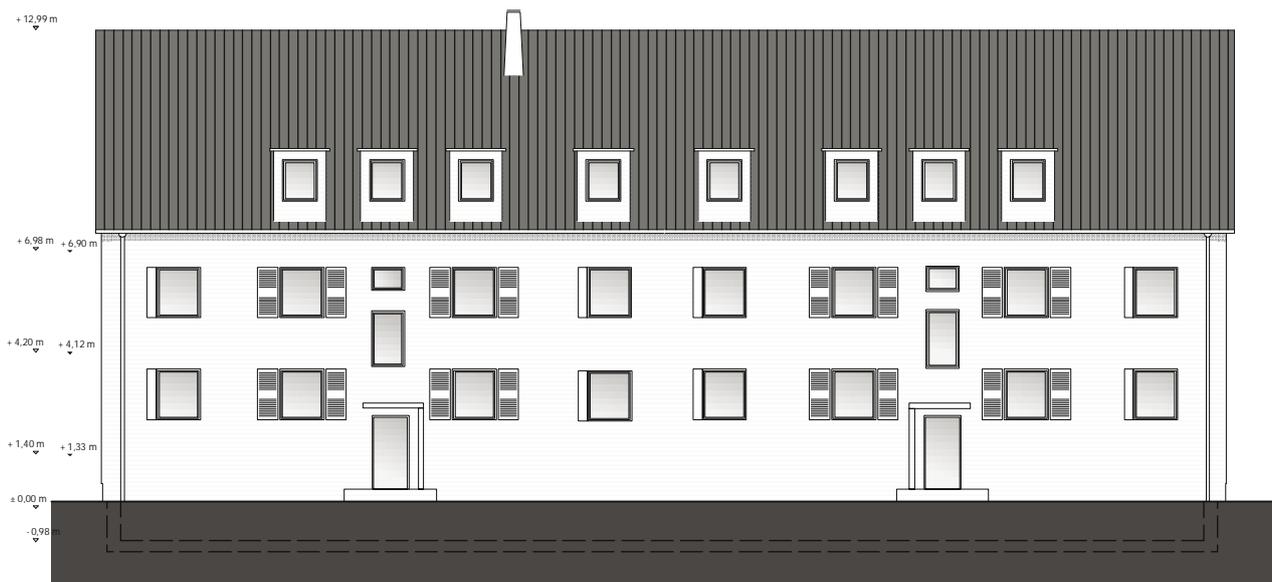


Abb. 64: Ostansicht

## Energiekonzept

Mithilfe des Austauschs der Fenster sowie der umfassenden Dämmung der Gebäudehülle können selbst mit minimalen Dämmstärken die Transmissionswärmeverluste um fast zwei Drittel gesenkt werden. Die Kombination mit einem neuen Gas-Brennwertkessel und einem neuen Warmwasserspeicher sowie einer dezentralen mechanischen Lüftung kann den Primärenergiebedarf<sup>1</sup> in dem Maße reduzieren, dass die gesetzlichen Anforderungen eingehalten werden.

Die Abbildungen Abb. 65 und Abb. 66 zeigen eine Zusammenfassung der Maßnahmen in einem Energiekonzept und einem Energieflussdiagramm.

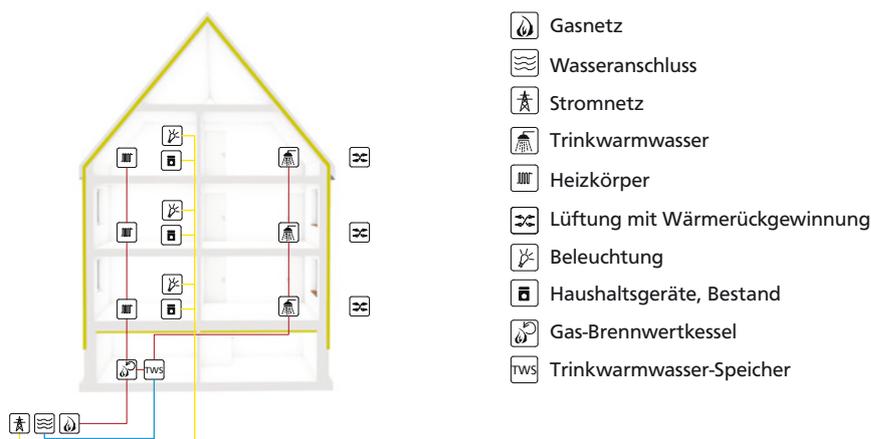


Abb. 65: Energiekonzept

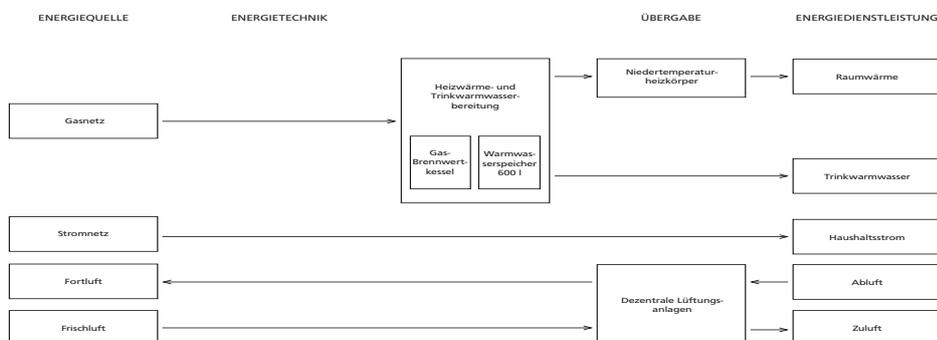
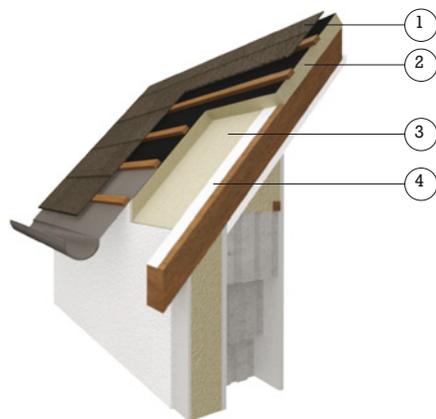


Abb. 66: Energieflussdiagramm

<sup>1</sup> Der Berechnung liegt der verbesserte Wärmebrückenbeiwert von 0,05 W/(m<sup>2</sup>K) zugrunde.

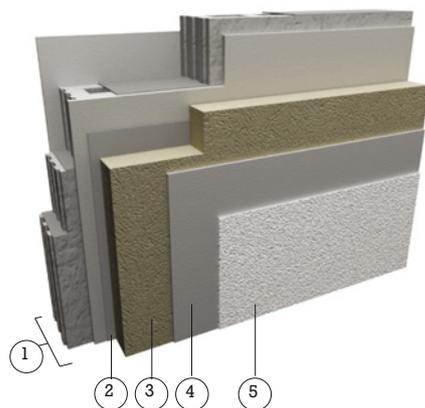
## Gebäudehülle

### Dach



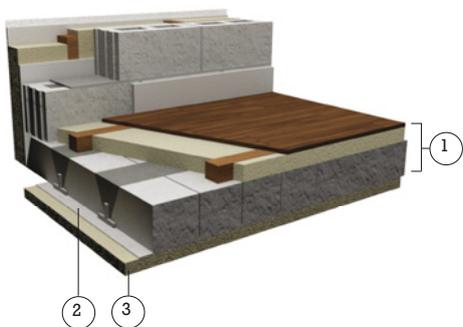
1. Dachsteine (anthrazitgrau) mit Unterkonstruktion, z.B. CREATON Kapstadt
2. Aufsparrendämmung 60 mm Steinwolle mit aufkaschierter Unterdeckbahn  $\lambda=0,035$  W/(mK), z.B. ISOVER Integra AP Supra Plus
3. Zwischensparrendämmung 90 mm Steinwolle  $\lambda=0,032$  W/(mK), z.B. ISOVER Integra ZKF, Nagelschutz 20 mm Steinwolle  $\lambda=0,032$  W/(mK), z.B. ISOVER Integra ZKF
4. feuchtevariable Dampfbremse meditop verlegt  $0,3 \leq s_a \leq 5,0$ , z.B. Vario KM Duplex UV

### Außenwand



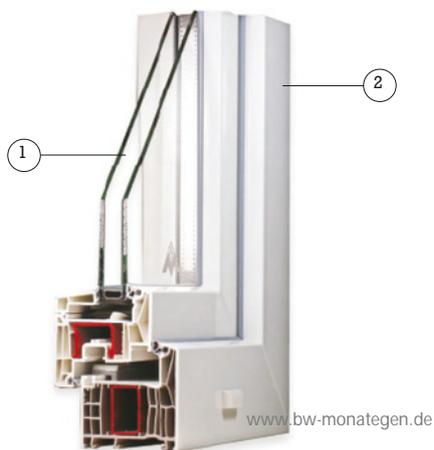
1. Bestandswand (240 mm Bimshohlblocksteine, beidseitig je 20 mm verputzt)
2. Klebemörtel 5 mm
3. Wärmedämmung 120 mm Steinwolle  $\lambda=0,035$  W/(mK), z.B. ISOVER Siliatherm WVP
4. Armierungsmörtel 10 mm
5. Leichtputz in Ausführungart: Kammputz, z.B. STO Linear 30

### Kellerdecke



1. Bestandsdecke (200 mm Betonrippendecke mit Parkett/Terrazzo auf Sandschüttung)
2. Klebemörtel 5 mm
3. Wärmedämmung 50 mm Steinwolle mit Vlieskaschierung  $\lambda=0,035 \text{ W}/(\text{mK})$ , z.B. ISOVER Topdec DP 3

### Fenster



1. 2-fach-Wärmedämmverglasung  $U_g = 1,1 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ , z.B. Synego line
2. Kunststoffrahmen, z.B. Synego line

## Heizung und Warmwasser

Der bestehende Heizkessel wird durch einen modernen Brennwertkessel mit Verbrennungsluftvorerwärmung (z.B. VISSMANN Vitocrossal 300 CU3A) ersetzt. Der Wärmetauscher im Inneren des Kessels wird innen von der Zuluft und von außen von den Abgasen umströmt. Somit wird die Wärme der Abgase auf die Zuluft übertragen und der Taupunkt unterschritten. Es kommt zur Kondensation und der Nutzung des Brennwertes. Von Vorteil ist die relative Unabhängigkeit von den Vor- und Rücklauftemperaturen der Heizung, sodass selbst hohe Systemtemperaturen möglich sind. Es kann daher auch angewendet werden, wenn die Heizkörper nicht überdimensioniert sein sollten. Ein Brennwertkessel arbeitet bei niedrigeren Heizwärmebedarfen und niedrigen Vor- und Rücklauftemperaturen am effizientesten. Die Überdimensionierung der bestehenden Heizkörper infolge des reduzierten Wärmebedarfs kann daher genutzt werden, indem geringe Vorlauftemperaturen über die größere Fläche verteilt werden können. Die Leistung von Gas-Brennwertkesseln ist zwischen 15 bis 100 % modulierbar, sodass sie optimal auf den Energiebedarf ausgelegt werden kann und zusätzliche Einsparereffekte erzielt werden können. Im Gegensatz zu Konstanttemperaturkesseln erreichen Gas-Brennwertkessel im Teillastbetrieb höhere Nutzungsgrade als unter Vollast. Es ist zu beachten, dass durch den Ausfall von Kondensat und wegen der niedrigen Abgastemperatur der thermische Auftrieb nicht ausreicht. Es müssen demzufolge neue Abgasrohre aus Edelstahl oder Kunststoff durch den Kamin-schacht verlegt werden. Der alte Trinkwarmwasserspeicher wird ersetzt durch ein neues Gerät (VISSMANN Vitocell 100-V, 500 Liter).

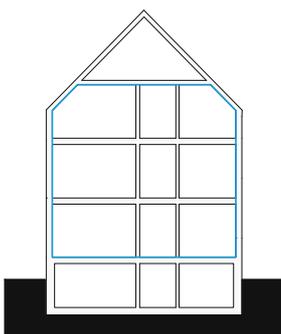


Abb. 67: Verlauf der Luftdichtheitsebene

## Luftdichtheit

In unsanierten Altbauten kommt es aufgrund von Infiltration zu unkontrollierten Wärmeverlusten durch Fugen oder undichte Stellen. Ein wesentliches Ziel im Vorhaben ist eine möglichst luftdichte Gebäudehülle. Die in Abb. 67 eingezeichnete blaue Linie stellt die Luftdichtheitsebene dar. Sie umschließt das gesamte beheizte Gebäudevolumen und verläuft raumseitig von der Dämmebene. Sie muss detailliert geplant werden und sowohl bei der Ausschreibung als auch während der Bauphase stets auf eine lückenlose Durchführung überprüft werden.

## Lüftung

Nach der Sanierung muss der Nutzer sein Lüftungsverhalten an den verbesserten Dämmstandard und an die erhöhte Luftdichtheit des Gebäudes anpassen. Die aktuell gültige Energieeinsparverordnung 2016 fordert in § 6 „Dichtheit, Mindestluftwechsel eine dauerhaft luftundurchlässige Gebäudehülle“. Gleichzeitig soll der erforderliche Mindestluftwechsel gewährleistet werden. Dieser wird in

---

der DIN 1946-6 normiert. Sie verpflichtet zur Erstellung eines Lüftungskonzepts bei Modernisierungen, wenn mehr als ein Drittel der vorhandenen Fenster ausgetauscht werden und regelt die Grundsätze zu lüftungstechnischen Maßnahmen.

Lüftungstechnische Maßnahmen sind gemäß DIN 1946-6 notwendig, wenn

- innenliegende Ablufträume existieren oder
- besondere Anforderungen hinsichtlich Energie, Schallschutz, Hygiene etc. vorliegen oder
- der Luftvolumenstrom über Infiltration geringer ist als der Luftvolumenstrom zur Feuchteabfuhr

Im Fritz-Dächert-Weg 52-54 gibt es keine innenliegenden Ablufträume. Besondere Anforderungen hinsichtlich Energieeffizienz liegen nicht vor. Im Zuge der Maßnahmen ist der Luftvolumenstrom durch Infiltration  $q_{v, \text{inf, wirk}}$  geringer als der wirksame Luftvolumenstrom zur Feuchteabfuhr  $q_{v, \text{ges, NE, FL}}$ :

$$q_{v, \text{inf, wirk}} = 11,34 \text{ m}^3/\text{h} < q_{v, \text{ges, NE, FL}} = 23,03 \text{ m}^3/\text{h}.$$

Demzufolge sind lüftungstechnische Maßnahmen notwendig. Die DIN 1946-6 gibt Berechnungsverfahren für die notwendigen Luftvolumenströme für vier Lüftungsstufen vor:

- Lüftung zum Feuchteschutz
- Reduzierte Lüftung
- Nennlüftung
- Intensivlüftung

Die Lüftung zum Feuchteschutz sowie die Reduzierte Lüftung müssen kontinuierlich nutzerunabhängig sichergestellt werden. Eine freie Lüftung über Fenster kann dafür nicht angesetzt werden.

Da es sich um ein bewohntes Gebäude handelt, müssen die Eingriffe so gering wie möglich ausfallen. Zentrale Lösungen, für die ein innenliegender Schacht hergestellt werden muss, kommen hier grundsätzlich nicht in Frage. Von dezentralen Abluftanlagen in Bädern und Küchen wird ebenfalls abgesehen. Die Zuluft könnte zwar relativ unkompliziert in Form von Falzlüftern in die Fenster integriert werden, jedoch müsste zwischen den Zulufräumen (Schlafen, Wohnen) und den Ablufträumen (Bad, Küche) nicht verschließbare und exakt dimensionierte Überströmöffnungen hergestellt werden, um den Luftwechsel zu garantieren. Überströmöffnungen können in Form von Türspalten (Zarge/oben/unten) oder Wandeinbauteilen realisiert werden. In beiden Fällen sind Eingriffe in den

---

Innenräumen notwendig. Die Folge sind oft unkomfortable Schallübertragungen zwischen den Räumen und Zugerscheinungen. Vor allem im Mietwohnungsbau besteht dann das Risiko, dass diese Öffnungen blockiert werden.

Dezentrale Zu- und Abluftgeräte als Einzelraumlüfter, wie zum Beispiel VIESSMANN Vitovent 200-D, sind eine sinnvolle Lösung für den vermieteten Geschosswohnungsbau. Sie werden punktuell installiert, das Verlegen neuer Leitungen ist nicht notwendig.

Verbrauchte Luft aus den Innenräumen wird nach draußen geleitet. Frischluft wird von außen angesogen, gefiltert, durch die Wärme der Abluft vortemperiert und anschließend in den Raum geleitet. Der hygienische Mindestluftwechsel wird somit vollkommen nutzerunabhängig sichergestellt.

Die Installation eines Geräts dauert etwa drei Stunden und ist durch die notwendige Kernbohrung sowohl mit Lärm als auch geringfügig mit Staub verbunden. Es bietet sich an, diese Maßnahme in Verbindung mit dem Austausch der Fenster durchzuführen. Trotz der hohen Anfangsinvestition sind bedeutende Einsparungen an Endenergie möglich. Hinzu kommt der nicht wirtschaftlich abbildbare Gewinn an Komfort und die Gewährleistung des Feuchteabtransports.

Systeme zur kontrollierten Lüftung stellen einen kontinuierlichen, nutzerunabhängigen Luftwechsel sicher. Weitere Vorteile sind die Senkung des Schimmelpilzrisikos durch falsches Lüftungsverhalten sowie erhebliche Vorzüge hinsichtlich Nutzerkomfort: erhöhte Luftqualität durch gefilterte Luft, frische Luft bei geschlossenem Fenster und damit gleichzeitig weniger Geräuschbelastigung und weiteres mehr. Dabei sollte auf integrierte Betriebsstundenzähler geachtet werden, um mögliche Ursachen zu klären, falls plötzlich dennoch Schimmel auftreten sollte.

#### Zusammenfassung

Tab. 9 und Abb. 68 geben einen Überblick über die Ergebnisse und zur Einordnung in die Energieeffizienzklasse<sup>1</sup>.

---

<sup>1</sup> Mit der Novellierung der EnEV im Jahr 2014 wurden Energieeffizienzklassen eingeführt. Sie ergeben sich in Abhängigkeit vom Endenergiebedarf beziehungsweise Endenergieverbrauch.

| Bauteil  | Fritz-Dächert-Weg 52-54 Bestand | Fritz-Dächert-Weg 52-54 Sanierung | EnEV 2016 |
|--|---------------------------------|-----------------------------------|-----------|
| Dachfläche U-Wert [W/(m <sup>2</sup> K)]                           | 1,58                            | 0,206 (-86 %)                     | 0,24      |
| Oberste Geschossdecke U-Wert [W/(m <sup>2</sup> K)]                | 0,91                            | 0,91 (0 %)                        | 0,24      |
| Außenwand U-Wert [W/(m <sup>2</sup> K)]                            | 1,25                            | 0,235 (-81 %)                     | 0,24      |
| Fenster U <sub>w</sub> -Wert [W/(m <sup>2</sup> K)]                | 3,0                             | 1,3 (-57 %)                       | 1,3       |
| Kellerdecke U-Wert [W/(m <sup>2</sup> K)]                          | 0,9                             | 0,39 (-56 %)                      | 0,3       |
| Jahres-Primärenergiebedarf Q <sub>p</sub> [kWh/(m <sup>2</sup> a)] | 308,0                           | 112,7 (-63 %)                     | 119,8     |
| Transmissionswärmeverlust H <sub>T</sub> [W/(m <sup>2</sup> K)]    | 1,303                           | 0,479 (-63 %)                     | 0,700     |

Tab. 9: Gegenüberstellung der Kennwerte von Bestand mit denen nach der Sanierung und mit den maximal zulässigen nach EnEV 2016

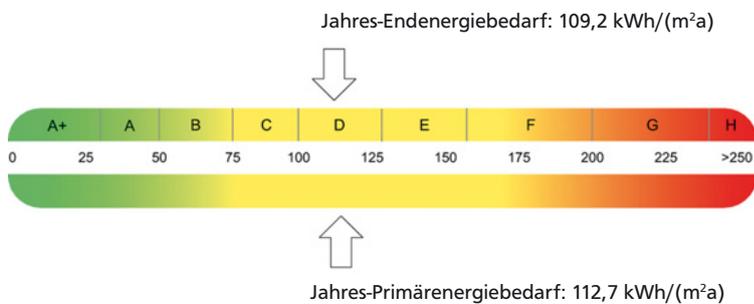


Abb. 68: Einordnung in Energieeffizienzklasse D

---

### 3.3 Sanierung zum Effizienzhaus Plus

---



Abb. 69: Perspektive Sanierung zum Effizienzhaus Plus

Das Gebäude im Fritz-Dächert-Weg 56-58 wird zum Effizienzhaus Plus weiterentwickelt. Es gelten die Vorgaben des BMU zum erweiterten EnEV-Nachweis über das Referenzgebäudeverfahren (BMU 2016).

#### Architektur

Die Identität des Gebäudes wird weiterentwickelt (Abb. 69). Die Maßnahmen zum Erreichen des Effizienzhaus Plus-Standards haben einen geringen Einfluss auf die Kubatur. Durch die umlaufende Dämmung wird sie insgesamt voluminöser. Die Fensterleibungen werden ebenfalls tiefer. Sie werden angeschrägt, um die Tageslichtqualität nicht zu mindern. Die Brüstungen der westlichen Fenster werden zurückgebaut und die Verglasungen bis zum Boden erweitert, um passive solare Gewinne auszuschöpfen<sup>1</sup>. Die natürliche Belichtung der Treppenhäuser wird verbessert durch das Freilegen der Deckenbalken in dem Bereich sowie durch den Rückbau der Gauben zugunsten von Dachflächenfenstern. Der neue Charakter wird in einer zeitgenössischen Architektursprache umgesetzt, was durch den gezielten Einsatz von Kontrasten unterstrichen wird (Abb. 70). Der Wechsel aus weißen, hinterlüfteten Faserzementfassaden (Ost, West, Nord) und dachintegrierter Photovoltaik verleiht dem Gebäude eine klare, moderne Ästhetik. Die mit weißem Kammputz ausgeführte Nordfassade tritt in einen Dialog mit dem Nachbargebäude und zeigt die Zusammengehörigkeit der Bauten auf einem Grundstück.



Abb. 70: Materialcollage

---

1 vergleiche Zwischenbericht 2

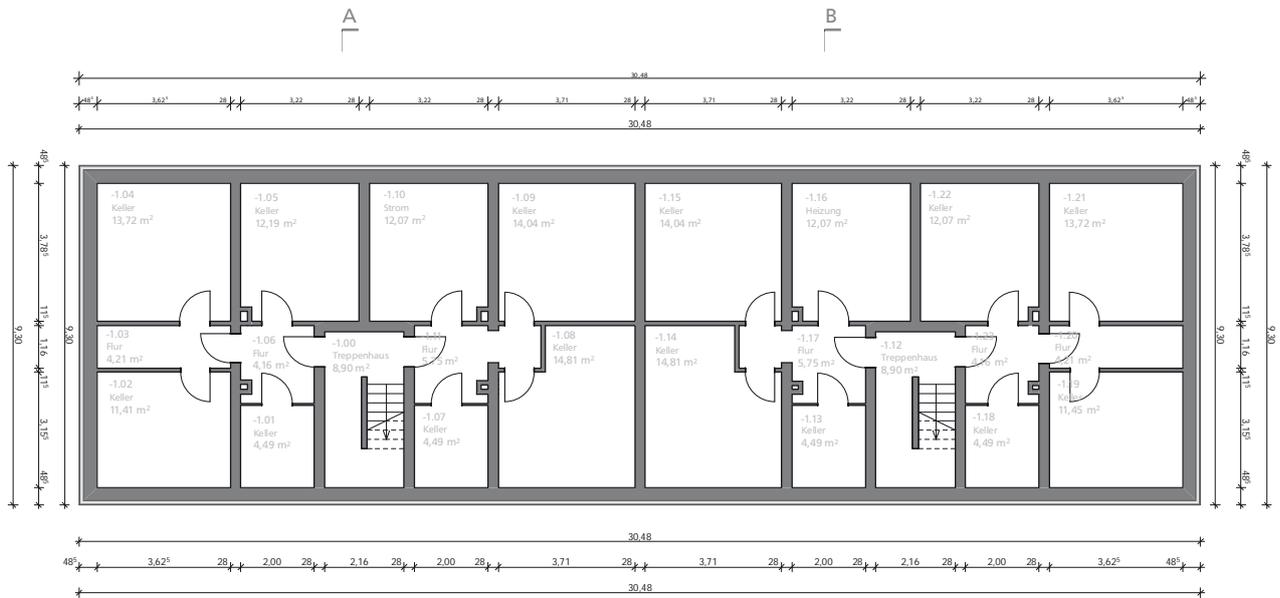


Abb. 71: Grundriss KG

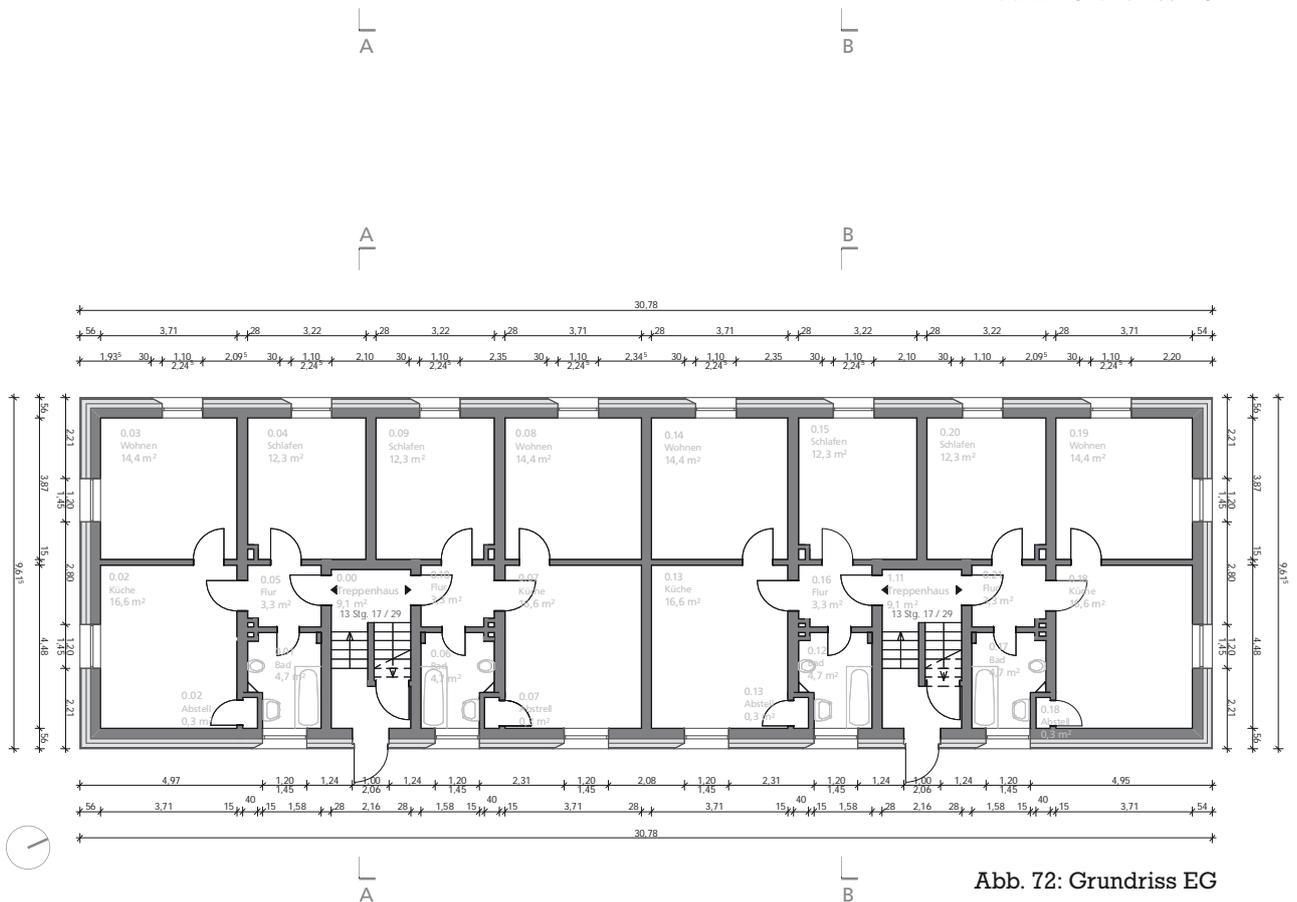


Abb. 72: Grundriss EG

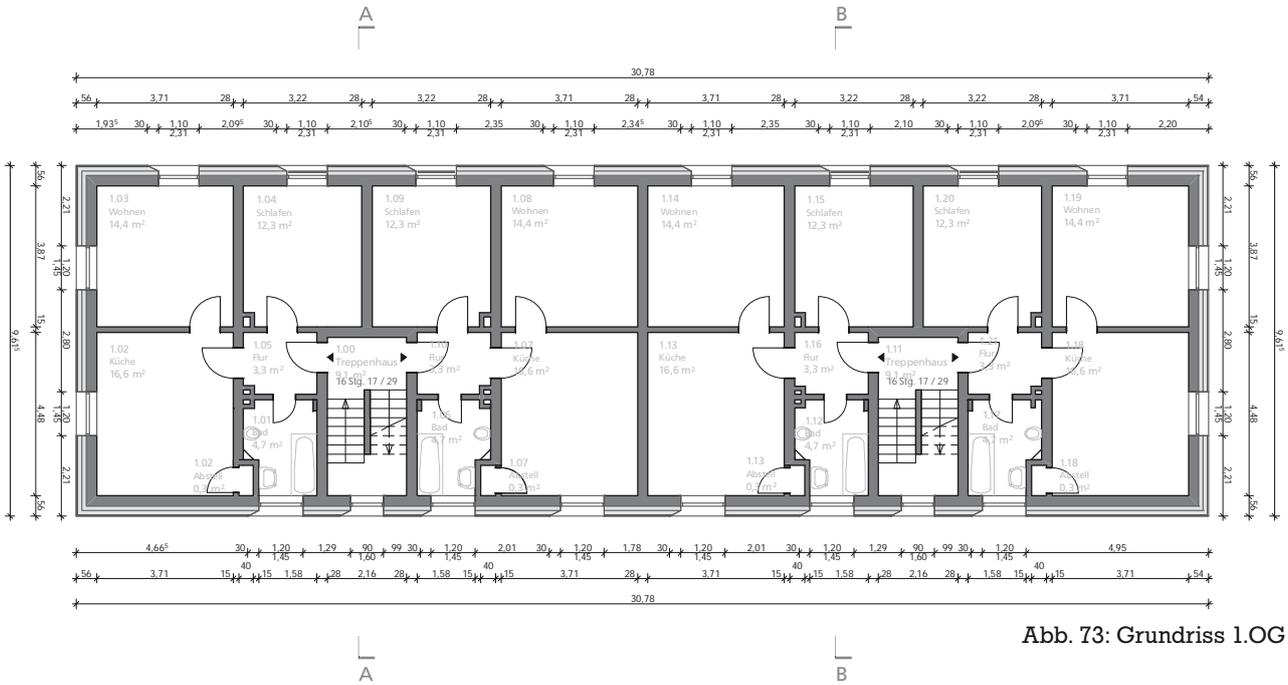


Abb. 73: Grundriss 1.OG

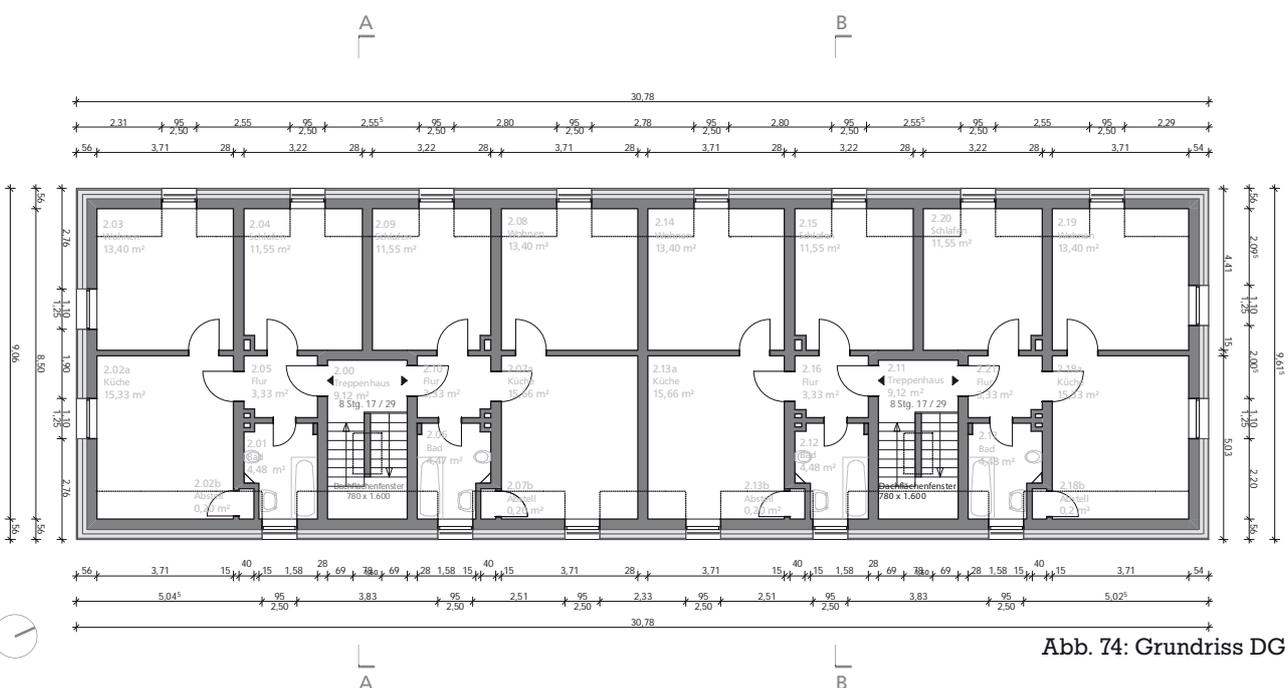


Abb. 74: Grundriss DG

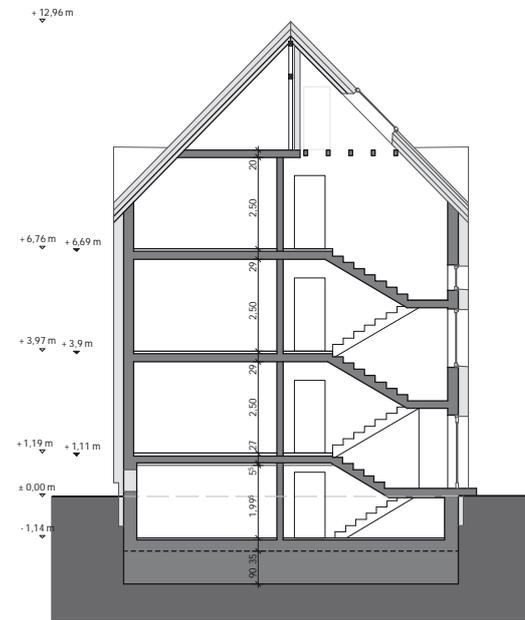


Abb. 75: Schnitt A-A

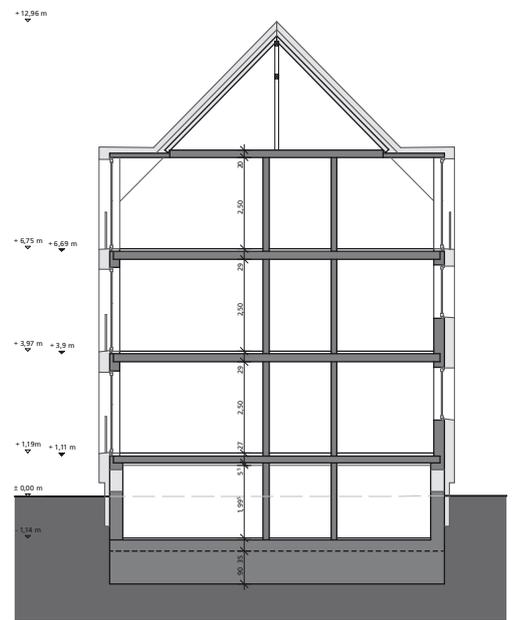


Abb. 76: Schnitt B-B

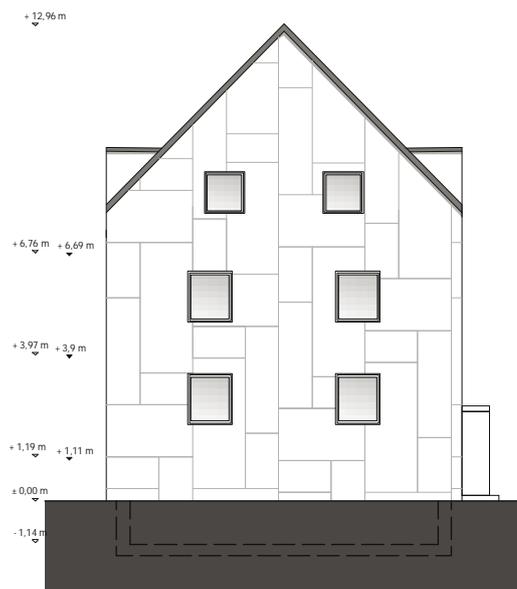


Abb. 77: Südsicht

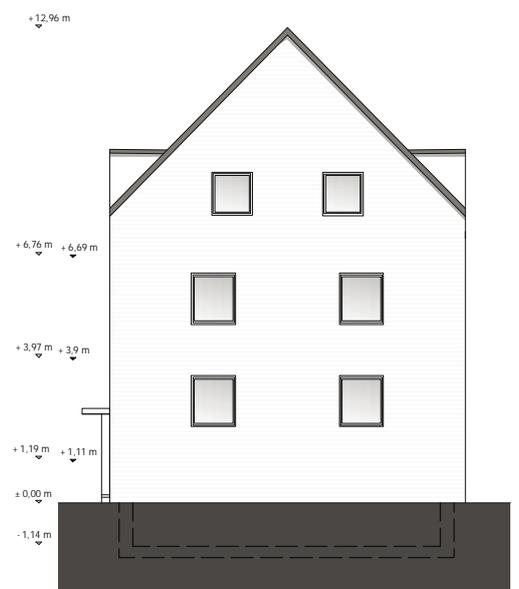


Abb. 78: Nordansicht

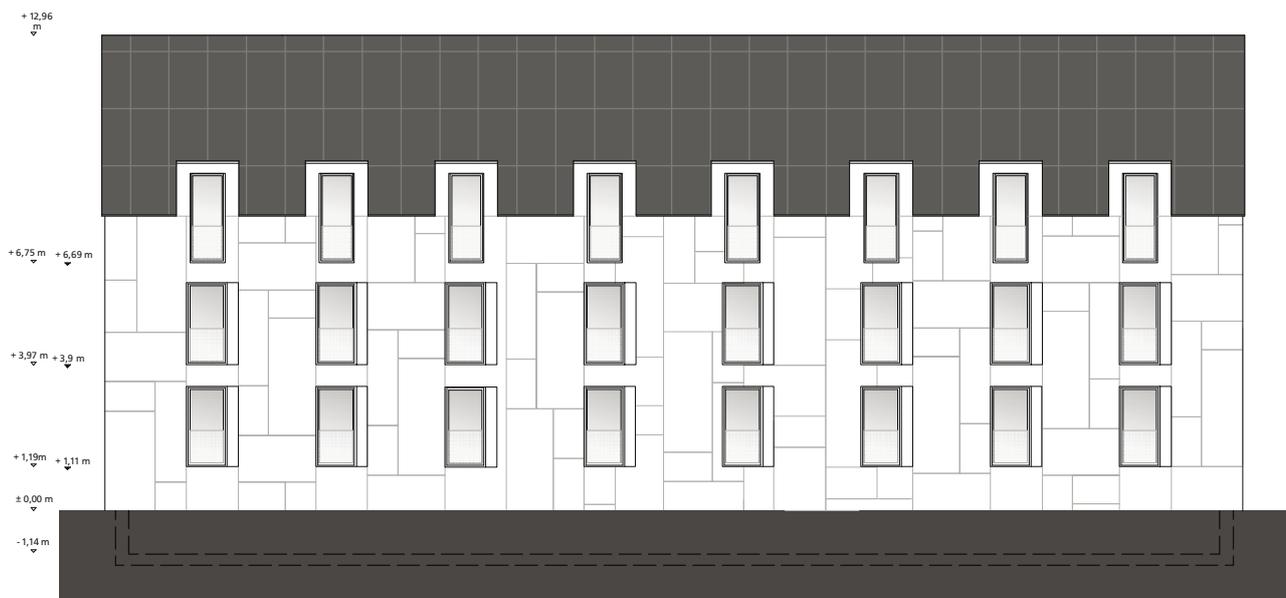


Abb. 79: Westansicht

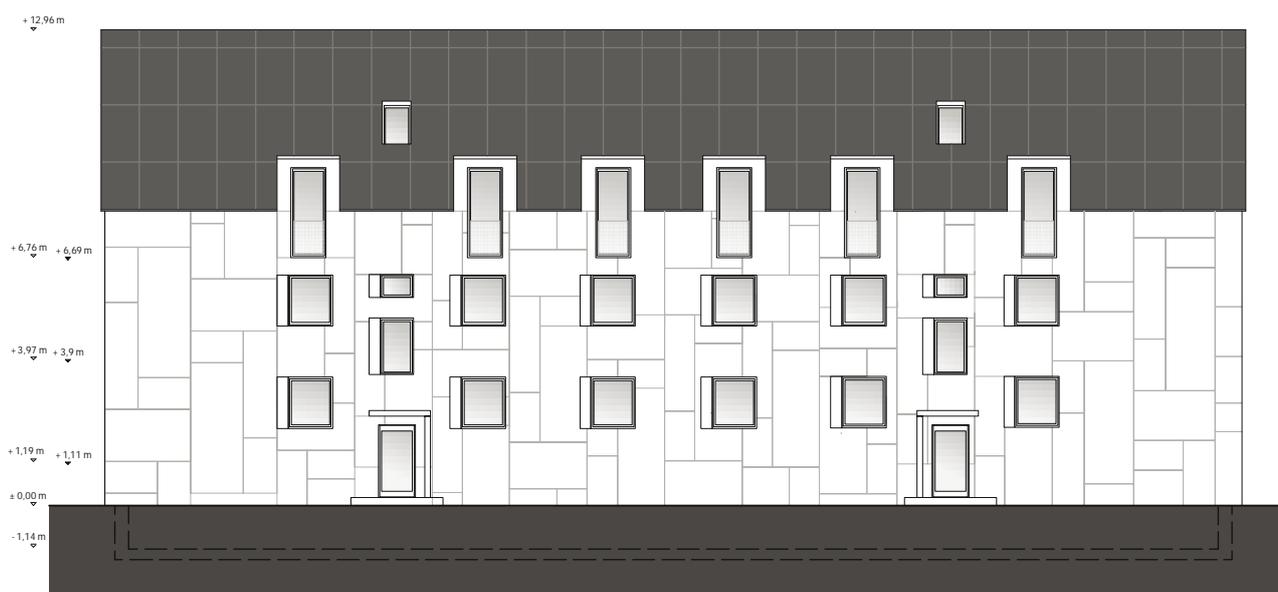


Abb. 80: Ostansicht

## Energiekonzept

Mithilfe einer umfassenden Dämmung der Gebäudehülle mit Dämmstärken zwischen 50 bis 240 mm und einem Austausch der Fenster können die Transmissionswärmeverluste um fast 70 % gesenkt werden. Das strombasierte technische Konzept aus Luft-Wasser-Wärmepumpe, Heizwasser-Pufferspeicher in Kombination mit dezentralen Frischwasserstationen in jeder Wohnung sowie einer dezentralen mechanischen Lüftung mit Wärmerückgewinnung kann den Primärenergiebedarf<sup>2</sup> in dem Maße reduzieren, dass der verbleibende Bedarf durch regenerativ erzeugten Strom aus integrierten Photovoltaik-Anlagen gedeckt werden kann. Abb. 81 und Abb. 82 zeigen die Maßnahmen im Energiekonzept und im Energieflussdiagramm.

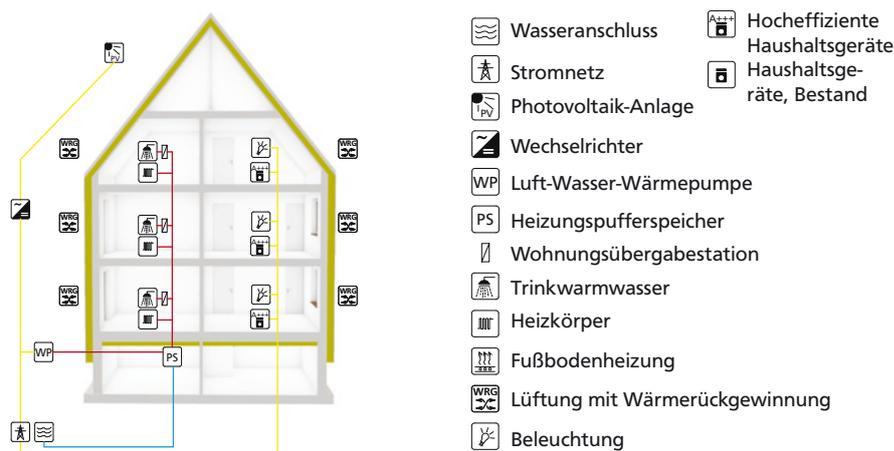


Abb. 81: Energiekonzept

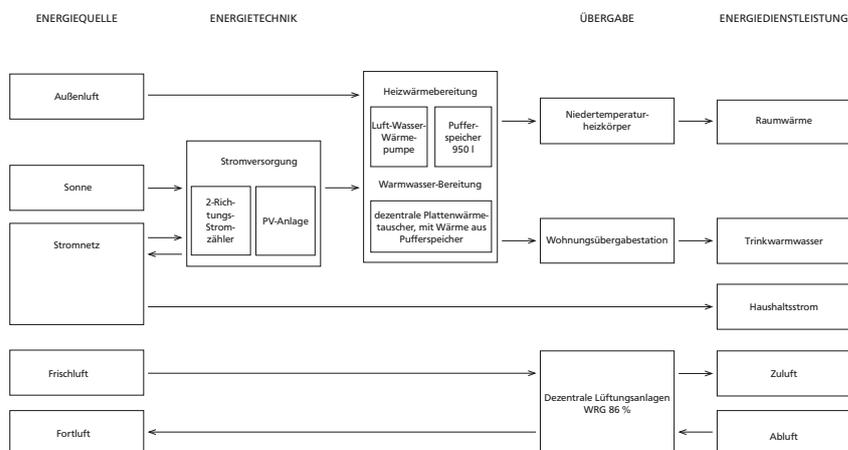
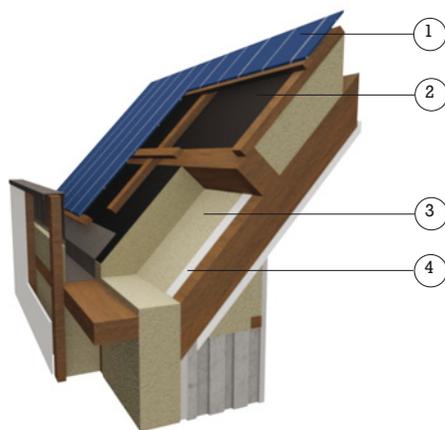


Abb. 82: Energieflussdiagramm

<sup>2</sup> Der Berechnung liegt der verbesserte Wärmebrückenbeiwert von 0,05 W/(m<sup>2</sup>K) zugrunde.

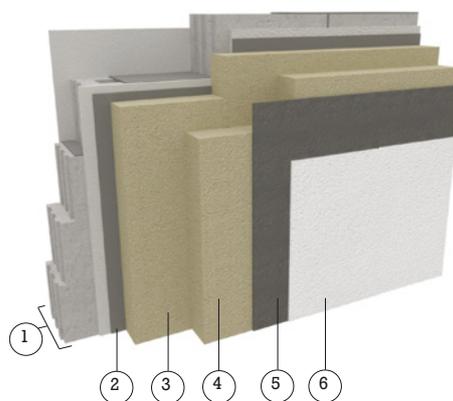
## Gebäudehülle

### Dach



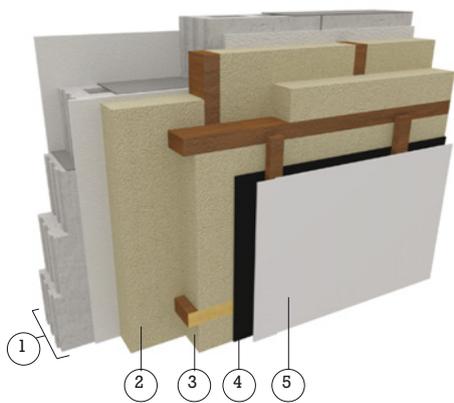
1. In-Dach PV-Anlage mit Unterkonstruktion, z.B. PV-Sol
2. Aufsparrendämmung 120 mm Steinwolle mit aufkaschierter Unterdeckbahn  $\lambda=0,035 \text{ W}/(\text{mK})$ , z.B. ISOVER Integra AP SolidBlack
3. Zwischensparrendämmung 90 mm Steinwolle  $\lambda=0,032 \text{ W}/(\text{mK})$ , z.B. ISOVER Integra ZKF mit Nagelschutz 20 mm Steinwolle  $\lambda=0,032 \text{ W}/(\text{mK})$ , z.B. ISOVER Integra ZKF
4. feuchtevariable Dampfbremse meditop verlegt  $0,3 \leq s_e \leq 5,0$ , z.B. Vario KM Duplex UV

### Außenwand Nord



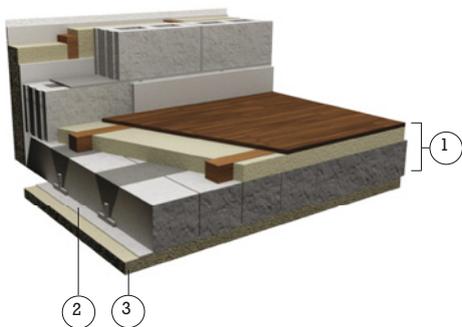
1. Bestandswand (240 mm Bimshohlblocksteine, beidseitig je 20 mm verputzt)
2. Klebemörtel 5 mm
3. Wärmedämmung 120 mm Steinwolle  $\lambda=0,035 \text{ W}/(\text{mK})$ , z.B. ISOVER Siliatherm WVP
4. Wärmedämmung 120 mm Steinwolle  $\lambda=0,035 \text{ W}/(\text{mK})$ , z.B. ISOVER Siliatherm WVP
5. Ärmierungsmörtel 10 mm
6. Leichtputz in Ausführungart: Kammputz, z.B. STO Linear 30

## Außenwand Ost, West



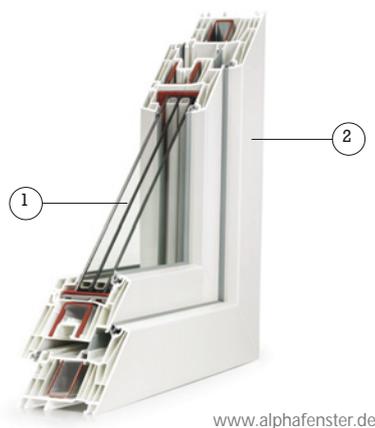
1. Bestandswand (240 mm Bimshohlblocksteine, beidseitig je 20 mm verputzt)
2. Wärmedämmung 120 mm Steinwolle  $\lambda=0,035 \text{ W}/(\text{mK})$  zwischen vertikaler Lattung, z.B. ISOVER Kontur FSP-2
3. Wärmedämmung 120 mm Steinwolle  $\lambda=0,035 \text{ W}/(\text{mK})$  zwischen horizontaler Lattung, z.B. ISOVER Kontur FSP-2
4. Folie, PP, diffusionsoffen,  $s_d \leq 0,5 \text{ m}$
5. Fassadentafeln Faserzement auf Unterkonstruktion, z.B. Eternit Equitone

## Kellerdecke



1. Bestandsdecke (200 mm Betonrippendecke mit Parkett/Terrazzo auf Sandschüttung)
2. Klebemörtel 5 mm
3. Wärmedämmung 50 mm Steinwolle mit Vlieskaschierung  $\lambda=0,035 \text{ W}/(\text{mK})$ , z.B. ISOVER Topdec DP 3

## Fenster



1. 3-fach-Wärmedämmverglasung  $U_g = 0,5 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ ,  
z.B. Synego line

2. Kunststoffrahmen, z.B. Synego line

[www.alphafenster.de](http://www.alphafenster.de)

## Heizung und Warmwasser

Der angestrebte Effizienzhaus Plus-Standard nach BMU kann mit dem bestehenden 27 Jahre alten Gas-Spezialkessel nicht erreicht werden. Die Kesselleistung wäre ohnehin allein durch den hohen Dämmstandard stark überdimensioniert, sodass der Kessel wegen des häufigen An- und Abschaltens nicht effizient arbeiten würde.

Das Effizienzhaus Plus nach BMU ist der zurzeit anspruchvollste bekannte Energiestandard. Die folgenden drei Grundsätze sind maßgebliche Schlüsselparameter zur Erfüllung:

1. Energiebedarf reduzieren (Verluste reduzieren)
2. Verbleibenden Energiebedarf effizient decken (erzeugen, speichern, verteilen, abgeben)
3. Erneuerbare Energien einbinden

Ähnlich wie bei der Gebäudehülle, sollten auch die Wärmeverluste bei den technischen Anlagen weitestgehend reduziert werden. In allen Anlagen sollte ein hydraulischer Abgleich durchgeführt werden und eine bedarfsgeführte Regelung bevorzugt werden, um eine Überversorgung zu vermeiden und um den Energiebedarf zu reduzieren. Wärmeverluste im Heizsystem sollten durch kurze Leitungswege minimiert werden. Im bewohnten Geschosswohnungsbau ist das auf-

---

grund der vorgegebenen Infrastruktur nur eingeschränkt möglich, da der Eingriff in die Innenräume so gering wie möglich gehalten werden muss.

Dezentrale Konzepte mit niedrigen Systemtemperaturen und mit entsprechend niedrigen Antriebsenergien für Pumpen haben hier den Vorzug. So lassen sich bei der Kombination einer Luft-Wasser-Wärmepumpe mit Flächenheizungen gezielt Synergieeffekte nutzen. Die Nachrüstung von Fußbodenheizungen wäre im vorliegenden Fall mit einem erheblichen Aufwand für Mieter und Vermieter verbunden. Die Mieter müssten für einige Wochen aus den Wohnungen ausziehen. Der Vermieter müsste die Kosten für den befristeten Aufenthalt übernehmen. Der Ausbau und Ersatz der Radiatoren durch Tieftemperaturheizkörper, wie zum Beispiel COSMO E2, stellt hier eine sinnvolle Alternative dar.

Luft-Wasser-Wärmepumpen für den Geschosswohnungsbau müssen für hohe Leistungen ausgelegt sein. Diese Leistung kann zurzeit meist nur von Geräten zur Außenaufstellung erbracht werden. Eine angemessene architektonische Integration ist hier ein maßgeblicher Schlüsselfaktor für die Akzeptanz der Bewohner und Nachbarn und damit für die Zukunftsfähigkeit von Effizienzhaus Plus im bewohnten Geschosswohnungsbau. Für die im vorliegenden Fall gewählte Luft-Wasser-Wärmepumpe mit integriertem Heizstab (z. B. VISSMANN Vitocal 300-A AWO.A40) wird eine Einhausung (Abb. 83, Abb. 84) entworfen, die gleichzeitig auch zum Unterbringen von Geräten und Fahrrädern genutzt werden kann.

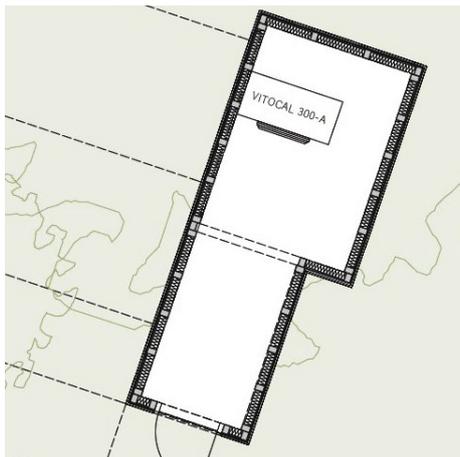


Abb. 83: Einhausung im Grundriss

Abb. 84: Einhausung in der Perspektive

Dabei sind die Vorgaben durch den Hersteller sowie der Abstand zum Gebäude zu beachten. Steht das Gerät beispielsweise nur wenige Meter vom Gebäude entfernt, können Leitungsverluste reduziert werden - jedoch könnte der Komfort der Bewohner durch die Schallemissionen beeinträchtigt werden. Ein Heizungspufferspeicher (z. B. VISSMANN Vitocell 140-E, 600 l) im Keller gleicht den im Tagesverlauf schwankenden Heizwärmebedarf aus.

---

Aus hygienischen Gründen (Legionellen) müssen zentrale Trinkwarmwasserspeicher kontinuierlich eine Temperatur von mehr als 55 °C sicherstellen. Für Luft-Wasser-Wärmepumpen bedeutet das einen erheblichen Aufwand beziehungsweise Strombedarf für den Heizstab - vor allem in den kühleren Monaten. Um einen effizienten Betrieb auf Niedertemperaturbasis für die Wärmepumpe zu gewährleisten, wird der zentrale Trinkwarmwasserspeicher durch ein dezentrales Konzept über Wohnungsübergabestationen (z. B. Pewotherm V) ersetzt. Neben den technischen Vorteilen, können auf diese Weise auch die Kosten für regelmäßige Legionellen-Untersuchungen eingespart werden, da in Wohnungsübergabestationen weniger als drei Liter Wasser gespeichert werden (DVGW 2004). Das Trinkwarmwasser wird zukünftig nach Bedarf und damit in höchster hygienischer Qualität im Durchflussprinzip über einen externen Wärmetauscher bereitgestellt. Das Heizungswasser aus dem Pufferspeicher läuft durch den Plattenwärmetauscher der Wohnungsübergabestation in den Heizungsrücklauf. Das kalte Trinkwasser wird am Plattenwärmetauscher erwärmt und kann gezapft werden. Da es sich bei Wohnungsübergabestationen um vormontierte Bauteile handelt, können sie unterputz nachgerüstet werden. Dabei sollten je nach Hersteller und Modell die Wände auf eine ausreichende Dicke und gegebenenfalls auf statische oder schallschutztechnische Maßnahmen geprüft werden.

#### Luftdichtheit

Die Anforderungen an die Luftdichtheit sind bei einer Sanierung zum Effizienzhaus Plus höher als bei einer konventionellen Sanierung, da die Wärmeverluste auf ein Minimum reduziert werden sollen. Der Verlauf der Luftdichtheitsebene entspricht der Darstellung in Abschnitt „2.3 Bestandsaufnahme Fritz-Dächert-Weg 52-54“.

#### Lüftung

Gemäß der bereits in „2.3 Bestandsaufnahme Fritz-Dächert-Weg 52-54“ erläuterten Anforderungen nach EnEV § 6 ist ein Lüftungskonzept zu erstellen. Nach DIN 1946-6 sind Lüftungstechnische Maßnahmen erforderlich, weil besondere Anforderungen hinsichtlich Energieeffizienz vorliegen und weil im Zuge der Maßnahmen der Luftvolumenstrom durch Infiltration geringer als der wirksame Luftvolumenstrom zur Feuchteabfuhr ist.

Aufgrund des bewohnten Zustandes sollten auch in diesem Szenario die Eingriffe so gering wie möglich erfolgen. Hinzu kommt, dass eine Vergleichbarkeit mit dem EnEV-Szenario berücksichtigt werden soll. Daher wird auch hier auf ein dezentrales Konzept zurückgegriffen. Empfohlen werden dezentrale Zu- und Ab-

---

luftgeräte als Einzelraumlüfter mit Wärmerückgewinnung (WRG) wie zum Beispiel VISSMANN Vitovent 200-D. Sie werden ebenfalls punktuell installiert, das Verlegen neuer Leitungen ist nicht notwendig.

Verbrauchte Luft der Innenräume wird auch hier nach draußen geleitet. Frischluft wird von außen angesogen, gefiltert, durch die Wärme der Abluft vortemperiert und anschließend in den Raum geleitet. Der hygienische Mindestluftwechsel wird vollkommen nutzerunabhängig sichergestellt. Neben dem zusätzlichen Komfort, profitieren die Bewohner zudem von sinkenden Heizkosten, denn mithilfe der Lüftungsanlage können bis zu 86 % der Abwärme nutzbar gemacht werden.

Die Installation eines Geräts dauert ebenfalls etwa drei Stunden und ist durch die notwendige Kernbohrung sowohl mit Lärm als auch geringfügig mit Staub verbunden. Es bietet sich an, diese Maßnahme in Verbindung mit dem Austausch der Fenster durchzuführen. Trotz der hohen Anfangsinvestition sind bedeutende Einsparungen an Endenergie möglich. Hinzu kommt der nicht wirtschaftlich abbildbare Gewinn an Komfort und Gewährleistung des Feuchteabtransports.

Systeme zur kontrollierten Lüftung gewährleisten einen kontinuierlichen, nutzerunabhängigen Luftwechsel. Weitere Vorteile sind die Reduktion der Heizkosten aufgrund der WRG, die Senkung des Schimmelpilzrisikos durch falsches Lüftungsverhalten sowie bedeutende Vorzüge hinsichtlich Nutzerkomfort: erhöhte Luftqualität durch gefilterte, vortemperierte Luft, frische Luft bei geschlossenem Fenster und damit gleichzeitig weniger Geräuschbelästigung und weiteres mehr. Dabei sollte auf integrierte Betriebsstundenzähler geachtet werden, um mögliche Ursachen zu klären, falls plötzlich dennoch Schimmel auftreten sollte.

#### Zusammenfassung

Tabelle Tab. 10 und Abbildung Abb. 85 geben einen Überblick über die Ergebnisse und zur Einordnung in die Energieeffizienzklasse.

| Bauteil   | Fritz-Dächert-Weg 56-58 Bestand | Fritz-Dächert-Weg 56-58 Sanierung | Effizienzhaus Plus                                 |
|---|---------------------------------|-----------------------------------|--|
| Dachfläche<br>U-Wert [W/(m²K)]                        | 1,58                            | 0,152 (-90 %)                     | keine Vorgabe                                      |
| Oberste Geschossdecke<br>U-Wert [W/(m²K)]             | 0,91                            | 0,91 (0 %)                        | keine Vorgabe                                      |
| Außenwand S, O, W<br>U-Wert [W/(m²K)]                 | 1,25                            | 0,146 (-88 %)                     | keine Vorgabe                                      |
| Außenwand N<br>U-Wert [W/(m²K)]                       | 1,25                            | 0,13 (-89 %)                      | keine Vorgabe                                      |
| Fenster<br>U <sub>w</sub> -Wert [W/(m²K)]             | 3,0                             | 0,74 (-75 %)                      | keine Vorgabe                                      |
| Kellerdecke<br>U-Wert [W/(m²K)]                       | 0,9                             | 0,39 (-56 %)                      | keine Vorgabe                                      |
| Nutzerstrom<br>[kWh/m²a]                              | -                               | 29,6                              | 35 kWh/m² <sub>WFL</sub> a, maximal 2.500 kWh/WELa |
| Eigennutzungsgrad<br>PV-Strom                         | 0                               | 0,56                              | keine Vorgabe                                      |
| Jahres-Endenergiebedarf Q <sub>p</sub> [kWh/(m²a)]    | 298,8                           | - 14,9 (-105 %)                   | < 0  |
| Jahres-Primärenergiebedarf Q <sub>p</sub> [kWh/(m²a)] | 297,2                           | - 63,3 (-121 %)                   | < 0  |
| Transmissionswärmeverlust H <sub>T</sub> [W/(m²K)]    | 1,284                           | 0,330 (-74 %)                     | 0,700  |

Tab. 10: Gegenüberstellung der Kennwerte des Bestands, der Sanierung und der Kennwerte des BMU

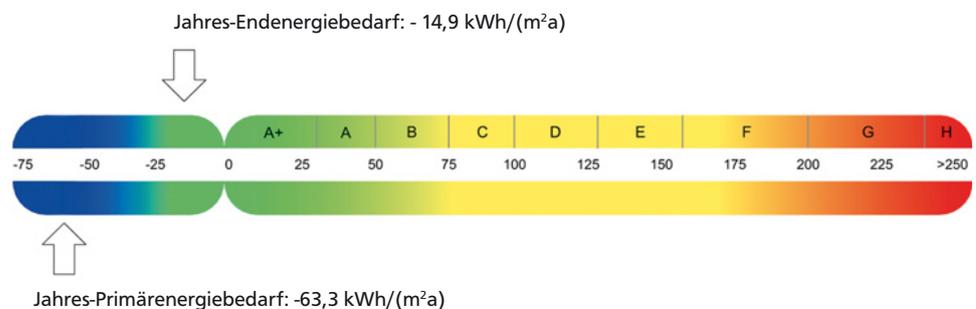


Abb. 85: Einordnung in Energieeffizienzklasse A+

---

### 3.4 Aufstockung und Sanierung zum Effizienzhaus Plus

---



Abb. 86: Perspektive Aufstockung und Sanierung zum Effizienzhaus Plus

Für das Gebäude im Fritz-Dächert-Weg 56-58 wird ein Konzept zur Aufstockung und Sanierung zum Effizienzhaus Plus entwickelt und untersucht. In dieser Alternative liegen gleich mehrere Potenziale: Zum einen wird hier ein zukunftsfähiges Konzept zur Entlastung des angespannten Wohnungsmarkts vorgestellt. Darüber hinaus kann der Effizienzhaus Plus Standard noch mehr an ökologischer und ökonomischer Qualität gewinnen, da beispielsweise keine zusätzlichen Freiflächen versiegelt werden müssen und die Kosten auf mehr Wohnfläche umverteilt werden. Es gelten die Vorgaben des BMU zum erweiterten EnEV-Nachweis über das Referenzgebäudeverfahren (BMU 2016).

#### Architektur

Die Aufstockung verändert maßgeblich die Kubatur des Gebäudes (Abb. 86). Die neuen Proportionen werden in einer zeitgemäßen Architektursprache so gestaltet, dass die Erhöhung des Gebäudes kaum wahrgenommen wird. Auch durch die bodentiefen Fenster an der Westfassade wird die Dominanz der Erhöhung ausgeglichen und die passive Solarnutzung trotz der tieferen Fensterleibungen verbessert. Durch das Anschragen der Leibungen aller Fenster wird das Tageslicht trotz der hohen Dämmstärken maximal ausgenutzt. Der gezielte Einsatz von Kontrasten in der Gestaltung unterstreicht die harmonische neue Identität (Abb. 87). Der Wechsel aus weißen, hinterlüfteten Faserzementfassaden (Ost, West) und fassadenintegrierter Photovoltaik (Süden), die sich im Dach fortsetzt, verleiht dem Gebäude eine klare, moderne Ästhetik. Die mit weißem Kammputz ausgeführte Nordfassade tritt in einen Dialog mit dem Gebäude im Fritz-Dächert 52-54 und zeigt die Zusammengehörigkeit der Bauten auf einem Grundstück. Wirt-



Abb. 87: Materialcollage

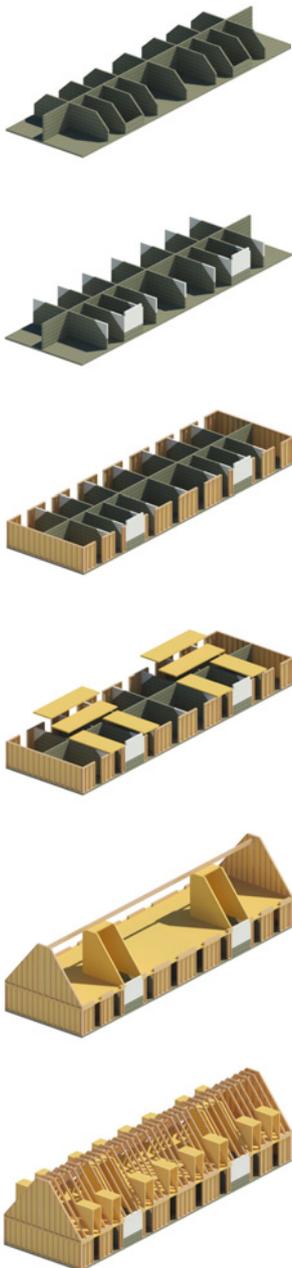


Abb. 88: Piktogramm  
Ablauf Aufstockung

Quelle: Tichelmann & Barillas  
Ingenieure

schaftlichkeit, Grundrissqualität und schnelle Durchführbarkeit im bewohnten Zustand sind die Voraussetzungen für Sanierungen zum Effizienzhaus Plus, die mit Gebäude-Aufstockungen verbunden werden.

Das bestehende Dachgeschoss im Fritz-Dächert-Weg 56-58 wird zurückgebaut. Zwei neue Geschosse werden aufgestockt. Eine ökonomische und ökologische Besonderheit des Projekts liegt im Weiternutzen der Längs- und Querwände des ehemaligen Dachgeschosses. Die quer verlaufenden ehemaligen Giebelwände werden seitlich nach oben erweitert.

Durch die Nachverdichtung wird die Wohnfläche insgesamt um 39 % erhöht. Mit acht Dreizimmerwohnungen zwischen 53 m<sup>2</sup> bis 55 m<sup>2</sup> richtet sich das Angebot an Studierende und Auszubildende oder auch an Singles und kleine Familien. Die Nachrüstung eines Aufzugs kann wirtschaftlich nicht sinnvoll dargelegt werden. Im Erdgeschoss sind bereits größere, barrierefreie Wohnungen vorhanden, sodass im Gebäude bereits heute auf verschiedene Bedürfnisse eingegangen wird.

Gebäude der Baualtersklasse 1949 bis 1978 verfügen meist über begrenzte statische Reserven. Die zusätzliche Auflast auf die bestehenden tragenden Wände aus Bimshohlblocksteinen sollte möglichst gering sein. Die beiden neuen Geschosse werden daher in einer leichten Holzrahmenbauweise und mit Holzdeckenelementen ausgeführt.

Abgesehen von den statischen Vorteilen ermöglicht diese Bauweise einen hohen Grad an Vorfertigung. Die Abmessungen der Wand- und Deckenelemente werden auf für LKW transportierbare Maße abgestimmt. Die Gauben werden bereits an die Pfetten vormontiert. Ein großer Teil der Bauphase kann dadurch bereits im Werk erfolgen. Nicht nur die Bewohner und Nachbarn ziehen ihre Vorteile aus der entsprechend kürzeren Baustellenzeit vor Ort - auch die Handwerker profitieren hinsichtlich der besseren, witterungsunabhängigen Arbeitsbedingungen. Neben der kürzeren Baustellenzeit vor Ort, wird man so auch einer möglichst lärm- und staubarme Durchführung als wesentliche Grundvoraussetzungen beim Bauen im bewohnten Bestand gerecht.

Die Piktogramme in Abb. 88 zeigen die schematische Abfolge der Durchführung. Mit der Aufstockung erhöht sich das Gebäude von 12,67 m auf 14,65 m. Es entspricht damit bauordnungsrechtlich nicht mehr Gebäudeklasse 4, sondern muss zukünftig die Vorgaben der Gebäudeklasse 5 nach § 2 HBO<sup>1</sup> erfüllen. Damit steigen unter anderem die Anforderungen an den Brandschutz.

Die Abb. 89 bis Abb. 96 zeigen die Grundrisse der Nachverdichtung (2. und 3. OG), Schnitte und Ansichten im Maßstab M 1:200.

1 Gebäudeklasse 5: sonstige Gebäude bis zu 22 m Höhe.

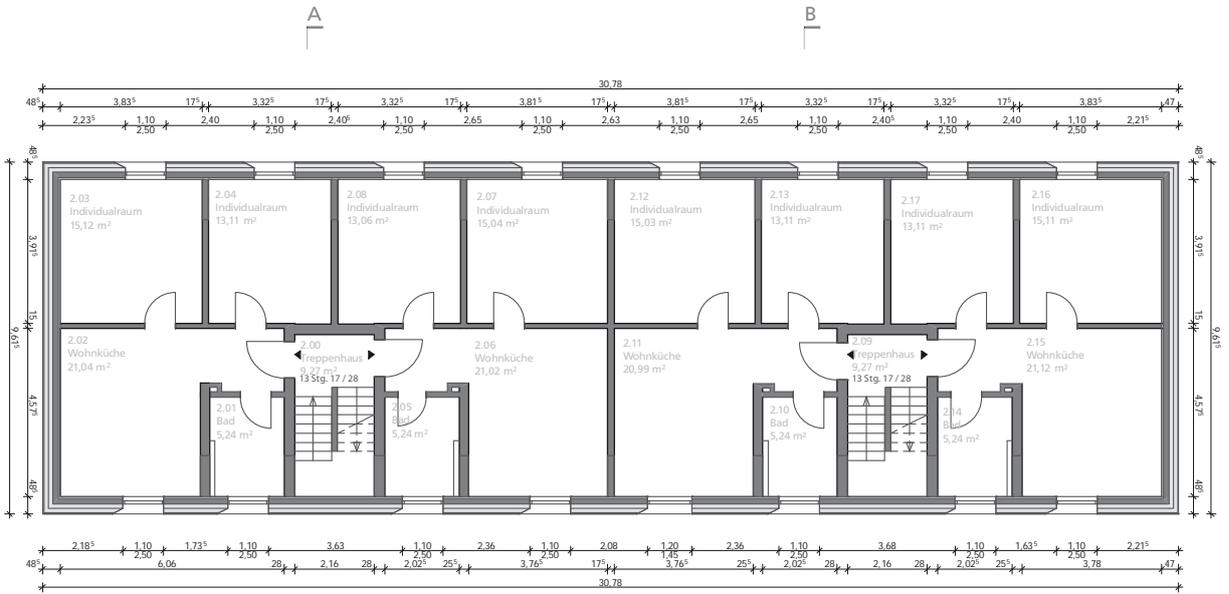


Abb. 89: Grundriss KG

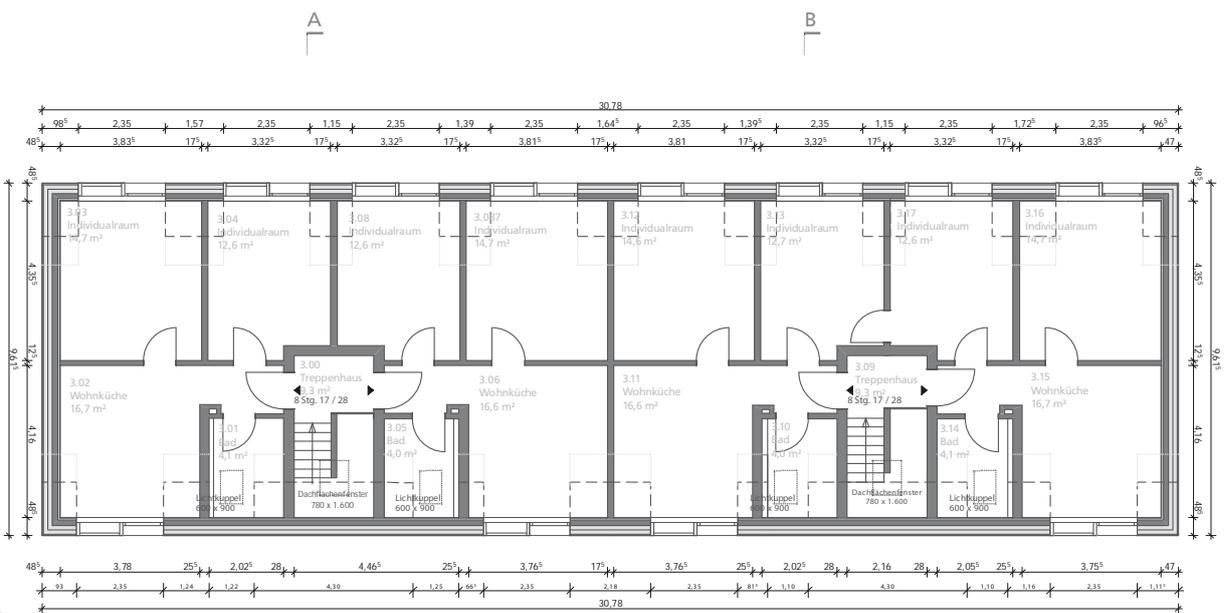


Abb. 90: Grundriss EG

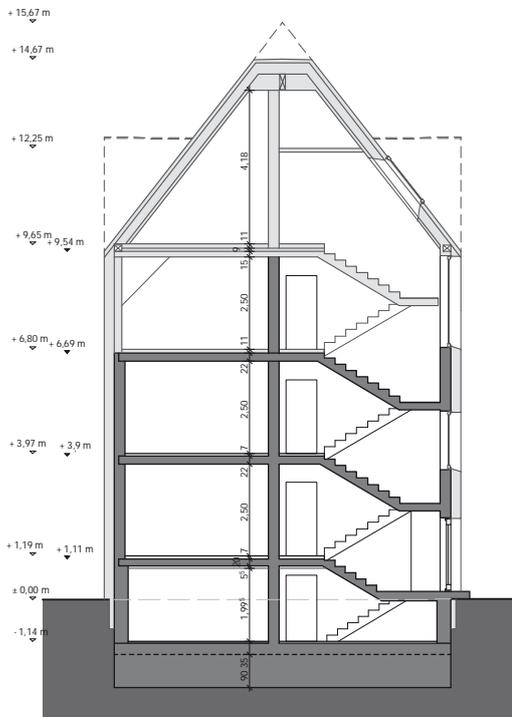


Abb. 91: Schnitt A-A

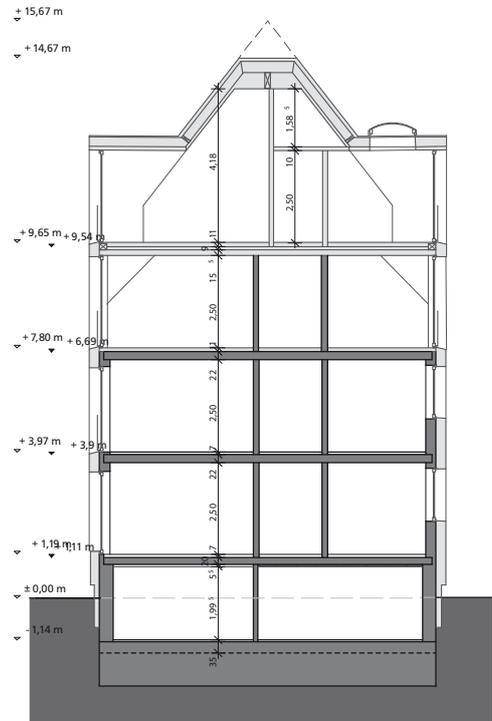


Abb. 92: Schnitt B-B

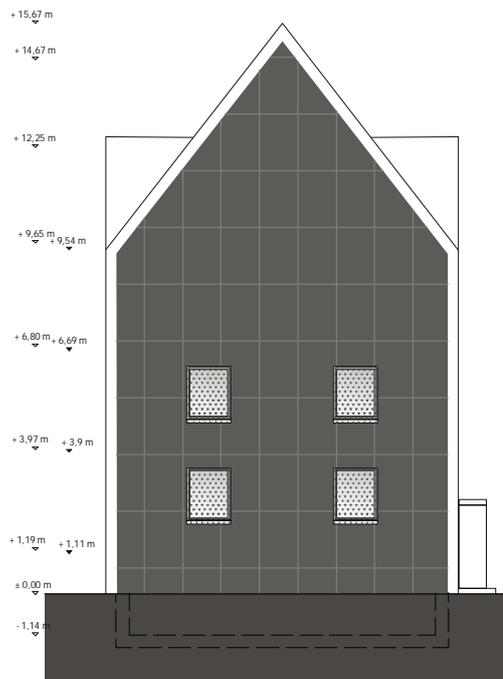


Abb. 93: Südansicht

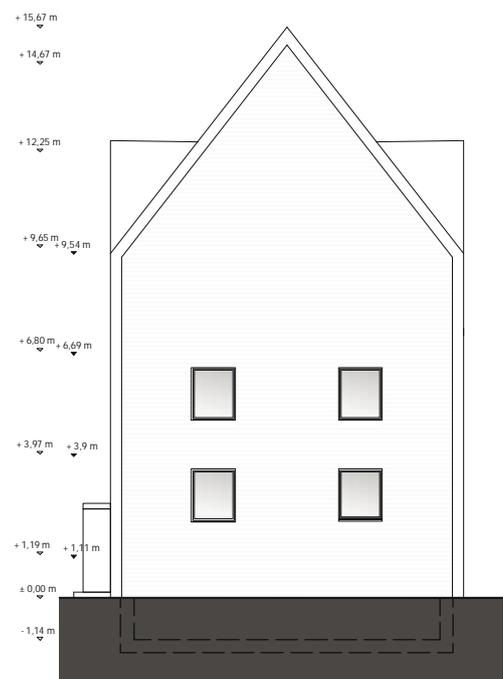


Abb. 94: Nordansicht

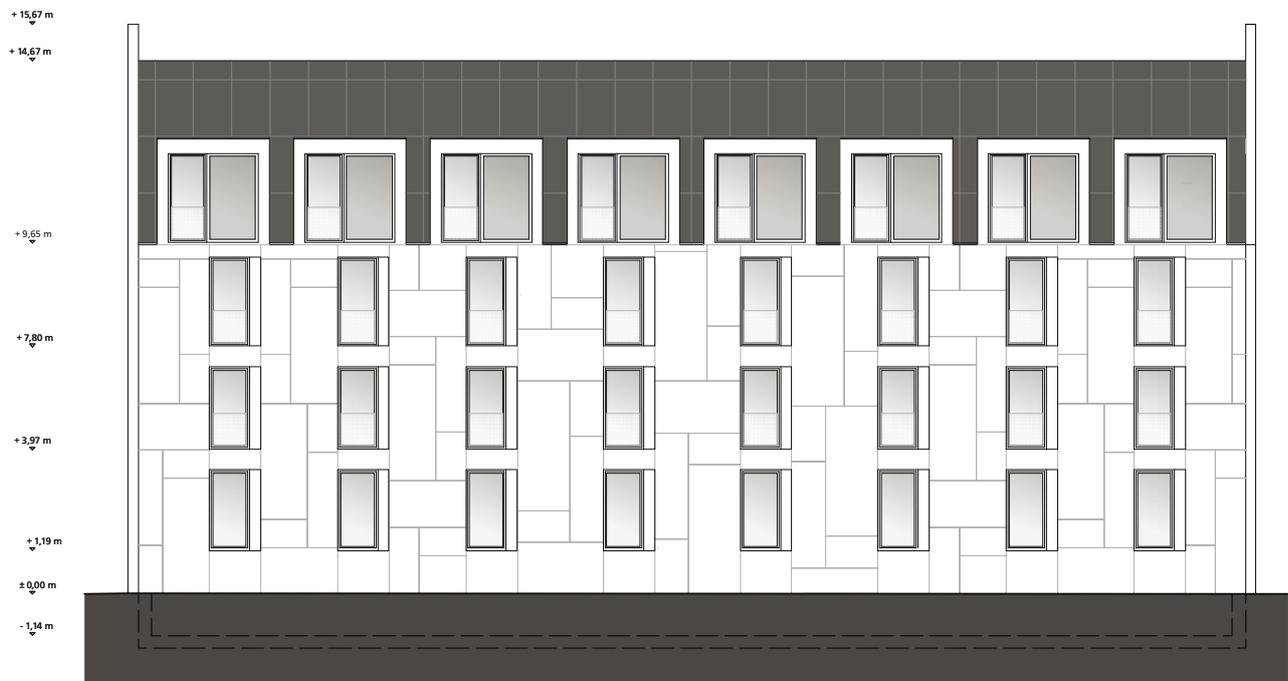


Abb. 95: Westansicht



Abb. 96: Ostansicht

## Energiekonzept

Die umfassende Dämmung der Gebäudehülle mit Dämmstärken zwischen 50 bis 240 mm und der Austausch der Fenster reduziert die Transmissionswärmeverluste um fast 80 %. Das strombasierte technische Konzept aus Luft-Wasser-Wärmepumpe, Heizwasser-Pufferspeicher in Kombination mit dezentralen Frischwasserstationen in jeder Wohnung sowie einer dezentralen mechanischen Lüftung mit Wärmerückgewinnung senkt den Primärenergiebedarf<sup>1</sup> so weit, dass der verbleibende Bedarf durch regenerativ erzeugten Strom aus den Photovoltaik-Anlagen gedeckt werden kann. Abb. 97 und Abb. 98 zeigen das Energiekonzept im Schnitt und im Energieflussdiagramm.



Abb. 97: Energiekonzept

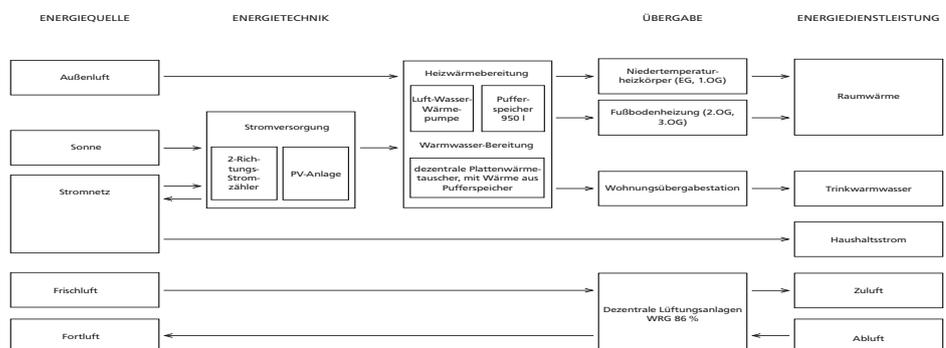


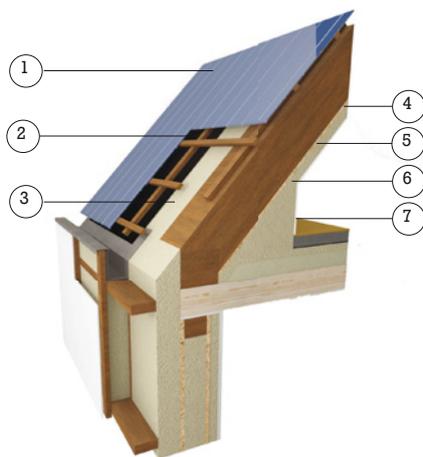
Abb. 98: Energieflussdiagramm

<sup>1</sup> Der Berechnung liegt der verbesserte Wärmebrückenbeiwert von 0,05 W/(m<sup>2</sup>K) zugrunde.

## Gebäudehülle

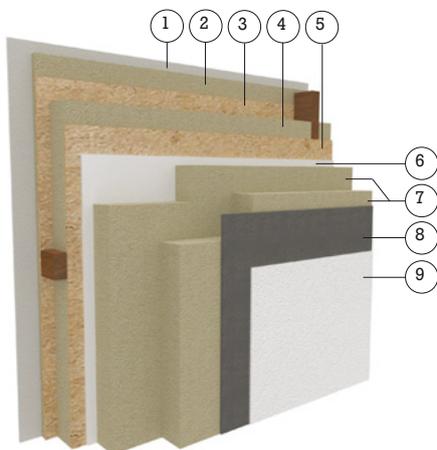
Die Maßnahmen an der bestehenden Substanz entsprechen den 3D-Schnitten des Szenarios der „3.3 Sanierung zum Effizienzhaus Plus nach BMU“ (Außenwand Nord, Ost, West, Fenster, Kellerdecke). Einzig die Südfassade unterscheidet sich. In diesem Szenario wird sie statt mit Faserzementplatten ebenfalls mit PV-Modulen belegt. Bei den folgenden Aufbauten handelt es sich um die zwei aufgestockten Geschosse. Für die Fenster wird ebenfalls das gleiche Modell gewählt.

### Dach



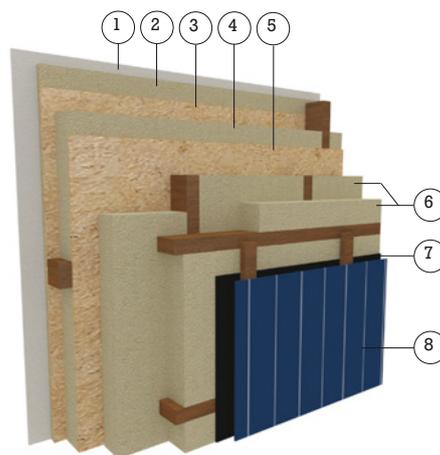
1. In-Dach PV-Anlage mit Unterkonstruktion, z.B. PV-Sol
2. Unterdeckbahn, diffusionsoffen  $s_d \approx 0,03$  m, z.B. ISOVER ZUB Unterdeckbahn
3. Zwischensparrendämmung 240 mm Steinwolle  $\lambda=0,032$  W/(mK), z.B. ISOVER Integra ZKF
4. OSB-Platte 12 mm
5. feuchtevariable Dampfbremse  $0,3 \leq s_d \leq 5,0$ , z.B. Vario KM Duplex UV
6. Installationsebene 30 mm, ausgedämmt mit Steinwolle  $\lambda=0,035$  W/(mK)
7. Gipskartonplatte 12,5 mm

### 2./3. Obergeschoss Nord



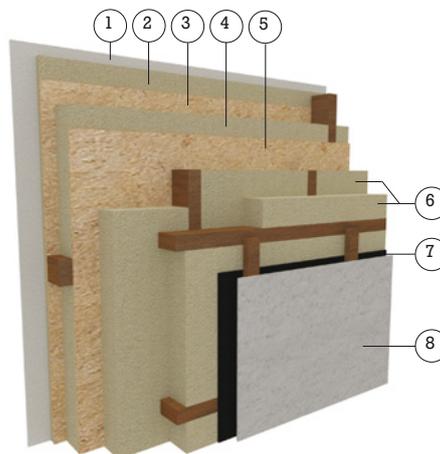
1. Gipskartonplatte 12,5 mm
2. Installationsebene 30 mm, ausgedämmt mit Steinwolle, mit feuchtevariabler Dampfbremse  $0,3 \leq s_d \leq 5,0$
3. OSB-Platte 12 mm
4. Holzrahmenwand 120 mm, ausgedämmt mit Steinwolle  $\lambda=0,035$  W/(mK)
5. MDF-Platte 12 mm
6. Klebemörtel 5mm
7. zwei Lagen Wärmedämmung 120 mm Steinwolle  $\lambda=0,035$  W/(mK), z.B. ISOVER Siliatherm WVP
8. Armierungsmörtel 10 mm
9. Leichtputz in Ausführungsart: Kammputz, z.B. STO Linear 30

### 2./3. Obergeschoss Süd



1. Gipskartonplatte 12,5 mm
2. Installationsebene 30 mm, ausgedämmt mit Steinwolle, mit feuchtevariabler Dampfbremse  $0,3 \leq s_{d,2} \leq 5,0$
3. OSB-Platte 12 mm
4. Holzrahmenwand 120 mm, ausgedämmt mit Steinwolle  $\lambda=0,035 \text{ W/(mK)}$
5. MDF-Platte 12 mm
6. zwei Lagen Wärmedämmung 120 mm Steinwolle  $\lambda=0,035 \text{ W/(mK)}$  zwischen vertikaler und horizontaler Lattung, z.B. ISOVER Kontur FSP-2
7. Folie, PP, diffusionsoffen,  $s_{d,7} \leq 0,5 \text{ m}$
8. In-Fassade PV-Anlage auf Unterkonstruktion, z.B. PV-Sol

### 2./3. Obergeschoss Ost, West



1. Gipskartonplatte 12,5 mm
2. Installationsebene 30 mm, ausgedämmt mit Steinwolle, mit feuchtevariabler Dampfbremse  $0,3 \leq s_{d,2} \leq 5,0$
3. OSB-Platte 12 mm
4. Holzrahmenwand 120 mm, ausgedämmt mit Steinwolle  $\lambda=0,035 \text{ W/(mK)}$
5. MDF-Platte 12 mm
6. zwei Lagen Wärmedämmung 120 mm Steinwolle  $\lambda=0,035 \text{ W/(mK)}$  zwischen vertikaler und horizontaler Lattung, z.B. ISOVER Kontur FSP-2
7. Folie, PP, diffusionsoffen,  $s_{d,7} \leq 0,5 \text{ m}$
8. Fassadentafeln Faserzement auf Unterkonstruktion, z.B. Eternit Equitone

### Heizung und Warmwasser

Die Maßnahmen für Heizung und Warmwasser entsprechen den Ausführungen in „3.3 Sanierung zum Effizienzhaus Plus nach BMU“.

---

## Luftdichtheit

Die Beschreibung des Lüftungskonzepts entspricht den Erläuterungen in „3.3 Sanierung zum Effizienzhaus Plus nach BMU“. In Abb. 99 ist der Verlauf der Luftdichtheitsebene schematisch in blau dargestellt.

## Lüftung

Die Beschreibung des Lüftungskonzepts entspricht den Ausführungen in „Sanierung zum Effizienzhaus Plus nach BMU“. Für die Aufstockung sind keine Kernbohrungen notwendig. Die dezentralen Lüftungselemente sind in den neuen Außenwänden bereits vorinstalliert.

## Zusammenfassung

Tab. 11 und Abb. 100 geben einen Überblick über die Ergebnisse und zur Einordnung in die Energieeffizienzklasse.

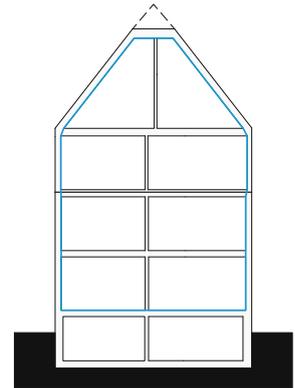


Abb. 99: Verlauf der Luftdichtheitsebene

| Bauteil  | Fritz-Dächert-Weg 56-58 Bestand | Fritz-Dächert-Weg 56-58 Sanierung | Effizienzhaus Plus   |
|--|---------------------------------|-----------------------------------|--|
| Dachfläche<br>U-Wert [W/(m²K)]                             | 1,58                            | 0,152 (-90 %)                     | keine Vorgabe  |
| Oberste Geschossdecke<br>U-Wert [W/(m²K)]                  | 0,91                            | 0,91 (0 %)                        | keine Vorgabe  |
| Außenwand S, O, W<br>U-Wert [W/(m²K)]                      | 1,25                            | 0,146 (-88 %)                     | keine Vorgabe  |
| Außenwand N<br>U-Wert [W/(m²K)]                            | 1,25                            | 0,13 (-89 %)                      | keine Vorgabe  |
| Fenster<br>U <sub>w</sub> -Wert [W/(m²K)]                  | 3,0                             | 0,74 (-75 %)                      | keine Vorgabe  |
| Kellerdecke<br>U-Wert [W/(m²K)]                            | 0,9                             | 0,39 (-56 %)                      | keine Vorgabe  |
| Nutzerstrom<br>[kWh/m²a]                                   | -                               | 29,6                              | 35 kWh/m² <sub>WFL</sub> a,<br>aber maximal<br>2.500 kWh/WEa |
| Eigennutzungsgrad<br>PV-Strom                              | 0                               | 0,5                               | keine Vorgabe  |
| Jahres-Endenergie-<br>bedarf Q <sub>p</sub> [kWh/(m²a)]    | 298,8                           | - 7,9 (-103 %)                    | < 0  |
| Jahres-Primärenergie-<br>bedarf Q <sub>p</sub> [kWh/(m²a)] | 297,2                           | - 38,1 (-113 %)                   | < 0  |
| Transmissionswärme-<br>verlust H <sub>T</sub> ' [W/(m²K)]  | 1,284                           | 0,309 (-76 %)                     | 0,700  |

Tab. 11: Gegenüberstellung der Kennwerte des Bestands, der Sanierung und der Kennwerte des BMU

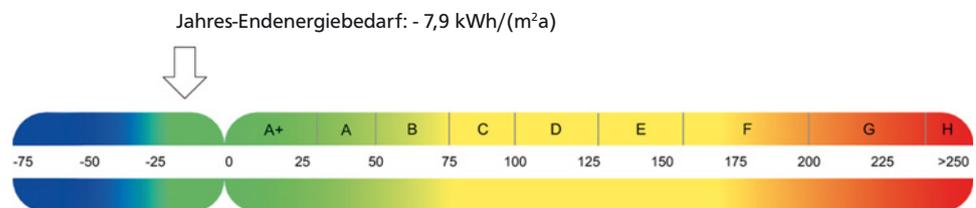


Abb. 100: Einordnung in Energieeffizienzklasse A+

Jahres-Primärenergiebedarf: -38,1 kWh/(m²a)





---

## 4. Ökologische Untersuchung im Lebenszyklus

# Ökologischer Lebenszyklus

---

Die Bundesregierung strebt an, dass in Deutschland ab 2050 jährlich nur noch 250 Millionen Tonnen CO<sub>2</sub> verursacht werden dürfen. Der Wärmeverbrauch für Gebäude war im Jahr 2015 allein für 183 Millionen Tonnen CO<sub>2</sub> von (908 Millionen) verantwortlich (DENA 2016).

Der Primärenergiebedarf wurde in den vergangenen Jahren kontinuierlich durch die Gesetzgebung reduziert. Ab 2021 sollen alle neu zu errichtenden Gebäude als Niedrigstenergiegebäude ausgeführt sein. Der in den Baustoffen und Baumaterialien gebundene Primärenergiebedarf, als weitere Stellschraube der Energiewende, wird folglich zunehmend in den Fokus rücken.

Die Betrachtung der Umweltrelevanz der Szenarien in Form einer Lebenszyklusanalyse erhöht die Transparenz bei den Entscheidungen zum modernen Umweltschutz.

Im vorliegenden Kapitel wird der Frage nachgegangen, welche Umweltwirkungen für Herstellung, Nutzung und Entsorgung der erarbeiteten Szenarien verursacht werden. Es wird untersucht, ob und wann diese Umweltwirkungen durch die Einsparung an Primärenergie für den Gebäudebetrieb wieder ausgeglichen werden.

---

## 4.1 Grundlagen und Randbedingungen

---

### 4.1.1. Wissenschaftliche Methode

Das Vorgehen orientiert sich am vereinfachten Verfahren der Deutschen Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen (DGNB) in Übereinstimmung mit der DIN EN 15978. Beim vereinfachten Verfahren nach DGNB dient ein Referenzgebäude mit festgelegten Eigenschaften als Bewertungsmaßstab. Das Zertifizierungssystem ist für Neubauten ausgelegt. Das DGNB-Referenzgebäude kann demzufolge nicht als Bewertungsmaßstab genutzt werden und bringt keinen Mehrwert für die Ergebnisse. Die Gegenüberstellung mit dem DGNB-Referenzgebäude wird daher nicht durchgeführt. Im vorliegenden Forschungsvorhaben sind der relative Vergleich der Szenarien und die Gegenüberstellung mit dem unsanierten Bestand von Bedeutung.

Zunächst wird der Untersuchungsrahmen definiert. Im nächsten Schritt werden die Sachbilanzen für die Szenarien zusammengestellt. Sie beinhalten ökologisch relevante Input- sowie Output-Flüsse. Auf dieser Basis können die ökologischen Wirkungsindikatoren untersucht und bewertet werden (Wirkungsabschätzung). Die Grafik in Abb. 101 zeigt die iterative Systematik der Lebenszyklusbetrachtung als iterativen Prozess.

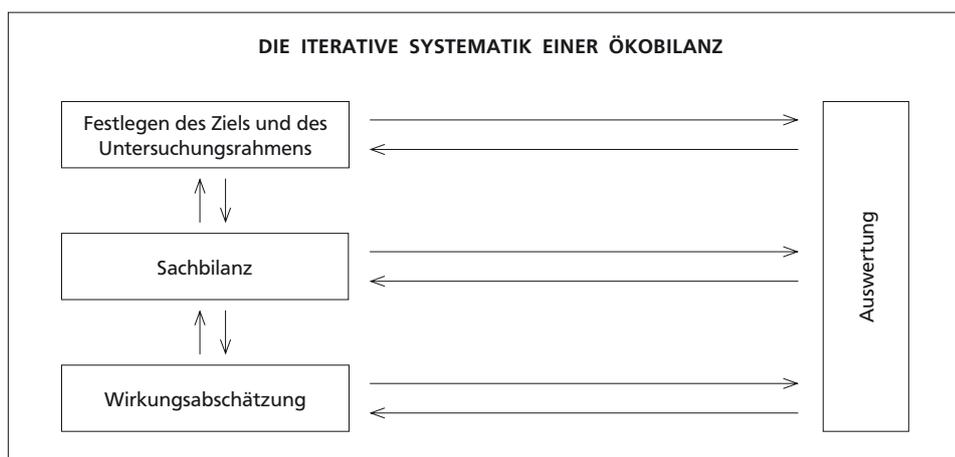


Abb. 101: Systematik der Lebenszyklusbetrachtung-

Quelle: eigene Darstellung in Anlehnung an DIN EN ISO 14040

#### 4.1.2. Untersuchungsrahmen

##### Herstellungs- und Nutzungskosten

Gegenstand der Untersuchung sind ausschließlich die Baustoffe, die im Rahmen der Szenarien hinzugefügt werden. Bestehende Bausubstanz wird nicht berücksichtigt. Die berücksichtigten Bauteile werden nach den Kostengruppen 300 und 400 gemäß DIN 276 und nach Nutzungskostengruppen 400 gemäß DIN 18960 gegliedert. Für die Untersuchung der ökologischen Wirkungsindikatoren im Betrieb werden die Endenergiebedarfe für Heizung und Warmwasser der Nutzungskostengruppe 300 gemäß DIN 18960 sowie eventuelle Gutschriften aus regenerativ erzeugten Strom berücksichtigt (siehe Abb. 102).

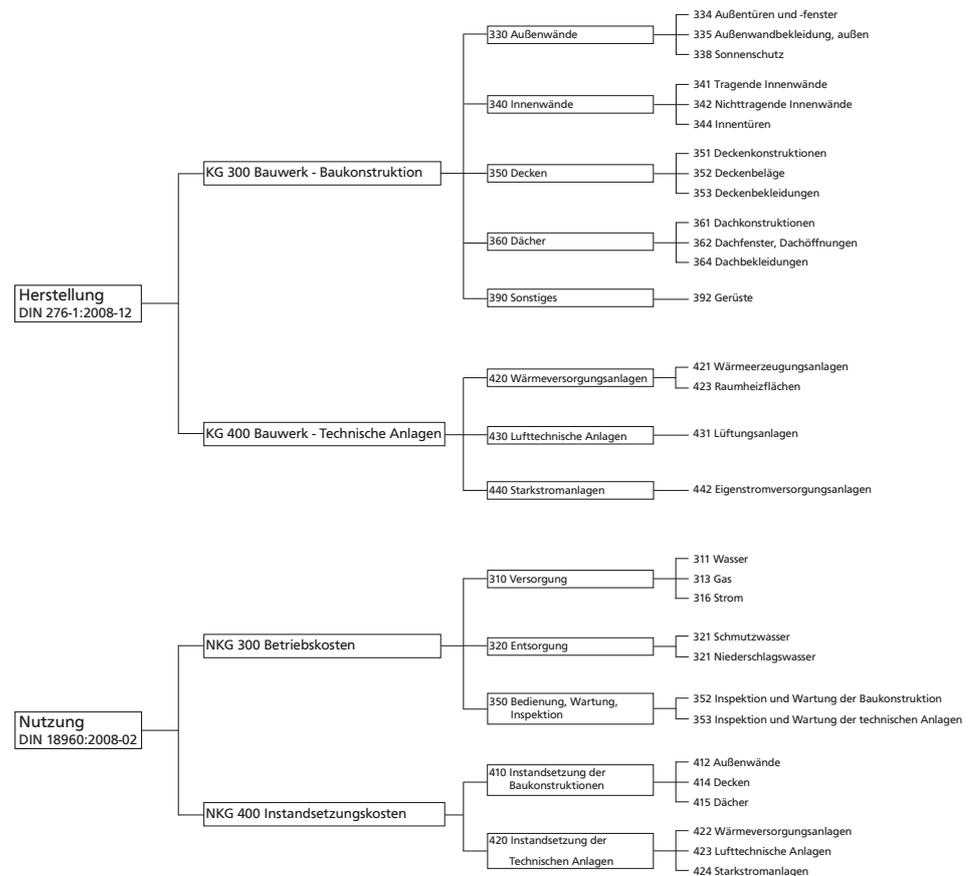


Abb. 102: Berücksichtigte Herstellungs- und Nutzungskosten

## Systemgrenzen

Die folgenden Lebenszyklusstadien der DIN EN 15978 werden berücksichtigt (Abb. 103):

- [A1] Rohstoffbeschaffung,
- [A2] Transport,
- [A3] Produktion,
- [B4] Austausch ([A1 – A3], [C3] Abfallbehandlung, [C4] Beseitigung, [D] Vorteile und Belastungen),
- [B6] Energieverbrauch im Betrieb,
- [C3] Abfallbehandlung,
- [C4] Beseitigung,
- [D] Vorteile und Belastungen außerhalb der Systemgrenze.

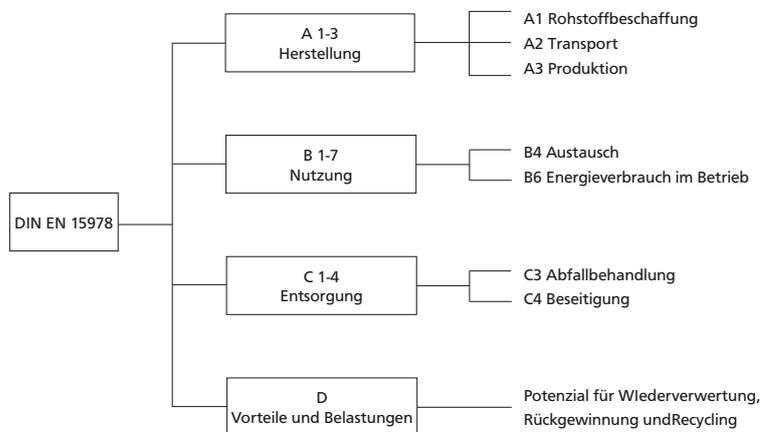


Abb. 103: Die nach DIN EN 15978 berücksichtigten Module

Die Untersuchung der Umweltwirkungen der bestehenden Bausubstanz ist im Allgemeinen nur begrenzt möglich. Informationen zu bestehender Bausubstanz aus den 50er Jahren sind in den geläufigen Datenbanken begrenzt oder nicht vorhanden. An diesen Stellen wird auf Baustoffe mit kongruenten Eigenschaften zurückgegriffen. Die pluralistischen Verfahren zur Bewertung der Umweltrelevanz sind grundsätzlich als mathematische Abstraktionsmodelle zu verstehen. Die Aussagekraft variiert stark mit der Qualität der Datenbasis. Es muss beispielsweise berücksichtigt werden, dass die Systemgrenzen bei Lebenszyklusanalysen keinen regionalen Bezug bedienen (SCHMITZ / PAULINI 1999 1999). Für den hier angestrebten relativen Vergleich ist diese nicht vermeidbare Unschärfe vernachlässigbar.

---

## Betrachtungszeitraum

Der Betrachtungszeitraum grenzt die berücksichtigten Lebenszyklusperioden der Szenarien ein. Im vorliegenden Forschungsvorhaben wird der Betrachtungszeitraum gemäß des Verfahrens nach DGNB auf 50 Jahre festgesetzt.

## Datenbasis

Das Vorgehen orientiert sich am vereinfachten Verfahren gemäß der Deutschen Gesellschaft Nachhaltiges Bauen (NWO15 ENV1.1 Ökobilanz - Emissionsbedingte Umweltwirkungen). Die Informationen zu den Umweltwirkungen der Baustoffe in den berücksichtigten Lebenszyklusstadien werden der „ökobaudat“ (BMI 2017) entnommen. Dabei handelt es sich um eine Plattform der Bundesregierung (BMI), um die Erstellung von Lebenszyklusanalysen zu erleichtern, zu vereinheitlichen und damit untereinander vergleichbar zu machen. Die Nutzungsdauer orientiert sich ebenfalls an einer Vorlage der Bundesregierung (BBSR 2017). Dabei wird berücksichtigt, dass teilweise Baustoffe von längerer Nutzungsdauer mit Baustoffen von kürzerer Nutzungsdauer verbunden sind. Kann der Austausch eines Baustoffs von kürzerer Nutzungsdauer nur durch den gleichzeitigen Austausch eines Baustoffs von längerer Nutzungsdauer erfolgen, wird die kürzere Nutzungsdauer verwendet.

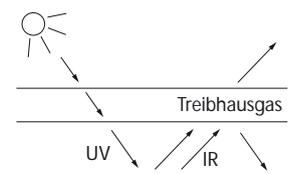
## Ökologische Wirkungsindikatoren

Die umweltbezogene Wirkung eines Baustoffs ist mit einer Vielzahl von Prozessen in verschiedenen klimaökologisch relevanten Bereichen verknüpft. Die umweltbezogene Wirkung auf die verschiedenen Bereiche wird durch ökologische Wirkungsindikatoren ausgedrückt. Anhand der ökologischen Wirkungsindikatoren kann die ökologische Vorteilhaftigkeit eines Szenarios sowohl absolut (*Kann der Ressourceneinsatz zur Herstellung und Betrieb des Szenarios innerhalb des Betrachtungszeitraums durch Gutschriften ausgeglichen werden?*) als auch relativ (*Welches Szenario verursacht in der Gesamtbilanz die geringsten Umweltwirkungen?*) bewertet werden.

In der vorliegenden Untersuchung werden folgende ökologische Wirkungsindikatoren behandelt:

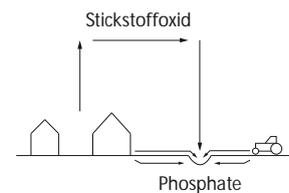
### Treibhauspotenzial $GWP_{100}$

Das Treibhauspotential ist ein Maß für den potenziellen Beitrag zur Erwärmung bodennaher Luftschichten und wird als Kohlendioxid-Äquivalent [kg CO<sub>2</sub>-Äq.] angegeben. Die auf die Erdoberfläche auftreffende kurzwellige Sonnenstrahlung wird teilweise absorbiert und teilweise als Infrarotstrahlung reflektiert. Letztere wird in der Troposphäre absorbiert und zum Teil wieder zur Erde zurückgestrahlt. Hinzu kommen durch den Menschen verursachte Treibhausgase, wie beispielsweise Kohlendioxid, Methan und FCKW.



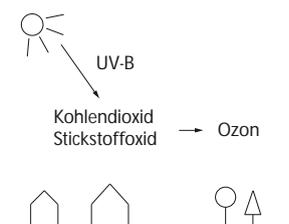
### Eutrophierungspotenzial $EP$

Eutrophierung oder Überdüngung beschreibt den Beitrag zur Anreicherung von Nährstoffen an einem bestimmten Standort und wird in kg Phosphat-Äquivalent [kg PO<sub>4</sub>-Äq.] angegeben. Er resultiert aus Luftschadstoffen, Abwässern und Düngemitteln in der Landwirtschaft. In Gewässern führt dies zu einem verstärkten Algenwachstum, wodurch weniger Sonnenlicht in die tieferen Schichten vordringen kann. Die Photosynthese wird reduziert und damit einhergehend auch die Sauerstoffproduktion eingeschränkt. Folgen sind Fischesterben und das so genannte Umkippen von Gewässern. Pflanzen auf betroffenen Böden weisen eine erhöhte Anfälligkeit gegenüber Krankheiten und Schädlingen auf.



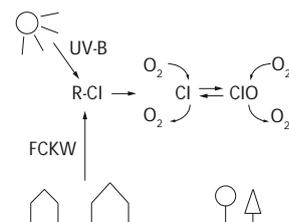
### Photochemisches Ozonbildungspotenzial $POCP$

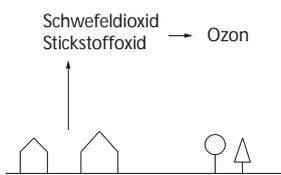
Das photochemische Ozonbildungspotenzial, auch bekannt als Sommersmogpotenzial, wird hier als Ethen-Äquivalent [kg C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>-Äq.] angegeben. Während Ozon in der Stratosphäre eine schützende Funktion übernimmt, ist bodennahes Ozon ein gefährliches Spurengas, das Vegetations- und Materialschäden verursacht. Es bildet sich aus Stickoxid und Kohlenwasserstoffemissionen unter Einwirkung von Sonnenstrahlung. Kohlenstoff entsteht vor allem bei unvollständigen Verbrennungen sowie beim Umgang mit Ottokraftstoffen und Lösungsmitteln.



### Ozonabbaupotenzial $ODP$

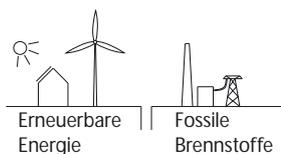
Die Ozonschicht grenzt zum einen die Erwärmung der Erdoberfläche ein und schützt zum anderen Lebewesen vor übermäßiger UV-A und UV-B-Strahlung. Das Ozonabbaupotenzial beschreibt das Maß für den Effekt des Abbaus der Ozonschicht und wird in R<sub>11</sub>-Äquivalenten ausgedrückt [kg R<sub>11</sub>-Äq.]. Ozon absorbiert die kurzwellige ultraviolette Strahlung und gibt sie als langwellige Strahlung, zum Teil auf die Erde, wieder ab. Anthropogene Emissionen, vor allem FCKW und Stickoxide, verursachen einen Abbau der Ozonschicht.





### Versauerungspotenzial AP

Das Versauerungspotenzial wird als Schwefeldioxid-Äquivalent [ $\text{kg SO}_2\text{-Äq.}$ ] angegeben. Die Versauerung von Böden und Gewässern entsteht vorrangig durch die Umwandlung von Luftschadstoffen in Säuren. Dadurch sinken die pH-Werte von Regen und Nebel von 5,6 auf weniger als 4. Verursacher sind vor allem Schwefeldioxid (Schwefelsäure) und Stickoxide (Salpetersäure). Resultat sind schwerwiegende direkte und indirekte Schäden an Ökosystemen. Das Waldsterben ist ein Beispiel, das zurückzuführen ist auf die Nährstoffauswaschungen oder die zunehmende Löslichkeit von Metallen aus Böden. Bei Bauwerken wird der Effekt an den verstärkten Schäden durch Korrosion und Zersetzung sichtbar.



### Gesamt-Primärenergieinhalt PET

Der Gesamt-Primärenergieinhalt setzt sich zusammen aus einem erneuerbaren und einem nicht erneuerbaren Anteil. Beim nicht erneuerbaren Primärenergiebedarf wird die Energie aus einer endlichen, erschöpfbaren Quelle entnommen, wie beispielsweise bei Kohle, Öl oder Uran. Sie wird auch als graue Energie bezeichnet. Der erneuerbare Anteil entstammt aus unendlichen, regenerativen Quellen, wie zum Beispiel aus Sonne, Wind oder Biomasse.

Naturraum- und Ressourcenbeanspruchung sowie direkte Humantoxizität sind weitere ebenso relevante Wirkungsindikatoren, für die es bislang kein Verfahren zur Charakterisierung gibt (SCHMITZ / PAULINI 1999).

### Bezugseinheit

Die Wirkungsindikatoren werden auf die gemeinsame Vergleichseinheit

$\text{kg CO}_2\text{-Äquivalent} / \text{Nettogrundfläche}$

bezogen, um sie einander gegenüberstellen zu können. Das Treibhauspotenzial definiert den anthropogenen Teil an der Erderwärmung. Ein wesentlicher Bezugspunkt ist das stetig an Konzentration zunehmende Kohlendioxid  $\text{CO}_2$ . Daher werden die Wirkungsindikatoren auf  $\text{CO}_2$ -Äquivalente umgerechnet. Der Bezug auf Nettogrundfläche und Jahr ermöglicht eine Vergleichbarkeit mit anderen Projekten.

---

## 4.2 Der unsanierte Bestand als Ausgangspunkt der Untersuchungen

---

Der unsanierte Bestand bildet den Ausgangspunkt der Untersuchungen. Beide Bestandsgebäude sind nahezu baugleich. Für die Gegenüberstellung mit den Szenarien wird hier der Durchschnitt der Ergebnisse beider Gebäude dargestellt.

Bei der Betrachtung des unsanierten Bestands wurde lediglich der gesetzlich geforderte Austausch des Heizkessels im Jahr 2021 einbezogen.

### 4.2.1. Sachbilanz

#### Gebäudebetrieb

| ENDENERGIEBEDARF       | MENGE  | EINHEIT                | LEBENSZYKLUSSTADIEN |
|------------------------|--------|------------------------|---------------------|
| Gas - Heizung          | 282,95 | kWh/(m <sup>2</sup> a) | B6, D               |
| Gas - Warmwasser       | 19,6   | kWh/(m <sup>2</sup> a) | B6, D               |
| Strom Mix - Heizung    | 1,27   | kWh/(m <sup>2</sup> a) | B6, D               |
| Strom - Mix Warmwasser | 0,21   | kWh/(m <sup>2</sup> a) | B6, D               |

Bezugsgröße: A<sub>N</sub> EnEV: 712,9 m<sup>2</sup>

#### Technische Anlagen

##### KG 421 Wärmeerzeugungsanlagen

| BEZEICHNUNG                             | MENGE | EINHEIT | NUTZUNGS-<br>DAUER [A] | LEBENSZYKLUS-<br>STADIEN |
|---|-------|---------|------------------------|--------------------------|
| Gas-Niedertemperaturkessel <sup>1</sup> | 1     | Stück   | 20                     | A1-A3, B4,<br>C3, C4, D  |

---

<sup>1</sup> Nach EnEV 2016 § 10 Absatz 1 müssen Heizkessel nach einer Nutzungsdauer von 30 Jahren ausgetauscht werden. Daher fließt hier der Kessel als aktueller Stand der Technik in die Berechnung ein.

## 4.2.2. Wirkungsabschätzung

| LEBENSZYKLUSANALYSE       |                |   | Treibhaus-<br>potenzial   | Ozonschicht-<br>abbau-<br>potenzial                | Ozonbildungs-<br>potenzial                           | Versauerungs-<br>potenzial                                      | Überdüngungs-<br>potenzial                                      | Nicht<br>erneuerbarer<br>Primärenergie<br>bedarf | Erneuerbarer<br>Primärenergie<br>bedarf    | Gesamt-<br>Primärenergie<br>bedarf         |
|---------------------------|----------------|---|---|--|--|---|---|--|--|--|
| Bestand                   |                |   | GWP   | ODP  | POCP   | AP  | EP  | PENRT  | PERT                                       | PET  |
|                           |                |   | [kg CO <sub>2</sub> -Äq./<br>(m <sup>2</sup> <sub>NRG</sub> a)] | [kg R11-Äq./<br>(m <sup>2</sup> <sub>NRG</sub> a)] | [kg Ethen-Äq./<br>(m <sup>2</sup> <sub>NRG</sub> a)] | [kg SO <sub>2</sub> -Äq./<br>(m <sup>2</sup> <sub>NRG</sub> a)] | [kg PO <sub>4</sub> -Äq./<br>(m <sup>2</sup> <sub>NRG</sub> a)] | [MJ/<br>(m <sup>2</sup> <sub>NRG</sub> a)]       | [MJ/<br>(m <sup>2</sup> <sub>NRG</sub> a)] | [MJ/<br>(m <sup>2</sup> <sub>NRG</sub> a)] |
| Gesamter Lebenszyklus A-D |                |   | 4,87E+01  | 1,00E-10   | 5,56E-03   | 3,00E-02  | 3,59E-03  | 8,05E+02   | 3,76E+00                                   | 8,09E+02                                   |
| Herstellung               | A1<br>A2<br>A3 | Rohstoffgewinnung<br>Transport zum<br>Hersteller<br>Herstellung | 2,27E-02  | 1,71E-12   | 7,04E-06   | 8,62E-05  | 7,81E-06  | 3,03E-01   | 3,74E-02                                   | 3,40E-01                                   |
|                           | A1-A3          | KG 330 Außenwände   | 0,00E+00  | 0,00E+00   | 0,00E+00   | 0,00E+00  | 0,00E+00  | 0,00E+00   | 0,00E+00                                   | 0,00E+00                                   |
|                           | A1-A3          | KG 340 Innenwände<br>und -türen                                 | 0,00E+00  | 0,00E+00   | 0,00E+00   | 0,00E+00  | 0,00E+00  | 0,00E+00   | 0,00E+00                                   | 0,00E+00                                   |
|                           | A1-A3          | KG 350 Decken   | 0,00E+00  | 0,00E+00   | 0,00E+00   | 0,00E+00  | 0,00E+00  | 0,00E+00   | 0,00E+00                                   | 0,00E+00                                   |
|                           | A1-A3          | KG 360 Dächer   | 0,00E+00  | 0,00E+00   | 0,00E+00   | 0,00E+00  | 0,00E+00  | 0,00E+00   | 0,00E+00                                   | 0,00E+00                                   |
|                           | A1-A3          | KG 420 Wärmeversorgungs-<br>anlagen                             | 2,27E-02  | 1,71E-12   | 7,04E-06   | 8,62E-05  | 7,81E-06  | 3,03E-01   | 3,74E-02                                   | 3,40E-01                                   |
|                           | A1-A3          | KG 430 Lufttechnische<br>Anlagen                                | 0,00E+00  | 0,00E+00   | 0,00E+00   | 0,00E+00  | 0,00E+00  | 0,00E+00   | 0,00E+00                                   | 0,00E+00                                   |
|                           | Nutzung        | B2<br>B6  | Instandhaltung<br>Energieverbrauch im<br>Betrieb                | 4,87E+01   | 9,84E-11   | 5,55E-03  | 3,00E-02  | 3,59E-03   | 8,05E+02                                   | 3,72E+00                                   |
| B2                        |                | KG 330 Außenwände   | 0,00E+00  | 0,00E+00   | 0,00E+00   | 0,00E+00  | 0,00E+00  | 0,00E+00   | 0,00E+00                                   | 0,00E+00                                   |
| B2                        |                | KG 340 Innenwände<br>und -türen                                 | 0,00E+00  | 0,00E+00   | 0,00E+00   | 0,00E+00  | 0,00E+00  | 0,00E+00   | 0,00E+00                                   | 0,00E+00                                   |
| B2                        |                | KG 350 Decken   | 0,00E+00  | 0,00E+00   | 0,00E+00   | 0,00E+00  | 0,00E+00  | 0,00E+00   | 0,00E+00                                   | 0,00E+00                                   |
| B2                        |                | KG 360 Dächer   | 0,00E+00  | 0,00E+00   | 0,00E+00   | 0,00E+00  | 0,00E+00  | 0,00E+00   | 0,00E+00                                   | 0,00E+00                                   |
| B2                        |                | KG 420 Wärme-<br>versorgungs-<br>anlagen                        | 4,07E-02  | 3,40E-12   | 1,11E-05   | 1,51E-04  | 1,39E-05  | 5,53E-01   | 7,48E-02                                   | 6,28E-01                                   |
| B2                        |                | KG 430 Lufttechnische<br>Anlagen                                | 0,00E+00  | 0,00E+00   | 0,00E+00   | 0,00E+00  | 0,00E+00  | 0,00E+00   | 0,00E+00                                   | 0,00E+00                                   |
| B6                        |                | Strombedarf   | 6,07E-01  | 6,07E-11   | 7,46E-05   | 9,94E-04  | 1,30E-04  | 8,28E+00   | 2,28E+00                                   | 1,06E+01                                   |
| B6                        | Wärmebedarf    | 4,80E+01  | 3,43E-11  | 5,47E-03   | 2,88E-02   | 3,44E-03  | 7,96E+02  | 1,37E+00   | 7,97E+02                                   |  |
| Entsorgung                | C3<br>C4       | Abfallverwertung<br>Entsorgung                                  | 4,59E-04  | 1,38E-15   | 1,98E-08   | 2,45E-07  | 4,92E-08  | 4,60E-04   | 5,82E-05                                   | 5,18E-04                                   |
|                           | C3-C4          | KG 330 Außenwände   | 0,00E+00  | 0,00E+00   | 0,00E+00   | 0,00E+00  | 0,00E+00  | 0,00E+00   | 0,00E+00                                   | 0,00E+00                                   |
|                           | C3-C4          | KG 340 Innenwände<br>und -türen                                 | 0,00E+00  | 0,00E+00   | 0,00E+00   | 0,00E+00  | 0,00E+00  | 0,00E+00   | 0,00E+00                                   | 0,00E+00                                   |
|                           | C3-C4          | KG 350 Decken   | 0,00E+00  | 0,00E+00   | 0,00E+00   | 0,00E+00  | 0,00E+00  | 0,00E+00   | 0,00E+00                                   | 0,00E+00                                   |
|                           | C3-C4          | KG 360 Dächer   | 0,00E+00  | 0,00E+00   | 0,00E+00   | 0,00E+00  | 0,00E+00  | 0,00E+00   | 0,00E+00                                   | 0,00E+00                                   |
|                           | C3-C4          | KG 420 Wärme-<br>versorgungs-<br>anlagen                        | 4,59E-04  | 1,38E-15   | 1,98E-08   | 2,45E-07  | 4,92E-08  | 4,60E-04   | 5,82E-05                                   | 5,18E-04                                   |
|                           | C3-C4          | KG 430 Lufttechnische<br>Anlagen                                | 0,00E+00  | 0,00E+00   | 0,00E+00   | 0,00E+00  | 0,00E+00  | 0,00E+00   | 0,00E+00                                   | 0,00E+00                                   |
| Gutschriften              | D              | Gutschriften  | -2,80E-03   | -1,17E-14  | -1,50E-06  | -1,07E-05   | -9,02E-07   | -2,68E-02  | -4,11E-05                                  | -2,69E-02                                  |
|                           | D              | KG 330 Außenwände   | 0,00E+00  | 0,00E+00   | 0,00E+00   | 0,00E+00  | 0,00E+00  | 0,00E+00   | 0,00E+00                                   | 0,00E+00                                   |
|                           | D              | KG 340 Innenwände<br>und -türen                                 | 0,00E+00  | 0,00E+00   | 0,00E+00   | 0,00E+00  | 0,00E+00  | 0,00E+00   | 0,00E+00                                   | 0,00E+00                                   |
|                           | D              | KG 350 Decken   | 0,00E+00  | 0,00E+00   | 0,00E+00   | 0,00E+00  | 0,00E+00  | 0,00E+00   | 0,00E+00                                   | 0,00E+00                                   |
|                           | D              | KG 360 Dächer   | 0,00E+00  | 0,00E+00   | 0,00E+00   | 0,00E+00  | 0,00E+00  | 0,00E+00   | 0,00E+00                                   | 0,00E+00                                   |
|                           | D              | KG 420 Wärme-<br>versorgungs-<br>anlagen                        | -2,80E-03   | -1,17E-14  | -1,50E-06  | -1,07E-05   | -9,02E-07   | -2,68E-02  | -4,11E-05                                  | -2,69E-02                                  |
|                           | D              | KG 430 Lufttechnische<br>Anlagen                                | 0,00E+00  | 0,00E+00   | 0,00E+00   | 0,00E+00  | 0,00E+00  | 0,00E+00   | 0,00E+00                                   | 0,00E+00                                   |

Tab. 12: Wirkungsabschätzung des unsanierten Bestands

## Treibhauspotenzial $GWP_{100}$

Der Austausch des Heizungskessels ist lediglich für 0,1 % des Treibhauspotenzials verantwortlich. Das Treibhauspotenzial der unsanierten Bestandgebäude ist erwartungsgemäß hauptsächlich auf den Betrieb zurückzuführen, wie das Diagramm in Abb. 104 verdeutlicht. Seit 1956 beziehungsweise 1958 verursachen die Gebäude jedes Jahr Treibhausgasemissionen in Höhe von fast  $50 \text{ kg CO}_2 / (\text{m}^2_{\text{NGF}} \cdot \text{a})$  für Strom und Wärme je Gebäude. Über einen Zeitraum von 60 Jahren (1956 bis 2018) summieren sie sich auf mehr als 3.000 Tonnen  $\text{CO}_2$ -Emissionen je Gebäude. Da nur der Heizkessel ausgetauscht wird, ist er bei der Verteilung von Baukonstruktion und Anlagentechnik für 100 % des Treibhauspotenzials verantwortlich (Abb. 105). Er muss innerhalb des Betrachtungszeitraums zweimal ausgetauscht werden und beansprucht so den größten Anteil in der Nutzungsphase (siehe Abb. 106).

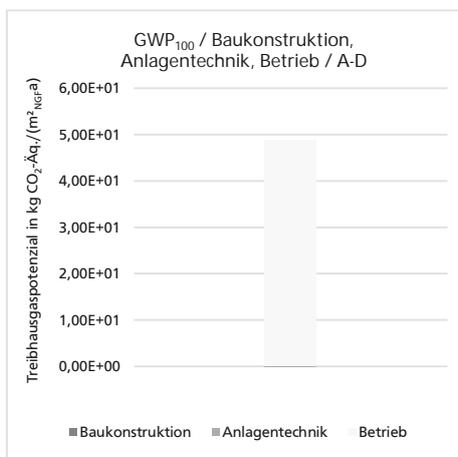


Abb. 104: Gesamtwirkungsabschätzung  $GWP_{100}$

Abb. 105: Verteilung Wirkungsabschätzung  $GWP_{100}$  Bauteile und Anlagentechnik

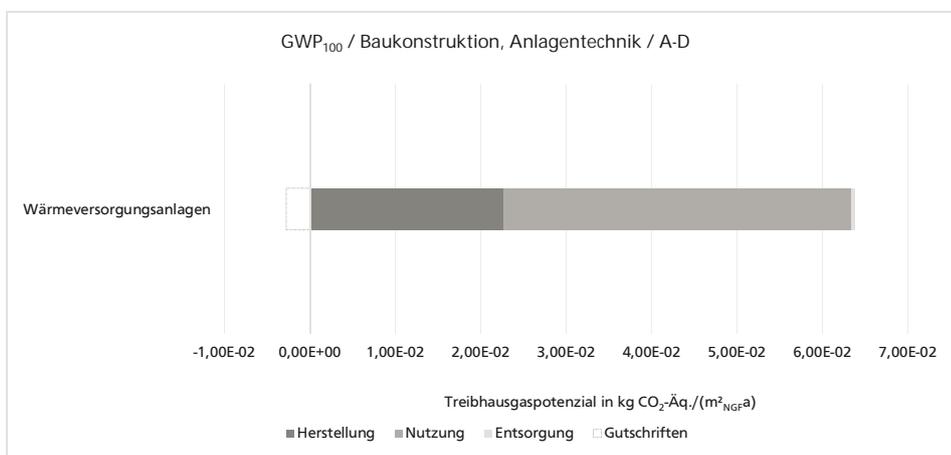


Abb. 106: Gesamtwirkungsabschätzung  $GWP_{100}$  nach Phasen und Gruppen

---

#### Eutrophierungspotenzial EP

Das Überdüngungspotenzial beträgt  $3,59\text{E-}03 \text{ kg PO}_4\text{-Äq./}(\text{m}^2_{\text{NGF}}\text{a})$ . Die Verteilung verhält sich ähnlich wie beim Treibhauspotenzial.

#### Photochemisches Oxidantienbildungspotenzial POCP

Das Photochemische Oxidantienbildungspotenzial liegt bei  $5,56\text{E-}03 \text{ kg Ethen-Äq./}(\text{m}^2_{\text{NGF}}\text{a})$ . Die Verteilung verhält sich ebenfalls ähnlich dem Treibhauspotenzial.

#### Ozonabbaupotenzial ODP

Bei einem Betrachtungszeitraum von 50 Jahren werden  $1,00\text{E-}10 \text{ kg R11-Äq./}(\text{m}^2_{\text{NGF}}\text{a})$  an Ozonabbaupotenzial verursacht. Die Verteilung entspricht ebenfalls dem Treibhauspotenzial.

#### Versauerungspotenzial AP

Die Untersuchungen weisen ein Versauerungspotenzial in Höhe von  $3,00\text{E-}02 \text{ kg SO}_2\text{-Äq./}(\text{m}^2_{\text{NGF}}\text{a})$  nach. Die Verteilung verhält sich wieder analog zum Treibhauspotenzial.

#### Gesamtprimärenergiebedarf PET

Allein der Strom- und Wärmebedarf des Gebäudes verursacht einen Primärenergiebedarf von jährlich über  $809 \text{ MJ/}(\text{m}^2_{\text{NGF}}\text{a})$ . Dies entspricht  $224 \text{ kWh/}(\text{m}^2_{\text{NGF}}\text{a})$ . Der erneuerbare Anteil liegt hier bei nur lediglich 0,5 %. Die Verteilung zum Gesamt-Primärenergiebedarf verhalten sich ebenfalls analog zu denen des Treibhausgaspotenzials.

#### 4.2.3. Bewertung

Beim Vergleich der Anteile von Baukonstruktion und Anlagentechnik (ohne Betrieb) ist die Anlagentechnik für die kompletten Umweltwirkungen verantwort-

---

lich. Bei der Betrachtung der verschiedenen Lebenszyklusstadien der Wärmeversorgungsanlagen beansprucht die Nutzungsphase den größten Anteil. Dies ist darauf zurückzuführen, dass der Heizkessel innerhalb des Betrachtungszeitraums zweimal ausgetauscht werden muss.

Die resultierenden Ergebnisse der Wirkungskategorien sind erwartungsgemäß hauptsächlich auf den Betrieb zurückzuführen. Seit 1956 beziehungsweise 1958 verursachen die Gebäude in ihrer derzeitigen Konstitution jedes Jahr Treibhausgasemissionen in Höhe von 50 kg CO<sub>2</sub>. Über einen Zeitraum von 60 Jahren (1956 bis 2018) summieren sie sich auf über 3.000 Tonnen CO<sub>2</sub>-Emissionen je Gebäude.

Die dadurch verursachten Umweltbelastungen sind bedenklich und werden in der Gegenüberstellung mit den Szenarien noch deutlicher.

## 4.3 Sanierung nach Energieeinsparverordnung 2016

### 4.3.1. Sachbilanz

#### Gebäudebetrieb

| ENDENERGIEBEDARF       | MENGE | EINHEIT                | LEBENSZYKLUSSTADIEN |
|------------------------|-------|------------------------|---------------------|
| Gas - Heizung          | 83,3  | kWh/(m <sup>2</sup> a) | B6                  |
| Gas - Warmwasser       | 20,3  | kWh/(m <sup>2</sup> a) | B6                  |
| Strom Mix - Heizung    | 0,69  | kWh/(m <sup>2</sup> a) | B6                  |
| Strom Mix - Warmwasser | 0,38  | kWh/(m <sup>2</sup> a) | B6                  |

Bezugsgröße: A<sub>N</sub> EnEV: 709,4 m<sup>2</sup>

#### Baukonstruktion

##### KG 334 Außentüren und Fenster

| BAUTEIL            | MAßE [m]  | ANZAHL | BAUSTOFF                               | NUTZUNGS-DAUER [A] | LEBENSZYKLUS-STADIEN |
|--------------------|-----------|--------|--|--------------------|----------------------|
| Treppenhausfenster | 0,9 x 0,7 | 2      | Rahmen: PVC (58,7 %)                   | 40                 | A1-A3, B4, C3, C4, D |
|                    |           |        | Verglasung: 2fach Isolierglas (41,3 %) | 30                 |                      |
|                    |           |        | Fugendichtband PE-/PP-Folie            | 30                 |                      |
|                    |           |        | Fensterbeschlag                        | 25                 |                      |

|                    |           |   |  |    |                      |
|--------------------|-----------|---|--|----|----------------------|
| Treppenhausfenster | 0,9 x 1,6 | 2 | Rahmen: PVC (56,8 %)                   | 40 | A1-A3, B4, C3, C4, D |
|                    |           |   | Verglasung: 2fach Isolierglas (43,2 %) | 30 |                      |
|                    |           |   | Fugendichtband PE-/PP-Folie            | 30 |                      |
|                    |           |   | Fensterbeschlag                        | 25 |                      |

| BAUTEIL          | MAßE [m]    | ANZAHL | BAUSTOFF                                | NUTZUNGS-DAUER [A] | LEBENS-ZYKLUS-STADIEN |
|------------------|-------------|--------|---|--------------------|-----------------------|
| Hausein-gangstür | 1,01 x 2,01 | 2      | Rahmen: Alu (62,2 %)                    | 50                 | A1-A3, B4, C3, C4, D  |
|                  |             |        | Verglasung: 2fach Iso-lierglas (37,8 %) | 30                 |                       |
|                  |             |        | Fugendichtband PE-/PP-Folie             | 40                 |                       |
|                  |             |        | Türbeschlag                             | 30                 |                       |

| BAUTEIL             | MAßE [m]   | ANZAHL | BAUSTOFF                                | NUTZUNGS-DAUER [A] | LEBENS-ZYKLUS-STADIEN |
|---------------------|------------|--------|---|--------------------|-----------------------|
| Fenster EG bis 1.OG | 1,2 x 1,45 | 34     | Rahmen: PVC (65,5 %)                    | 40                 | A1-A3, B4, C3, C4, D  |
|                     |            |        | Verglasung: 2fach Iso-lierglas (34,5 %) | 30                 |                       |
|                     |            |        | Fugendichtband PE-/PP-Folie             | 40                 |                       |
|                     |            |        | Fensterbeschlag                         | 25                 |                       |

| BAUTEIL                 | MAßE [m]   | ANZAHL | BAUSTOFF                                | NUTZUNGS-DAUER [A] | LEBENS-ZYKLUS-STADIEN |
|-------------------------|------------|--------|---|--------------------|-----------------------|
| Fenster DG Nord und Süd | 1,1 x 1,25 | 4      | Rahmen: PVC (57,8 %)                    | 40                 | A1-A3, B4, C3, C4, D  |
|                         |            |        | Verglasung: 2fach Iso-lierglas (42,2 %) | 30                 |                       |
|                         |            |        | Fugendichtband PE-/PP-Folie             | 40                 |                       |
|                         |            |        | Fensterbeschlag                         | 25                 |                       |

| BAUTEIL        | MAßE [m]   | ANZAHL | BAUSTOFF                                | NUTZUNGS-DAUER [A] | LEBENS-ZYKLUS-STADIEN |
|----------------|------------|--------|---|--------------------|-----------------------|
| Gauben-Fenster | 0,95 x 1,2 | 16     | Rahmen: PVC (58,3 %)                    | 40                 | A1-A3, B4, C3, C4, D  |
|                |            |        | Verglasung: 2fach Iso-lierglas (41,7 %) | 30                 |                       |
|                |            |        | Fugendichtband PE-/PP-Folie             | 40                 |                       |
|                |            |        | Fensterbeschlag                         | 25                 |                       |

*KG 335 Außenwandbekleidungen, außen*

| BAUTEIL    | FLÄCHE<br>[m <sup>2</sup> ] | BAUSTOFF               | DICKE<br>[mm] | NUTZUNGS-<br>DAUER [A] | LEBENSZYKLUS-<br>STADIEN |
|------------|-----------------------------|------------------------|---------------|------------------------|--------------------------|
| Kellerwand | 121                         | Klebemörtel            | 5             | 40                     | A1-A3, B4,<br>C3, C4, D  |
|            |                             | Perimeterdämmung (EPS) | 100           | 40                     |                          |
|            |                             | PE-Noppenfolie         | 0,2           | 40                     |                          |
|            |                             | Armierungsmörtel       | 10            | 40                     |                          |
|            |                             | Leichtputz             | 10            | 50                     |                          |

| BAUTEIL           | FLÄCHE<br>[m <sup>2</sup> ] | BAUSTOFF             | DICKE<br>[mm] | NUTZUNGS-<br>DAUER [A] | LEBENSZYKLUS-<br>STADIEN |
|-------------------|-----------------------------|----------------------|---------------|------------------------|--------------------------|
| Außenwand<br>WDVS | 578                         | Klebemörtel          | 5             | 40                     | A1-A3, B4,<br>C3, C4, D  |
|                   |                             | Dämmung (Steinwolle) | 120           | 50                     |                          |
|                   |                             | Armierungsmörtel     | 10            | 40                     |                          |
|                   |                             | Leichtputz           | 10            | 50                     |                          |

| BAUTEIL     | FLÄCHE<br>[m <sup>2</sup> ] | BAUSTOFF             | DICKE<br>[mm] | NUTZUNGS-<br>DAUER [A] | LEBENSZYKLUS-<br>STADIEN |
|-------------|-----------------------------|----------------------|---------------|------------------------|--------------------------|
| Gaubenwände | 75                          | Klebemörtel          | 5             | 40                     | A1-A3, B4,<br>C3, C4, D  |
|             |                             | Dämmung (Steinwolle) | 150           | 50                     |                          |
|             |                             | Armierungsmörtel     | 10            | 40                     |                          |
|             |                             | Leichtputz           | 10            | 50                     |                          |

*KG 338 Sonnenschutz*

| BAUTEIL      | FLÄCHE<br>[m <sup>2</sup> ] | BAUSTOFF   | DICKE<br>[mm] | NUTZUNGS-<br>DAUER [A] | LEBENSZYKLUS-<br>STADIEN |
|--------------|-----------------------------|------------|---------------|------------------------|--------------------------|
| Fensterläden | 47                          | HPL-Platte | 20            | 30                     | A1-A3, B4,<br>C3, C4, D  |

| BAUTEIL  | FLÄCHE<br>[m <sup>2</sup> ] | BAUSTOFF             | DICKE<br>[mm] | NUTZUNGS-<br>DAUER [A] | LEBENSZYKLUS-<br>STADIEN |
|----------|-----------------------------|----------------------|---------------|------------------------|--------------------------|
| Rolladen | 1,82                        | Rolladen, Kunststoff | -             | 40                     | A1-A3, B4,<br>C3, C4, D  |

### KG 353 Deckenbekleidungen

| BAUTEIL     | FLÄCHE<br>[m <sup>2</sup> ] | BAUSTOFF             | DICKE<br>[mm] | NUTZUNGS-<br>DAUER [A] | LEBENSZYKLUS-<br>STADIEN |
|-------------|-----------------------------|----------------------|---------------|------------------------|--------------------------|
| Kellerdecke | 220                         | Leichtmauermörtel    | 5             | 50                     | A1-A3, B4,<br>C3, C4, D  |
|             |                             | Dämmung (Steinwolle) | 50            | 50                     |                          |

### KG 364 Dachbekleidungen

| BAUTEIL | FLÄCHE<br>[m <sup>2</sup> ] | BAUSTOFF                   | DICKE<br>[mm] | NUTZUNGS-<br>DAUER [A] | LEBENSZYKLUS-<br>STADIEN |
|---------|-----------------------------|----------------------------|---------------|------------------------|--------------------------|
| Dach    | 410                         | Dampfbremse (PE)           | 0,2           | 40                     | A1-A3, B4,<br>C3, C4, D  |
|         |                             | Dämmung (Steinwolle, 92 %) | 110           | 50                     |                          |
|         |                             | Dämmung (Steinwolle)       | 60            | 50                     |                          |
|         |                             | Unterspannbahn (PP)        | 0,2           | 30                     |                          |
|         |                             | Holz-UK (8 %)              | 30            | 50                     |                          |
|         |                             | Dachziegel                 | 20            | 50                     |                          |

| BAUTEIL    | FLÄCHE<br>[m <sup>2</sup> ] | BAUSTOFF             | DICKE<br>[mm] | NUTZUNGS-<br>DAUER [A] | LEBENSZYKLUS-<br>STADIEN |
|------------|-----------------------------|----------------------|---------------|------------------------|--------------------------|
| Gaubendach | 47                          | Dampfbremse (PE)     | 0,2           | 40                     | A1-A3, B4,<br>C3, C4, D  |
|            |                             | Dämmung (Steinwolle) | 100           | 50                     |                          |
|            |                             | Unterspannbahn (PP)  | 0,2           | 30                     |                          |
|            |                             | MDF-Platte           | 12            | 50                     |                          |
|            |                             | Holz-UK (8 %)        | 30            | 50                     |                          |
|            |                             | Kupferdach           | 20            | 50                     |                          |

---

## Technische Anlagen

### *KG 421 Wärmeerzeugungsanlagen*

| BEZEICHNUNG               | MENGE | EINHEIT | NUTZUNGS-<br>DAUER [A] | LEBENSZYKLUS-<br>STADIEN |
|---------------------------|-------|---------|------------------------|--------------------------|
| Gas-Niederbrennwertkessel | 1     | Stück   | 20                     | A1-A3, B4,<br>C3, C4, D  |

| BEZEICHNUNG               | MENGE | EINHEIT | NUTZUNGS-<br>DAUER [A] | LEBENSZYKLUS-<br>STADIEN |
|---------------------------|-------|---------|------------------------|--------------------------|
| Pufferspeicher, Edelstahl | 98    | kg      | 20                     | A1-A3, B4,<br>C3, C4, D  |

### *KG 431 Lüftungsanlagen*

| BEZEICHNUNG       | MENGE | EINHEIT | NUTZUNGS-<br>DAUER [A] | LEBENSZYKLUS-<br>STADIEN |
|-------------------|-------|---------|------------------------|--------------------------|
| Lüfter, dezentral | 48    | Stück   | 12                     | A1-A3, B4,<br>C3, C4, D  |

### 4.3.2. Wirkungsabschätzung

| LEBENSZYKLUSANALYSE             |                                      | Treibhaus-<br>potenzial   | Ozon-<br>schicht-<br>abbau-<br>potenzial           | Ozon-<br>bildungs-<br>potenzial                      | Versauerungs-<br>potenzial                                      | Überdüngungs-<br>potenzial                                      | Nicht<br>erneuerbarer<br>Primärenergie-<br>bedarf | Erneuerbarer<br>Primärenergiebe-<br>darf   | Gesamt-<br>Primärenergiebe-<br>darf        |
|---------------------------------|--------------------------------------|---|--|--|---|---|---|--|--|
| Effizienzhaus Plus<br>Sanierung |                                      | GWP   | ODP  | POCP   | AP  | EP  | PENRT   | PERT                                       | PET  |
|                                 |                                      | [kg CO <sub>2</sub> -Äq./<br>(m <sup>2</sup> <sub>GGF</sub> a)] | [kg R11-Äq./<br>(m <sup>2</sup> <sub>GGF</sub> a)] | [kg Ethen-Äq./<br>(m <sup>2</sup> <sub>GGF</sub> a)] | [kg SO <sub>2</sub> -Äq./<br>(m <sup>2</sup> <sub>GGF</sub> a)] | [kg PO <sub>4</sub> -Äq./<br>(m <sup>2</sup> <sub>GGF</sub> a)] | [MJ/<br>(m <sup>2</sup> <sub>GGF</sub> a)]        | [MJ/<br>(m <sup>2</sup> <sub>GGF</sub> a)] | [MJ/<br>(m <sup>2</sup> <sub>GGF</sub> a)] |
| Gesamter Lebenszyklus A-D       |                                      | -8,99E+00   | 6,47E-08   | 1,10E-03   | -3,11E-03   | -9,48E-04   | -1,20E+02   | 2,94E+01                                   | -9,08E+01                                  |
| Herstellung                     | A1 Rohstoffgewinnung                 |   |  |  |   |   |   |  |  |
|                                 | A2 Transport zum Hersteller          |   |  |  |   |   |   |  |  |
|                                 | A3 Herstellung                       | 2,22E+00  | 4,16E-08   | 1,31E-03   | 1,06E-02  | 1,07E-03  | 3,64E+01  | 1,15E+01                                   | 4,79E+01                                   |
|                                 | A1-A3 KG 330 Außenwände              | 4,06E-01  | 1,15E-08   | 3,67E-04   | 2,77E-03  | 3,90E-04  | 8,69E+00  | 3,32E+00                                   | 1,20E+01                                   |
|                                 | A1-A3 KG 340 Innenwände und -türen   | 0,00E+00  | 0,00E+00   | 0,00E+00   | 0,00E+00  | 0,00E+00  | 0,00E+00  | 0,00E+00                                   | 0,00E+00                                   |
|                                 | A1-A3 KG 350 Decken                  | 2,90E-02  | 6,42E-10   | 8,91E-06   | 1,60E-04  | 2,10E-05  | 3,47E-01  | 4,28E-02                                   | 3,90E-01                                   |
|                                 | A1-A3 KG 360 Dächer                  | 1,73E-01  | 6,58E-09   | 1,03E-04   | 1,64E-03  | 1,73E-04  | 3,35E+00  | 1,12E+00                                   | 4,46E+00                                   |
|                                 | A1-A3 KG 420 Wärmeversorgungsanlagen | 1,43E-01  | 2,25E-08   | 7,58E-05   | 4,71E-04  | 4,90E-05  | 1,98E+00  | 7,77E-02                                   | 2,06E+00                                   |
|                                 | A1-A3 KG 430 Lufttechnische Anlagen  | 2,41E-02  | 4,91E-12   | 8,23E-06   | 1,14E-04  | 8,08E-06  | 3,87E-01  | 5,19E-02                                   | 4,39E-01                                   |
|                                 | A1-A3 KG 440 Starkstromanlage        | 1,44E+00  | 3,37E-10   | 7,48E-04   | 5,42E-03  | 4,29E-04  | 2,16E+01  | 6,91E+00                                   | 2,85E+01                                   |
| Nutzung                         | B2 Instandhaltung                    |   |  |  |   |   |   |  |  |
|                                 | B6 Energieverbrauch im Betrieb       | 1,77E+01  | 4,86E-08   | 3,45E-03   | 3,48E-02  | 4,12E-03  | 2,44E+02  | 1,31E+02                                   | 3,75E+02                                   |
|                                 | B2 KG 330 Außenwände                 | 3,45E-01  | 1,46E-09   | 2,32E-04   | 1,05E-03  | 1,58E-04  | 3,81E+00  | 2,20E-01                                   | 4,03E+00                                   |
|                                 | B2 KG 340 Innenwände und -türen      | 0,00E+00  | 0,00E+00   | 0,00E+00   | 0,00E+00  | 0,00E+00  | 0,00E+00  | 0,00E+00                                   | 0,00E+00                                   |
|                                 | B2 KG 350 Decken                     | 0,00E+00  | 0,00E+00   | 0,00E+00   | 0,00E+00  | 0,00E+00  | 0,00E+00  | 0,00E+00                                   | 0,00E+00                                   |
|                                 | B2 KG 360 Dächer                     | 3,02E-02  | 7,02E-13   | 1,36E-05   | 1,89E-04  | 6,81E-06  | 4,11E-01  | 6,64E-03                                   | 4,17E-01                                   |
|                                 | B2 KG 420 Wärmeversorgungsanlagen    | 1,12E-01  | 4,51E-08   | 5,26E-05   | 3,30E-04  | 4,39E-05  | 1,75E+00  | 1,09E-01                                   | 1,86E+00                                   |
|                                 | B2 KG 430 Lufttechnische Anlagen     | 3,77E-02  | 3,97E-12   | 1,14E-05   | 1,58E-04  | 1,14E-05  | 5,22E-01  | 4,41E-02                                   | 5,66E-01                                   |
|                                 | B2 KG 440 Starkstromanlage           | 2,57E+00  | 5,77E-10   | 1,35E-03   | 9,19E-03  | 7,81E-04  | 3,82E+01  | 1,30E+01                                   | 5,12E+01                                   |
|                                 | B6 Strombedarf                       | 2,42E+00  | 2,42E-10   | 2,97E-04   | 3,96E-03  | 5,17E-04  | 3,30E+01  | 7,17E+01                                   | 1,05E+02                                   |
| B6 Strombedarf Nutzerstrom      | 1,22E+01                             | 1,22E-09  | 1,50E-03   | 1,99E-02   | 2,60E-03  | 1,66E+02  | 4,57E+01  | 2,12E+02                                   |  |
| Entsorgung                      | C3 Abfallverwertung                  |   |  |  |   |   |   |  |  |
|                                 | C4 Entsorgung                        | 4,70E-01  | 4,19E-10   | 3,13E-05   | 2,97E-04  | 1,48E-04  | 7,38E-01  | -2,04E+00                                  | -1,31E+00                                  |
|                                 | C3-C4 KG 330 Außenwände              | 3,08E-01  | 3,09E-10   | 9,25E-06   | 5,90E-05  | 6,63E-05  | 1,38E-01  | -1,73E+00                                  | -1,59E+00                                  |
|                                 | C3-C4 KG 340 Innenwände und -türen   | 0,00E+00  | 0,00E+00   | 0,00E+00   | 0,00E+00  | 0,00E+00  | 0,00E+00  | 0,00E+00                                   | 0,00E+00                                   |
|                                 | C3-C4 KG 350 Decken                  | 1,88E-03  | 5,22E-12   | 7,37E-07   | 3,83E-06  | 5,17E-06  | 8,55E-03  | 5,86E-04                                   | 9,13E-03                                   |
|                                 | C3-C4 KG 360 Dächer                  | 6,87E-02  | 1,03E-10   | 4,12E-06   | 1,59E-05  | 3,79E-05  | 3,74E-02  | -3,89E-01                                  | -3,51E-01                                  |
|                                 | C3-C4 KG 420 Wärmeversorgungsanlagen | 2,25E-03  | 8,53E-15   | 9,36E-08   | 1,45E-06  | 2,12E-07  | 2,66E-03  | 3,56E-04                                   | 3,01E-03                                   |
|                                 | C3-C4 KG 430 Lufttechnische Anlagen  | 4,08E-03  | 2,05E-15   | 4,75E-08   | 3,51E-07  | 1,08E-07  | 6,96E-04  | 8,03E-05                                   | 7,77E-04                                   |
| C3-C4 KG 440 Starkstromanlage   | 8,49E-02                             | 2,01E-12  | 1,71E-05   | 2,17E-04   | 3,83E-05  | 5,51E-01  | 7,54E-02  | 6,27E-01                                   |  |
| Gutschriften                    | D Gutschriften                       | -2,94E+01   | -2,58E-08  | -3,69E-03  | -4,88E-02   | -6,28E-03   | -4,01E+02   | -1,11E+02                                  | -5,12E+02                                  |
|                                 | D KG 330 Außenwände                  | -1,65E-01   | -1,79E-08  | -1,61E-05  | -1,85E-04   | -1,48E-05   | -2,84E+00   | -1,52E+00                                  | -4,36E+00                                  |
|                                 | D KG 340 Innenwände und -türen       | 0,00E+00  | 0,00E+00   | 0,00E+00   | 0,00E+00  | 0,00E+00  | 0,00E+00  | 0,00E+00                                   | 0,00E+00                                   |
|                                 | D KG 350 Decken                      | -1,51E-03   | -5,97E-11  | -1,64E-07  | -1,60E-06   | -1,93E-07   | -2,49E-02   | -1,16E-03                                  | -2,60E-02                                  |
|                                 | D KG 360 Dächer                      | -3,59E-02   | -4,97E-09  | -3,17E-06  | -3,76E-05   | -2,44E-06   | -6,85E-01   | -3,81E-01                                  | -1,07E+00                                  |
|                                 | D KG 420 Wärmeversorgungsanlagen     | -0,05081488   | -1,08E-13  | -2,82E-05  | -2,03E-04   | -1,70E-05   | -0,47576502                                       | -3,34E-03                                  | -4,79E-01                                  |
|                                 | D KG 430 Lufttechnische Anlagen      | -9,34E-03   | -2,92E-12  | -2,56E-06  | -3,55E-05   | -2,52E-06   | -1,27E-01   | -2,99E-02                                  | -1,56E-01                                  |
|                                 | D KG 440 Starkstromanlage            | -2,42E-01   | -5,12E-11  | -9,07E-05  | -1,04E-03   | -7,73E-05   | -3,06E+00   | -5,03E-01                                  | -3,56E+00                                  |
|                                 | D Gutschrift: Strom aus PV           | -2,89E+01   | -2,89E-09  | -3,55E-03  | -4,73E-02   | -6,17E-03   | -3,94E+02   | -1,08E+02                                  | -5,02E+02                                  |

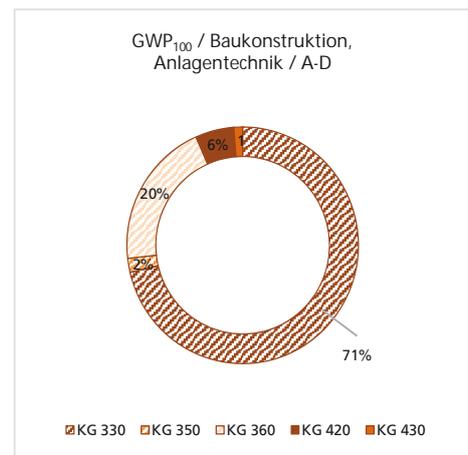
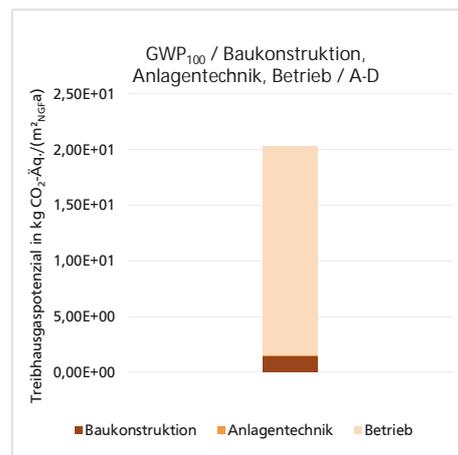
Tab. 13: Wirkungsabschätzung der Sanierung nach EnEV 2016

## Treibhauspotenzial GWP<sub>100</sub>

Das Diagramm in Abb. 107 zeigt, dass das Treibhauspotenzial hauptsächlich auf den Betrieb von jährlich 19 kg CO<sub>2</sub> zurückzuführen ist. Im Ringdiagramm in Abb. 108 wird ersichtlich, dass das Treibhauspotenzial der Baukonstruktion (93 %) im Vergleich zur Anlagentechnik (7 %) den größten Anteil verursacht. Die höchsten Emissionen werden den Außenwänden zugeordnet. Dies resultiert zum einen aus der Fläche, dem WDVS sowie aus den Fenstern. Im Unterschied zu vorgehängten hinterlüfteten Systemen sind die Bedingungen des WDVS bauphysikalisch nachteilig. Zum einen wird die Dämmung nicht belüftet (Feuchte tritt langsamer aus) und nur durch den Putz vor Witterung geschützt. Dies beeinflusst maßgeblich die Lebensdauer des Systems.

Abb. 107: Gesamtwirkungsabschätzung GWP<sub>100</sub>

Abb. 108: Verteilung Wirkungsabschätzung GWP<sub>100</sub> Bauteile und Anlagentechnik



Bei Betrachtung der verschiedenen Lebenszyklusstadien in Abb. 109 wird der Einfluss der Langlebigkeit von Baustoffen deutlich. Die Dämmung des Dachs hat beispielsweise eine Lebensdauer von 50 Jahren und ist in der Herstellungsphase für einen ähnlich hohen CO<sub>2</sub>-Ausstoß wie die Kategorie Außenwände verantwortlich, muss jedoch im Betrachtungszeitraum nicht erneuert werden. Bei Außenwänden sind die Werte in der Nutzungsphase weitaus höher, weil das WDVS und die Fenster einmal innerhalb des Betrachtungszeitraums ausgetauscht werden müssen.

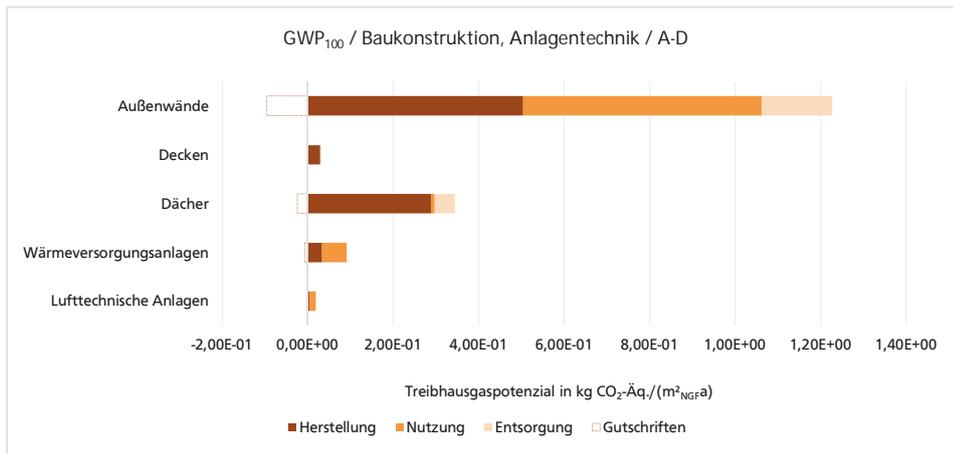


Abb. 109: Gesamtwirkungsabschätzung GWP<sub>100</sub> nach Phasen und Gruppen

#### Eutrophierungspotenzial EP

Das Überdüngungspotenzial beträgt  $2,56E-03 \text{ kg PO}_4\text{-Äq./m}^2_{\text{NGF}}\text{a}$ . Die Verteilung verhält sich ähnlich wie beim Treibhauspotenzial.

#### Photochemisches Oxidantienbildungspotenzial POCP

Das Photochemische Oxidantienbildungspotenzial liegt bei  $2,89E-03 \text{ kg Ethen-Äq./m}^2_{\text{NGF}}\text{a}$ . Die Verteilung verhält sich ebenfalls ähnlich dem Treibhauspotenzial.

#### Ozonabbaupotenzial ODP

Bei einem Betrachtungszeitraum von 50 Jahren werden  $1,47E-8 \text{ kg R11-Äq./m}^2_{\text{NGF}}\text{a}$  an Ozonabbaupotenzial verursacht. Das Diagramm in Abb. 110 zeigt, dass das Ozonabbaupotenzial hauptsächlich auf die Baukonstruktion zurückzuführen ist. Der Anteil für Anlagentechnik und Betrieb liegt bei nur etwa 2 %. Im Ringdiagramm in Abb. 111 wird deutlich, dass die Baukonstruktion für nahezu das komplette Ozonabbaupotenzial verantwortlich ist. Die Betrachtung der verschiedenen Lebenszyklusstadien in Abb. 112 veranschaulicht den Einfluss der Langlebigkeit von Baustoffen am Beispiel des Vergleichs von Dach und Außenwand (siehe auch „Treibhauspotenzial“).

Abb. 110: Gesamtwirkungsabschätzung Ozonabbau

Abb. 111: Verteilung Wirkungsabschätzung Ozonabbau Bauteile und Anlagentechnik

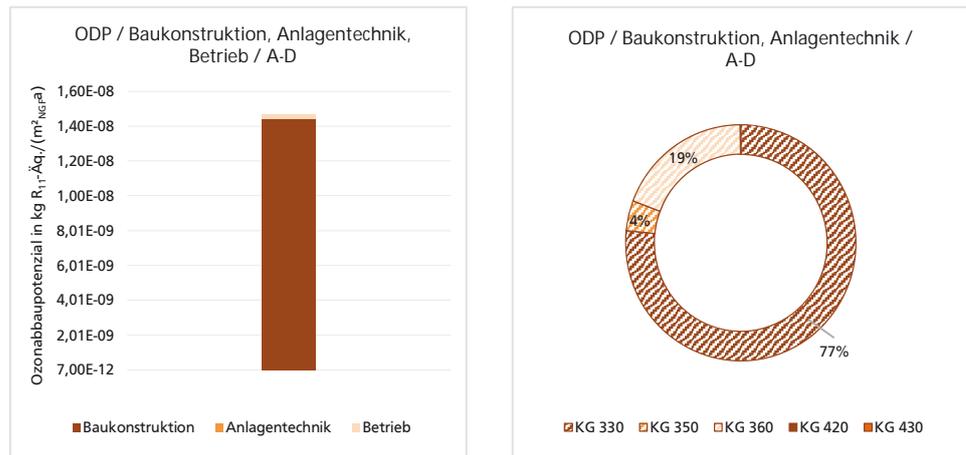
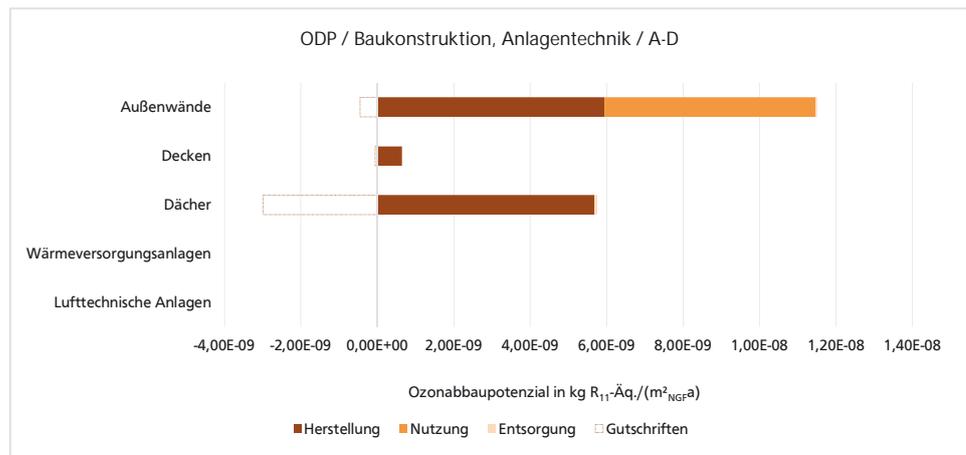


Abb. 112: Gesamtwirkungsabschätzung Ozonabbau nach Phasen und Gruppen



### Versauerungspotenzial AP

Die Untersuchungen weisen ein Versauerungspotenzial in Höhe von  $1,97E-02 \text{ kg SO}_2\text{-Äq./m}^2_{\text{NGF}}\text{a}$  nach. Die Verteilung verhält sich wieder analog zum Treibhauspotenzial.

### Gesamtprimärenergie PET

Es wird ein Primärenergiebedarf von jährlich über  $335 \text{ MJ/(m}^2_{\text{NGF}}\text{a)}$  verursacht. Dies entspricht  $93 \text{ kWh/(m}^2_{\text{NGF}}\text{a)}$ . Die Diagramme in Abb. 113, Abb. 114 und

Abb. 115 zeigen vergleichbare Ergebnisse wie beim Treibhauspotenzial. Der größere Einfluss Betriebs wird hier noch deutlicher. Allein Strom- und Wärmebedarf des Gebäudes verursachen einen Primärenergiebedarf von jährlich über 300 MJ/(m<sup>2</sup><sub>NGF,a</sub>). Der erneuerbare Anteil liegt bei nur lediglich 3 %.

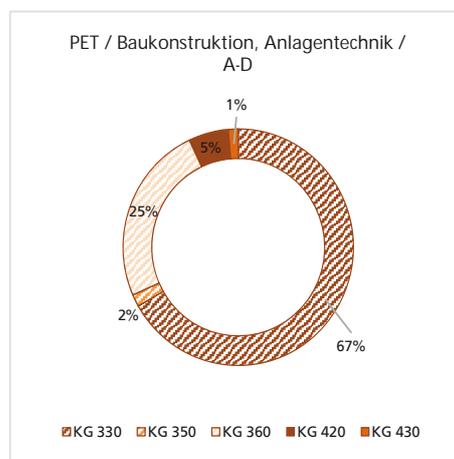
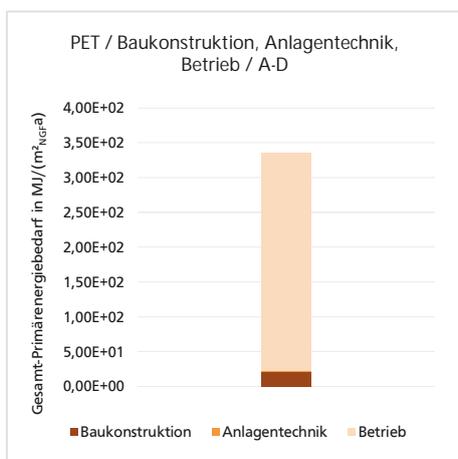


Abb. 113: Gesamtwirkungsabschätzung Gesamtprimärenergie

Abb. 114: Verteilung Wirkungsabschätzung Gesamtprimärenergie Bauteile und Anlagentechnik

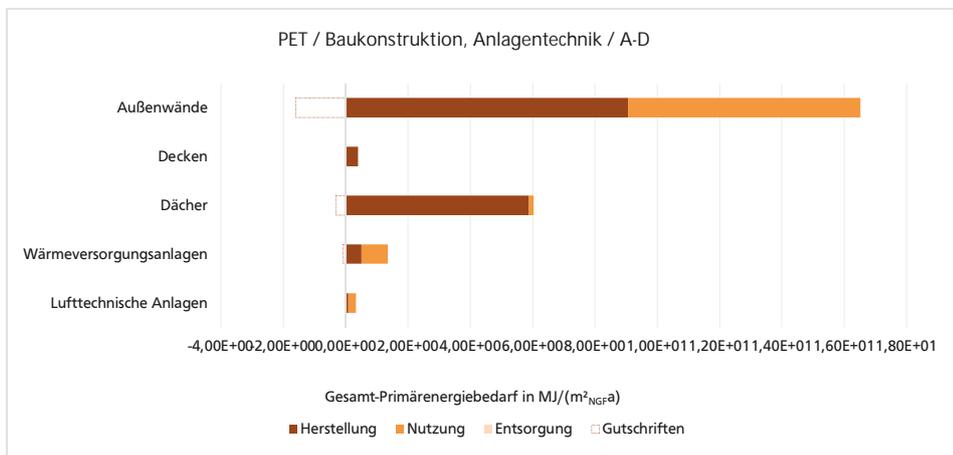


Abb. 115: Gesamtwirkungsabschätzung Gesamtprimärenergie nach Phasen und Gruppen

### 4.3.3. Bewertung

Bei einer konventionellen Sanierung nach Energieeinsparverordnung werden die Umweltwirkungen, ähnlich wie beim unsanierten Bestand, vor allem durch den Betrieb verursacht. Der CO<sub>2</sub>-Ausstoß liegt hier beispielsweise bei jährlich 19 Tonnen CO<sub>2</sub> und mehr als 61 MW an Primärenergie. Davon entfallen 97 % auf den Strom- und Wärmebedarf.

---

Betrachtet man die Verteilung der Wirkungsabschätzungsindikatoren von Baukonstruktion und Anlagentechnik, fällt der Anteil für die Baukonstruktion stärker ins Gewicht. Die größten Anteile werden den Außenwänden zugeordnet. Dies ist zum einen auf die Größe der Fläche, auf das Wärmedämmverbundsystem (Dämmung und Armierungsputz) sowie auf die Kunststoffrahmen und die Verglasung der Fenster zurückzuführen.

Bei Betrachtung der verschiedenen Lebenszyklusstadien wird auch vor allem bei den Außenwänden der Einfluss der Langlebigkeit von Baustoffen deutlich. Der Dämmstoff des Dachs hat beispielsweise eine Lebensdauer von 50 Jahren. Er ist in der Herstellungsphase mitunter für ähnliche hohe Ergebnisse wie die Baustoffe in der Außenwände verantwortlich, muss jedoch im Betrachtungszeitraum nicht erneuert werden. Bei Außenwänden sind die Werte in der Nutzungsphase weit aus höher, weil das Wärmedämmverbundsystem und die Fenster einmal innerhalb des Betrachtungszeitraums ausgetauscht werden müssen.

## 4.4 Sanierung zum Effizienzhaus

### 4.4.1. Sachbilanz

#### Gebäudebetrieb

| ENDENERGIEBEDARF              | MENGE  | EINHEIT                | LEBENSZYKLUSSTADIEN |
|-------------------------------|--------|------------------------|---------------------|
| Strom Wärmepumpe - Heizung    | 19,2   | kWh/(m <sup>2</sup> a) | B6                  |
| Strom Wärmepumpe - Warmwasser | 6,7    | kWh/(m <sup>2</sup> a) | B6                  |
| Stromgutschrift PV            | 50.463 | kWh/a                  | D                   |

Bezugsgröße: A<sub>N</sub> EnEV: 716,3 m<sup>2</sup>

#### Baukonstruktion

##### KG 334 Außentüren und Fenster

| BAUTEIL            | MAßE [m]  | ANZAHL | BAUSTOFF                              | NUTZUNGS-DAUER [A] | LEBENSZYKLUSSTADIEN  |
|--------------------|-----------|--------|---------------------------------------|--------------------|----------------------|
| Treppenhausfenster | 0,9 x 0,7 | 2      | Rahmen: PVC (58,7 %)                  | 40                 | A1-A3, B4, C3, C4, D |
|                    |           |        | Verglasung: 3fach Verglasung (41,3 %) | 30                 |                      |
|                    |           |        | Fugendichtband PE-/PP-Folie           | 30                 |                      |
|                    |           |        | Fensterbeschlag                       | 25                 |                      |

| BAUTEIL            | MAßE [m]  | ANZAHL | BAUSTOFF                              | NUTZUNGS-DAUER [A] | LEBENSZYKLUSSTADIEN  |
|--------------------|-----------|--------|---------------------------------------|--------------------|----------------------|
| Treppenhausfenster | 0,9 x 1,6 | 2      | Rahmen: PVC (56,8 %)                  | 40                 | A1-A3, B4, C3, C4, D |
|                    |           |        | Verglasung: 3fach Verglasung (43,2 %) | 30                 |                      |
|                    |           |        | Fugendichtband PE-/PP-Folie           | 30                 |                      |
|                    |           |        | Fensterbeschlag                       | 25                 |                      |

| BAUTEIL         | MAßE [m]    | ANZAHL | BAUSTOFF                              | NUTZUNGSDAUER [A] | LEBENSZYKLUSSTADIEN  |
|-----------------|-------------|--------|---------------------------------------|-------------------|----------------------|
| Hauseingangstür | 1,01 x 2,01 | 2      | Rahmen: Alu (62,2 %)                  | 50                | A1-A3, B4, C3, C4, D |
|                 |             |        | Verglasung: 3fach Verglasung (37,8 %) | 30                |                      |
|                 |             |        | Fugendichtband PE-/PP-Folie           | 40                |                      |
|                 |             |        | Türbeschlag                           | 30                |                      |

| BAUTEIL         | MAßE [m]    | ANZAHL | BAUSTOFF                              | NUTZUNGSDAUER [A] | LEBENSZYKLUSSTADIEN  |
|-----------------|-------------|--------|---------------------------------------|-------------------|----------------------|
| Fenster EG West | 1,1 x 2,245 | 8      | Rahmen: PVC (65,2 %)                  | 40                | A1-A3, B4, C3, C4, D |
|                 |             |        | Verglasung: 3fach Verglasung (34,8 %) | 30                |                      |
|                 |             |        | Fugendichtband PE-/PP-Folie           | 40                |                      |
|                 |             |        | Fensterbeschlag                       | 25                |                      |

| BAUTEIL           | MAßE [m]   | ANZAHL | BAUSTOFF                              | NUTZUNGSDAUER [A] | LEBENSZYKLUSSTADIEN  |
|-------------------|------------|--------|---------------------------------------|-------------------|----------------------|
| Fenster 1.OG West | 1,1 x 2,31 | 8      | Rahmen: PVC (65,5 %)                  | 40                | A1-A3, B4, C3, C4, D |
|                   |            |        | Verglasung: 3fach Verglasung (34,5 %) | 30                |                      |
|                   |            |        | Fugendichtband PE-/PP-Folie           | 40                |                      |
|                   |            |        | Fensterbeschlag                       | 25                |                      |

| BAUTEIL                            | MAßE [m]   | ANZAHL | BAUSTOFF                              | NUTZUNGSDAUER [A] | LEBENSZYKLUSSTADIEN  |
|------------------------------------|------------|--------|---------------------------------------|-------------------|----------------------|
| Fenster EG und 1.OG Nord, Süd, Ost | 1,2 x 1,45 | 20     | Rahmen: PVC (61,9 %)                  | 40                | A1-A3, B4, C3, C4, D |
|                                    |            |        | Verglasung: 3fach Verglasung (38,1 %) | 30                |                      |
|                                    |            |        | Fugendichtband PE-/PP-Folie           | 40                |                      |
|                                    |            |        | Fensterbeschlag                       | 25                |                      |

| BAUTEIL                 | MAßE [m]   | ANZAHL | BAUSTOFF                              | NUTZUNGS-DAUER [A] | LEBENS-ZYKLUS-STADIEN |
|-------------------------|------------|--------|---------------------------------------|--------------------|-----------------------|
| Fenster DG Nord und Süd | 1,1 x 1,25 | 4      | Rahmen: PVC (57,8 %)                  | 40                 | A1-A3, B4, C3, C4, D  |
|                         |            |        | Verglasung: 3fach Verglasung (42,2 %) | 30                 |                       |
|                         |            |        | Fugendichtband PE-/PP-Folie           | 40                 |                       |
|                         |            |        | Fensterbeschlag                       | 25                 |                       |

| BAUTEIL        | MAßE [m]   | ANZAHL | BAUSTOFF                               | NUTZUNGS-DAUER [A] | LEBENS-ZYKLUS-STADIEN |
|----------------|------------|--------|--|--------------------|-----------------------|
| Gauben-Fenster | 0,95 x 2,4 | 14     | Rahmen: PVC (62,3 %)                   | 40                 | A1-A3, B4, C3, C4, D  |
|                |            |        | Verglasung: 3fach Isolierglas (37,7 %) | 30                 |                       |
|                |            |        | Fugendichtband PE-/PP-Folie            | 40                 |                       |
|                |            |        | Fensterbeschlag                        | 25                 |                       |

### KG 335 Außenwandbekleidungen, außen

| BAUTEIL    | FLÄCHE [m²] | BAUSTOFF               | DICKE [mm] | NUTZUNGS-DAUER [A] | LEBENSZYKLUS-STADIEN |
|------------|-------------|------------------------|------------|--------------------|----------------------|
| Kellerwand | 90          | Klebemörtel            | 5          | 40                 | A1-A3, B4, C3, C4, D |
|            |             | Perimeterdämmung (EPS) | 140        | 40                 |                      |
|            |             | PE-Noppenfolie         | 0,2        | 40                 |                      |
|            |             | Armierungsmörtel       | 10         | 40                 |                      |
|            |             | Leichtputz             | 10         | 50                 |                      |

| BAUTEIL               | FLÄCHE [m²] | BAUSTOFF             | DICKE [mm] | NUTZUNGS-DAUER [A] | LEBENSZYKLUS-STADIEN |
|-----------------------|-------------|----------------------|------------|--------------------|----------------------|
| Außenwand WDVS (Nord) | 91          | Klebemörtel          | 5          | 40                 | A1-A3, B4, C3, C4, D |
|                       |             | Dämmung (Steinwolle) | 120        | 50                 |                      |
|                       |             | Dämmung (Steinwolle) | 120        | 50                 |                      |
|                       |             | Armierungsmörtel     | 10         | 40                 |                      |
|                       |             | Leichtputz           | 10         | 50                 |                      |

| BAUTEIL  | FLÄCHE<br>[m <sup>2</sup> ] | BAUSTOFF                   | DICKE<br>[mm] | NUTZUNGS-<br>DAUER [A] | LEBENSZYKLUS-<br>STADIEN |
|--|-----------------------------|----------------------------|---------------|------------------------|--------------------------|
| Außenwand<br>Faserzement<br>(West, Ost,<br>Nord) | 382                         | Holz-UK (8 %)              | 120           | 50                     | A1-A3, B4,<br>C3, C4, D  |
|  |                             | Dämmung (Steinwolle, 92 %) | 120           | 50                     |                          |
|  |                             | Holz-UK (8 %)              | 120           | 50                     |                          |
|  |                             | Dämmung (Steinwolle, 92 %) | 120           | 50                     |                          |
|  |                             | Folie (PP)                 | 0,2           | 50                     |                          |
|  |                             | Holz-UK (8 %)              | 30            | 50                     |                          |
|  |                             | Faserzementfassade         | 8             | 50                     |                          |

| BAUTEIL     | FLÄCHE<br>[m <sup>2</sup> ] | BAUSTOFF             | DICKE<br>[mm] | NUTZUNGS-<br>DAUER [A] | LEBENSZYKLUS-<br>STADIEN |
|-------------|-----------------------------|----------------------|---------------|------------------------|--------------------------|
| Gaubenwände | 55                          | Klebemörtel          | 5             | 40                     | A1-A3, B4,<br>C3, C4, D  |
|             |                             | Dämmung (Steinwolle) | 150           | 50                     |                          |
|             |                             | Holz-UK (8 %)        | 30            | 50                     |                          |
|             |                             | Faserzementfassade   | 8             | 50                     |                          |

#### KG 338 Sonnenschutz

| BAUTEIL  | FLÄCHE<br>[m <sup>2</sup> ] | BAUSTOFF             | DICKE<br>[mm] | NUTZUNGS-<br>DAUER [A] | LEBENSZYKLUS-<br>STADIEN |
|----------|-----------------------------|----------------------|---------------|------------------------|--------------------------|
| Rolladen | 6,3                         | Rolladen, Kunststoff | -             | 40                     | A1-A3, B4,<br>C3, C4, D  |

#### KG 353 Deckenbekleidungen

| BAUTEIL     | FLÄCHE<br>[m <sup>2</sup> ] | BAUSTOFF             | DICKE<br>[mm] | NUTZUNGS-<br>DAUER [A] | LEBENSZYKLUS-<br>STADIEN |
|-------------|-----------------------------|----------------------|---------------|------------------------|--------------------------|
| Kellerdecke | 220                         | Leichtmauermörtel    | 5             | 50                     | A1-A3, B4,<br>C3, C4, D  |
|             |                             | Dämmung (Steinwolle) | 50            | 50                     |                          |

### KG 362 Dachfenster

| BAUTEIL             | MAßE [m]    | ANZAHL | BAUSTOFF                              | NUTZUNGS-DAUER [A] | LEBENSZYKLUS-STADIEN |
|---------------------|-------------|--------|---------------------------------------|--------------------|----------------------|
| Dachflächen-Fenster | 0,78 x 1,62 | 2      | Rahmen: PVC (53 %)                    | 40                 | A1-A3, B4, C3, C4, D |
|                     |             |        | Verglasung: 2fach Iso-lierglas (47 %) | 30                 |                      |
|                     |             |        | Fugendichtband PE-/PP-Folie           | 40                 |                      |
|                     |             |        | Fensterbeschlag                       | 25                 |                      |

### KG 364 Dachbekleidungen

| BAUTEIL   | FLÄCHE [m²] | BAUSTOFF                   | DICKE [mm] | NUTZUNGS-DAUER [A] | LEBENSZYKLUS-STADIEN |
|---|-------------|----------------------------|------------|--------------------|----------------------|
| Dach<br>(PV-Module werden in KG 400 berücksichtigt) | 369         | Dampfbremse (PE)           | 0,2        | 40                 | A1-A3, B4, C3, C4, D |
|   |             | Dämmung (Steinwolle, 92 %) | 110        | 50                 |                      |
|   |             | Dämmung (Steinwolle)       | 60         | 50                 |                      |
|   |             | Unterspannbahn (PP)        | 0,2        | 30                 |                      |
|   |             | Holz-UK (8 %)              | 30         | 50                 |                      |

| BAUTEIL    | FLÄCHE [m²] | BAUSTOFF             | DICKE [mm] | NUTZUNGS-DAUER [A] | LEBENSZYKLUS-STADIEN |
|------------|-------------|----------------------|------------|--------------------|----------------------|
| Gaubendach | 37          | Dampfbremse (PE)     | 0,2        | 40                 | A1-A3, B4, C3, C4, D |
|            |             | Dämmung (Steinwolle) | 100        | 50                 |                      |
|            |             | Unterspannbahn (PP)  | 0,2        | 30                 |                      |
|            |             | MDF-Platte           | 12         | 50                 |                      |
|            |             | Holz-UK (8 %)        | 30         | 50                 |                      |
|            |             | Kupferdach           | 5          | 50                 |                      |

### Technische Anlagen

#### KG 421 Wärmeerzeugungsanlagen

| BEZEICHNUNG            | MENGE | EINHEIT | NUTZUNGS-DAUER [A] | LEBENSZYKLUS-STADIEN |
|------------------------|-------|---------|--------------------|----------------------|
| Luft-Wasser-Wärmepumpe | 1     | Stück   | 18                 | A1-A3, B4, C3, C4, D |

| BEZEICHNUNG               | MENGE | EINHEIT | NUTZUNGS-DAUER [A] | LEBENSZYKLUS-STADIEN |
|---------------------------|-------|---------|--------------------|----------------------|
| Pufferspeicher, Edelstahl | 98    | kg      | 20                 | A1-A3, B4, C3, C4, D |

| BEZEICHNUNG                        | MENGE | EINHEIT | NUTZUNGS-DAUER [A] | LEBENSZYKLUS-STADIEN |
|------------------------------------|-------|---------|--------------------|----------------------|
| Frischwasserstationen <sup>1</sup> | 12    | Stück   | 18                 | A1-A3, B4, C3, C4, D |

#### *KG 423 Raumheizflächen*

| BEZEICHNUNG                | MENGE | EINHEIT | NUTZUNGS-DAUER [A] | LEBENSZYKLUS-STADIEN |
|----------------------------|-------|---------|--------------------|----------------------|
| Niedertemperaturheizkörper | 48    | Stück   | 30                 | A1-A3, B4, C3, C4, D |

#### *KG 431 Lüftungsanlagen*

| BEZEICHNUNG       | MENGE | EINHEIT | NUTZUNGS-DAUER [A] | LEBENSZYKLUS-STADIEN |
|-------------------|-------|---------|--------------------|----------------------|
| Lüfter, dezentral | 48    | Stück   | 12                 | A1-A3, B4, C3, C4, D |

#### *KG 442 Eigenstromversorgungsanlagen*

| BEZEICHNUNG | MENGE | EINHEIT        | NUTZUNGS-DAUER [A] | LEBENSZYKLUS-STADIEN |
|-------------|-------|----------------|--------------------|----------------------|
| PV-Anlage   | 369   | m <sup>2</sup> | 20                 | A1-A3, B4, C3, C4, D |

<sup>1</sup> Datensatz für 1 Strom-Wärmepumpe (Wasser-Wasser) 10 kW

#### 4.4.2. Wirkungsabschätzung

| LEBENSZYKLUSANALYSE               |                                      | Treibhaus-<br>potenzial                                   | Ozonschicht-<br>abbau-<br>potenzial          | Ozonbildungs-<br>potenzial                      | Versauerungs-<br>potenzial                               | Überdüngungs-<br>potenzial                               | Nicht<br>erneuerbarer<br>Primärenergie<br>bedarf | Erneuerbarer<br>Primärenergiebe-<br>darf | Gesamt-<br>Primärenergiebe-<br>darf  |           |
|-----------------------------------|--------------------------------------|---|--|---|--|--|--|--|--------------------------------------|-----------|
| Effizienzhaus Plus<br>Sanierung   |                                      | GWP<br>[kg CO <sub>2</sub> -Äq./<br>(m <sup>2</sup> WdA)] | ODP<br>[kg R11-Äq./<br>(m <sup>2</sup> WdA)] | POCP<br>[kg Ethen-Äq./<br>(m <sup>2</sup> WdA)] | AP<br>[kg SO <sub>2</sub> -Äq./<br>(m <sup>2</sup> WdA)] | EP<br>[kg PO <sub>4</sub> -Äq./<br>(m <sup>2</sup> WdA)] | PENRT<br>[MJ/<br>(m <sup>2</sup> WdA)]           | PERT<br>[MJ/<br>(m <sup>2</sup> WdA)]    | PET<br>[MJ/<br>(m <sup>2</sup> WdA)] |           |
| Gesamter Lebenszyklus A-D         |                                      | -8,99E+00   | 6,47E-08                                     | 1,10E-03  | -3,11E-03  | -9,48E-04  | -1,20E+02  | 3,31E+01                                 | -8,70E+01                            |           |
| Herstellung                       | A1 Rohstoffgewinnung                 | 2,22E+00  | 4,16E-08                                     | 1,31E-03  | 1,06E-02   | 1,07E-03   | 3,64E+01   | 1,15E+01                                 | 4,79E+01                             |           |
|                                   | A2 Transport zum Hersteller          |   |  |   |  |  |  |  |                                      |           |
|                                   | A3 Herstellung                       |   |  |   |  |  |  |  |                                      |           |
|                                   | A1-A3 KG 330 Außenwände              | 4,06E-01  | 1,15E-08                                     | 3,67E-04  | 2,77E-03   | 3,90E-04   | 8,69E+00   | 3,32E+00                                 | 1,20E+01                             |           |
|                                   | A1-A3 KG 340 Innenwände und -türen   | 0,00E+00  | 0,00E+00                                     | 0,00E+00  | 0,00E+00   | 0,00E+00   | 0,00E+00   | 0,00E+00                                 | 0,00E+00                             |           |
|                                   | A1-A3 KG 350 Decken                  | 2,90E-02  | 6,42E-10                                     | 8,91E-06  | 1,60E-04   | 2,10E-05   | 3,47E-01   | 4,28E-02                                 | 3,90E-01                             |           |
|                                   | A1-A3 KG 360 Dächer                  | 1,73E-01  | 6,58E-09                                     | 1,03E-04  | 1,64E-03   | 1,73E-04   | 3,35E+00   | 1,12E+00                                 | 4,46E+00                             |           |
|                                   | A1-A3 KG 420 Wärmeversorgungsanlagen | 1,43E-01  | 2,25E-08                                     | 7,58E-05  | 4,71E-04   | 4,90E-05   | 1,98E+00   | 7,77E-02                                 | 2,06E+00                             |           |
|                                   | A1-A3 KG 430 Lufttechnische Anlagen  | 2,41E-02  | 4,91E-12                                     | 8,23E-06  | 1,14E-04   | 8,08E-06   | 3,87E-01   | 5,19E-02                                 | 4,39E-01                             |           |
|                                   | A1-A3 KG 440 Starkstromanlage        | 1,44E+00  | 3,37E-10                                     | 7,48E-04  | 5,42E-03   | 4,29E-04   | 2,16E+01   | 6,91E+00                                 | 2,85E+01                             |           |
|                                   | B2 Instandhaltung                    | 1,77E+01  | 4,86E-08                                     | 3,45E-03  | 3,48E-02   | 4,12E-03   | 2,44E+02   | 1,31E+02                                 | 3,75E+02                             |           |
|                                   | B6 Energieverbrauch im Betrieb       |   |  |   |  |  |  |  |                                      |           |
|                                   | Nutzung                              | B2 KG 330 Außenwände                                      | 3,45E-01                                     | 1,46E-09  | 2,32E-04   | 1,05E-03   | 1,58E-04   | 3,81E+00                                 | 2,20E-01                             | 4,03E+00  |
|                                   |                                      | B2 KG 340 Innenwände und -türen                           | 0,00E+00                                     | 0,00E+00  | 0,00E+00   | 0,00E+00   | 0,00E+00   | 0,00E+00                                 | 0,00E+00                             | 0,00E+00  |
| B2 KG 350 Decken                  |                                      | 0,00E+00  | 0,00E+00                                     | 0,00E+00  | 0,00E+00   | 0,00E+00   | 0,00E+00   | 0,00E+00                                 | 0,00E+00                             |           |
| B2 KG 360 Dächer                  |                                      | 3,02E-02  | 7,02E-13                                     | 1,36E-05  | 1,89E-04   | 6,81E-06   | 4,11E-01   | 6,64E-03                                 | 4,17E-01                             |           |
| B2 KG 420 Wärmeversorgungsanlagen |                                      | 1,12E-01  | 4,51E-08                                     | 5,26E-05  | 3,30E-04   | 4,39E-05   | 1,75E+00   | 1,09E-01                                 | 1,86E+00                             |           |
| B2 KG 430 Lufttechnische Anlagen  |                                      | 3,77E-02  | 3,97E-12                                     | 1,14E-05  | 1,58E-04   | 1,14E-05   | 5,22E-01   | 4,41E-02                                 | 5,66E-01                             |           |
| B2 KG 440 Starkstromanlage        |                                      | 2,57E+00  | 5,77E-10                                     | 1,35E-03  | 9,19E-03   | 7,81E-04   | 3,82E+01   | 1,30E+01                                 | 5,12E+01                             |           |
| B6 Strombedarf                    |                                      | 2,42E+00  | 2,42E-10                                     | 2,97E-04  | 3,96E-03   | 5,17E-04   | 3,30E+01   | 7,17E+01                                 | 1,05E+02                             |           |
| B6 Strombedarf Nutzerstrom        |                                      | 1,22E+01  | 1,22E-09                                     | 1,50E-03  | 1,99E-02   | 2,60E-03   | 1,66E+02   | 4,57E+01                                 | 2,12E+02                             |           |
| Entsorgung                        |                                      | C3 Abfallverwertung                                       | 4,70E-01                                     | 4,19E-10  | 3,13E-05   | 2,97E-04   | 1,48E-04   | 7,38E-01                                 | -2,04E+00                            | -1,31E+00 |
|                                   | C4 Entsorgung                        |   |  |   |  |  |  |  |                                      |           |
|                                   | C3-C4 KG 330 Außenwände              | 3,08E-01  | 3,09E-10                                     | 9,25E-06  | 5,90E-05   | 6,63E-05   | 1,38E-01   | -1,73E+00                                | -1,59E+00                            |           |
|                                   | C3-C4 KG 340 Innenwände und -türen   | 0,00E+00  | 0,00E+00                                     | 0,00E+00  | 0,00E+00   | 0,00E+00   | 0,00E+00   | 0,00E+00                                 | 0,00E+00                             |           |
|                                   | C3-C4 KG 350 Decken                  | 1,88E-03  | 5,22E-12                                     | 7,37E-07  | 3,83E-06   | 5,17E-06   | 8,55E-03   | 5,86E-04                                 | 9,13E-03                             |           |
|                                   | C3-C4 KG 360 Dächer                  | 6,87E-02  | 1,03E-10                                     | 4,12E-06  | 1,59E-05   | 3,79E-05   | 3,74E-02   | -3,89E-01                                | -3,51E-01                            |           |
|                                   | C3-C4 KG 420 versorgungsanlagen      | 2,25E-03  | 8,53E-15                                     | 9,36E-08  | 1,45E-06   | 2,12E-07   | 2,66E-03   | 3,56E-04                                 | 3,01E-03                             |           |
|                                   | C3-C4 KG 430 Lufttechnische Anlagen  | 4,08E-03  | 2,05E-15                                     | 4,75E-08  | 3,51E-07   | 1,08E-07   | 6,96E-04   | 8,03E-05                                 | 7,77E-04                             |           |
| C3-C4 KG 440 Starkstromanlage     | 8,49E-02                             | 2,01E-12  | 1,71E-05                                     | 2,17E-04  | 3,83E-05   | 5,51E-01   | 7,54E-02   | 6,27E-01                                 |                                      |           |
| Gutschriften                      | D Gutschriften                       | -2,94E+01   | -2,58E-08                                    | -3,69E-03                                       | -4,88E-02  | -6,28E-03  | -4,01E+02  | -1,07E+02                                | -5,08E+02                            |           |
|                                   | D KG 330 Außenwände                  | -1,65E-01   | -1,79E-08                                    | -1,61E-05                                       | -1,85E-04  | -1,48E-05  | -2,84E+00  | 1,53E+00                                 | -1,32E+00                            |           |
|                                   | D KG 340 Innenwände und -türen       | 0,00E+00  | 0,00E+00                                     | 0,00E+00  | 0,00E+00   | 0,00E+00   | 0,00E+00   | 0,00E+00                                 | 0,00E+00                             |           |
|                                   | D KG 350 Decken                      | -1,51E-03   | -5,97E-11                                    | -1,64E-07                                       | -1,60E-06  | -1,93E-07  | -2,49E-02  | -1,16E-03                                | -2,60E-02                            |           |
|                                   | D KG 360 Dächer                      | -3,59E-02   | -4,97E-09                                    | -3,17E-06                                       | -3,76E-05  | -2,44E-06  | -6,85E-01  | 3,32E-01                                 | -3,53E-01                            |           |
|                                   | D KG 420 versorgungsanlagen          | -0,05081488   | -1,08E-13                                    | -2,82E-05                                       | -2,03E-04  | -1,70E-05  | -0,47576502                                      | 3,34E-03                                 | -4,72E-01                            |           |
|                                   | D KG 430 Lufttechnische Anlagen      | -9,34E-03   | -2,92E-12                                    | -2,56E-06                                       | -3,55E-05  | -2,52E-06  | -1,27E-01  | -2,99E-02                                | -1,56E-01                            |           |
|                                   | D KG 440 Starkstromanlage            | -2,42E-01   | -5,12E-11                                    | -9,07E-05                                       | -1,04E-03  | -7,73E-05  | -3,06E+00  | -5,03E-01                                | -3,56E+00                            |           |
|                                   | D Gutschrift: Strom aus PV           | -2,89E+01   | -2,89E-09                                    | -3,55E-03                                       | -4,73E-02  | -6,17E-03  | -3,94E+02  | -1,08E+02                                | -5,02E+02                            |           |

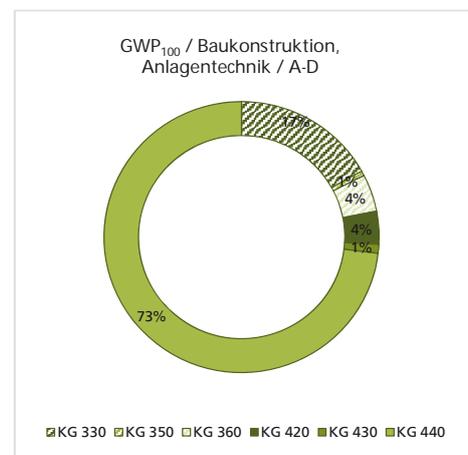
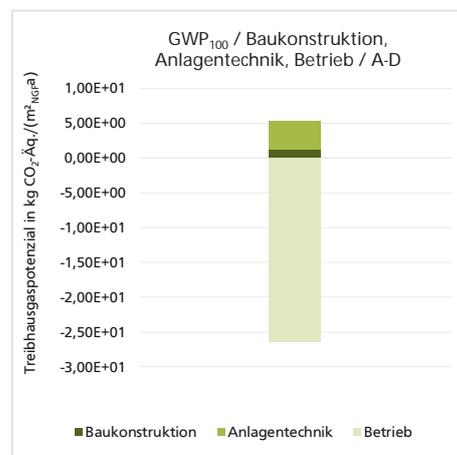
Tab. 14: Wirkungsabschätzung der Sanierung zum Effizienzhaus Plus

## Treibhauspotenzial $GWP_{100}$

Das Diagramm in Abb. 116 verdeutlicht den Vorteil des energetischen Standards im Betrieb: Die Emissionen für Baukonstruktion, Anlagentechnik sowie für den Betrieb können durch die Gutschrift des erneuerbar gewonnen Stroms der PV-Anlage im Lebenszyklus mehrfach ausgeglichen werden. Insgesamt ergibt sich ein Treibhauspotenzial von  $-21 \text{ kg CO}_2 / (\text{m}^2_{\text{NGF}} \cdot \text{a})$ . In Abb. 117 fällt der hohe Anteil der Anlagentechnik mit 82 % im Vergleich zur Baukonstruktion mit 17 % auf. Allein Dreiviertel gehen auf die Photovoltaikanlage zurück. Dies begründet sich mit den zurzeit noch sehr aufwendigen Prozessen zur Gewinnung und Verarbeitung des Siliziums sowie die Glasscheibe auf dem Modul und der weiteren notwendigen Kleinteile. Auch hier bringen technische Innovationen stetig neue Entwicklungen hervor, wie beispielsweise recycelte PV-Module. Das Treibhauspotenzial der Baukonstruktion ist dem erhöhten Dämmstandard sowie den Fenstern zuzuschreiben.

Abb. 116: Gesamtwirkungsabschätzung  $GWP_{100}$

Abb. 117: Verteilung  $GWP_{100}$  Baukonstruktion und Anlagentechnik



Die in Abb. 118 dargestellten verschiedenen Lebenszyklusstadien verdeutlichen den Einfluss der Fenster. Allein in der Herstellungsphase sind sie für mehr als die Hälfte des Treibhauspotenzials verantwortlich, obwohl sie nicht einmal ein Zehntel der Masse ausmachen. Hinzu kommt, dass sie innerhalb des Betrachtungszeitraums mindestens einmal ausgetauscht werden. Das größte Treibhauspotenzial ist jedoch der PV-Anlage zuzuschreiben. Sie muss im Betrachtungszeitraum zweimal ausgetauscht werden, was zu zusätzlichen Emissionen in der Nutzungsphase führt.

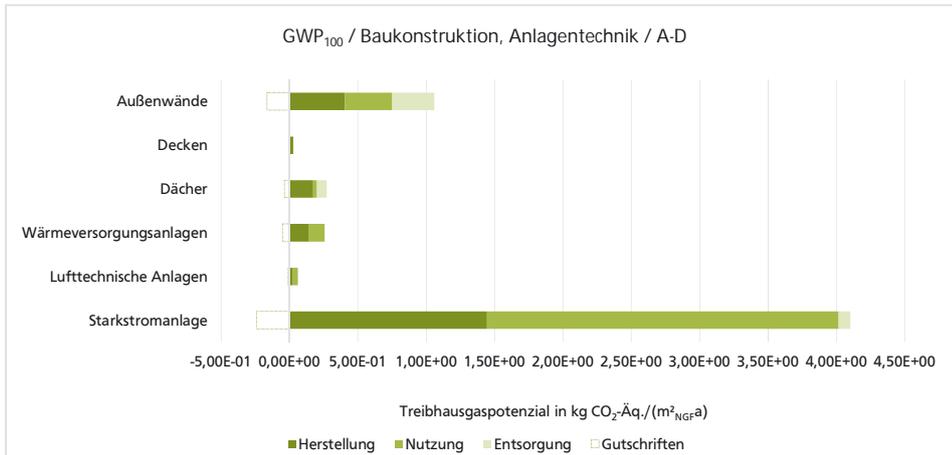


Abb. 118: Gesamtwirkungsabschätzung GWP<sub>100</sub> nach Phasen und Gruppen

### Eutrophierungspotenzial EP

Das Überdüngungspotenzial beträgt  $-3,55E-03 \text{ kg PO}_4\text{-Äq./ (m}^2_{\text{NGF}}\cdot\text{a)}$ . Die Abb. 119 und Abb. 120 zeigen vergleichbare Ergebnisse wie das Treibhausgaspotenzial. Die Anlagentechnik verursacht auch hier den größten Teil des Potenzials. Einzig der Anteil der Baukonstruktion ist etwas höher (Abb. 119). In der Verteilung nimmt das Dach einen geringfügig größeren Anteil ein (Abb. 120).

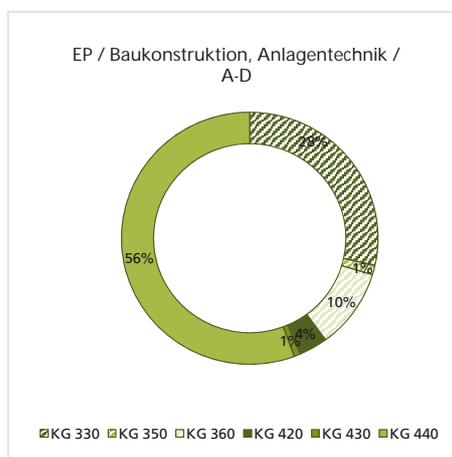
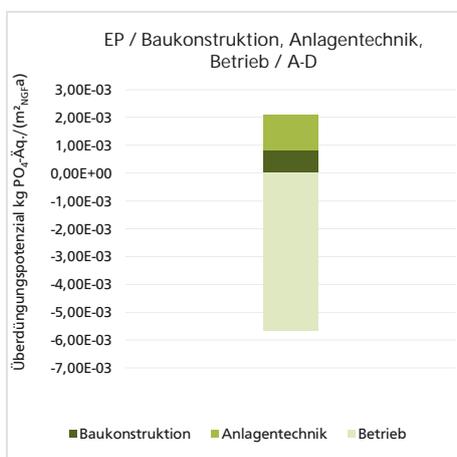


Abb. 119: Gesamtwirkungsabschätzung EP

Abb. 120: Verteilung EP Baukonstruktion und Anlagentechnik

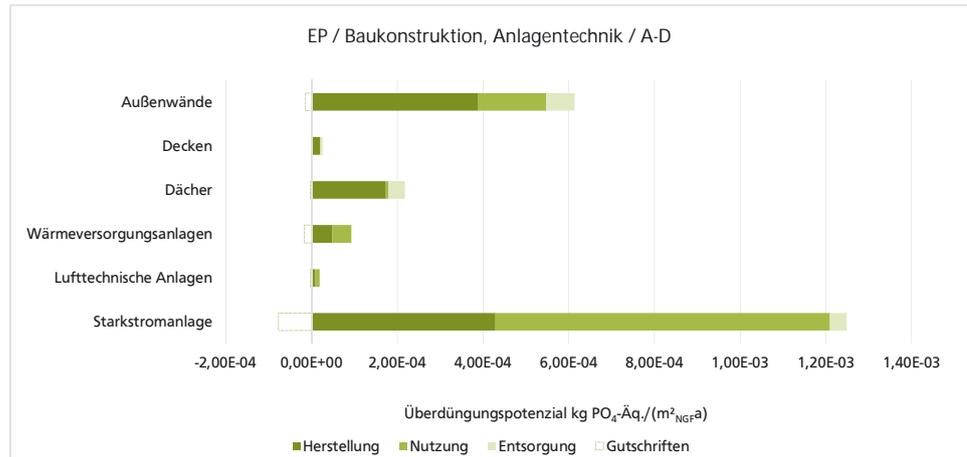


Abb. 121: Gesamtwirkungsabschätzung POCP

### Photochemisches Oxidantienbildungspotenzial POCP

Das Photochemische Oxidantienbildungspotenzial liegt bei  $-3,93E-04 \text{ kg Ethen-Äq./m}^2_{\text{NGF-a}}$ . Anhand von Abb. 122, Abb. 123 und Abb. 124 wird die PV-Anlage erneut als Hauptverursacher identifiziert. Sie ist notwendig, um die energetischen Vorgaben einzuhalten. Das photochemische Oxidantienbildungspotenzial kann durch den Stromgewinn wieder ausgeglichen werden.

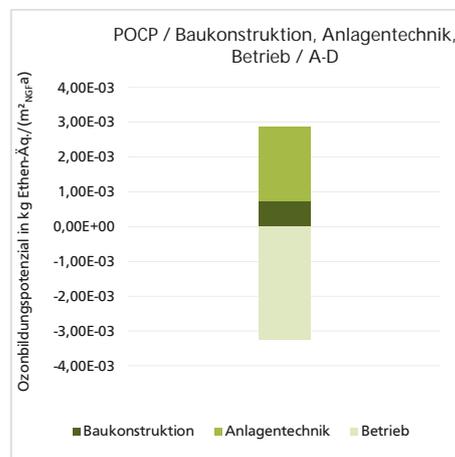
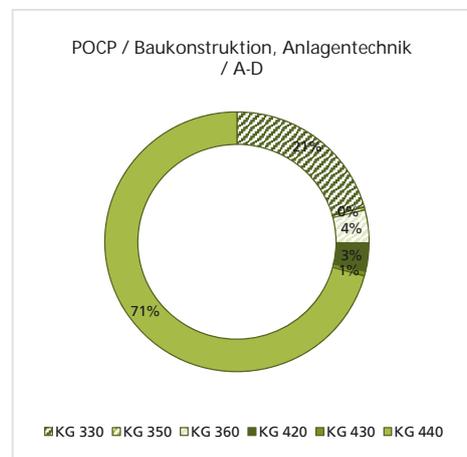


Abb. 122: Gesamtwirkungsabschätzung POCP

Abb. 123: Verteilung POCP Baukonstruktion und Anlagentechnik



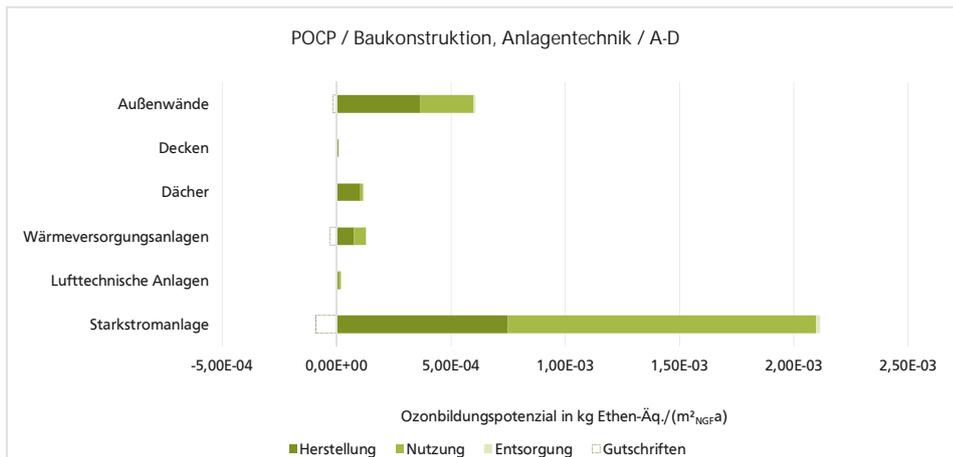


Abb. 124: Gesamtwirkungsabschätzung POCP nach Phasen und Gruppen

### Ozonabbaupotenzial ODP

Das Ozonabbaupotenzial beträgt  $6,35E-08 \text{ kg PO}_4\text{-Äq./ (m}^2_{\text{NGF}} \cdot \text{a)}$ . An den Diagrammen in Abb. 125 und Abb. 126 wird der erhebliche Anteil der Anlagentechnik am gesamten Ozonabbaupotenzial deutlich. Er kann auch durch die Gutschriften der für die Baukonstruktion und den Betrieb nicht ausgeglichen werden. Der höchste Anteil liegt hier bei den Wärmeversorgungsanlagen - im speziellen bei den Frischwasserstationen, für die eine Wasser-Wasser-Wärmepumpe angesetzt wurde, weil momentan kein entsprechender Datensatz für Frischwasserstationen verfügbar ist. Die Ergebnisse in diesem Bereich sind dementsprechend unter Vorbehalt zu betrachten.

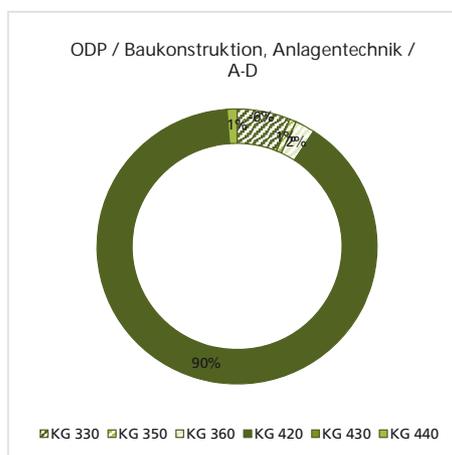
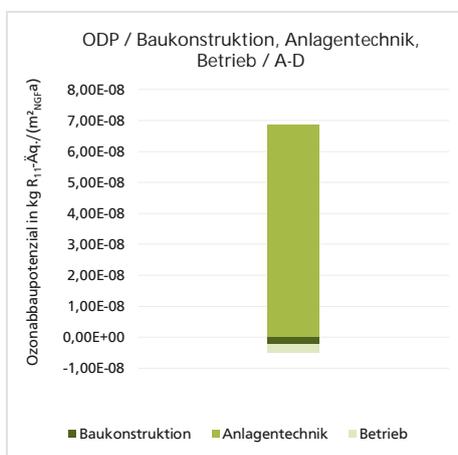


Abb. 125: Gesamtwirkungsabschätzung ODP

Abb. 126: Verteilung ODP Baukonstruktion und Anlagentechnik

Bei Betrachtung der verschiedenen Lebenszyklusstadien in Abb. 127 zeichnet sich der Einfluss der Baustoffwahl ab. Allein durch die Gutschriften für die Holzunterkonstruktionen kann das Ozonabbaupotenzial der Außenwände wieder ausgeglichen werden. Die Frischwasserstationen, die zweimal innerhalb des Betrachtungszeitraums erneuert werden müssen, sorgen für die hohen Risiken in der Herstellungs- und Nutzungsphase. Wie bereits erwähnt, könnten die Ergebnisse mit einem konkreten Datensatz besser berücksichtigt werden.

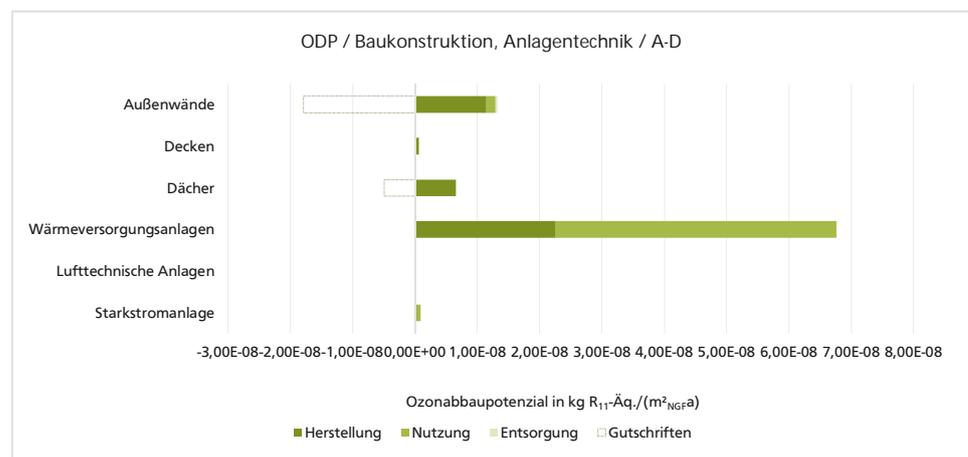


Abb. 127: Gesamtwirkungsabschätzung ODP nach Phasen und Gruppen

### Versauerungspotenzial AP

Die Untersuchungen weisen ein Versauerungspotenzial in Höhe von  $-2,31E-02 \text{ kg SO}_2\text{-Äq.}/(\text{m}^2_{\text{NGF}}\cdot\text{a})$  nach. Die Verteilung verhält sich wieder analog zum Treibhauspotenzial.

### Gesamtprimärenergie PET

Das Diagramm in Abb. 128 zeigt, dass der Gesamt-Primärenergiebedarf für das zum Effizienzhaus Plus weiterentwickelten Gebäudes hauptsächlich auf die Anlagentechnik zurückzuführen ist. Die Gutschriften einiger Baustoffe sowie die Gutschriften des auf regenerativen Energien basierenden Betriebs können den notwendigen Gesamtprimärenergiebedarf mehrfach ausgleichen. Durch das Zusammenspiel aus optimierter Gebäudehülle und abgestimmter, effizienter Anlagentechnik kann ein Primärenergiebedarf von  $-303 \text{ MJ}/(\text{m}^2_{\text{NGF}}\cdot\text{a})$  nachgewiesen

werden. Das entspricht  $-84 \text{ kWh (m}^2_{\text{NGF}}\text{a)}$ . Aus den Diagrammen in Abb. 128 bis Abb. 130 geht erneut hervor, dass die Anlagentechnik für nahezu den gesamten Primärenergiebedarf verantwortlich ist. Auch hier ist die Photovoltaikanlage als Hauptverursacher zu identifizieren. Zum einen beansprucht sie einen großen Flächenanteil. Zum anderen sind PV-Anlagen bislang noch sehr aufwendig in der Herstellung. Sie ist hier jedoch notwendig, um das „Plus“ für den Energiestandard zu erzielen. In Abb. 130 wird der Einfluss der Photovoltaik-Anlage noch einmal klar hervorgehoben. Sie verursacht bereits in der Herstellungsphase den höchsten Bedarf an Primärenergie. Hinzu kommt, dass sie im Betrachtungszeitraum zweimal ausgetauscht werden muss und somit für ein erhebliches Maß an Primärenergie im Vergleich zu den anderen Gruppen verantwortlich ist.

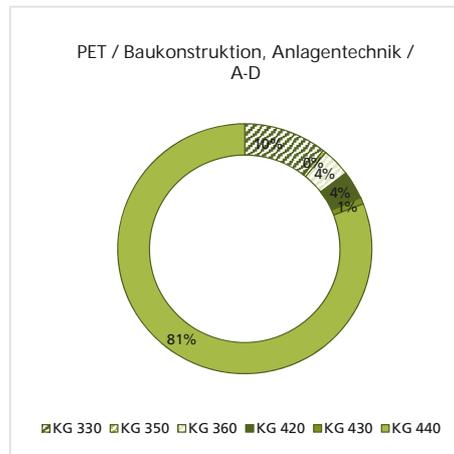
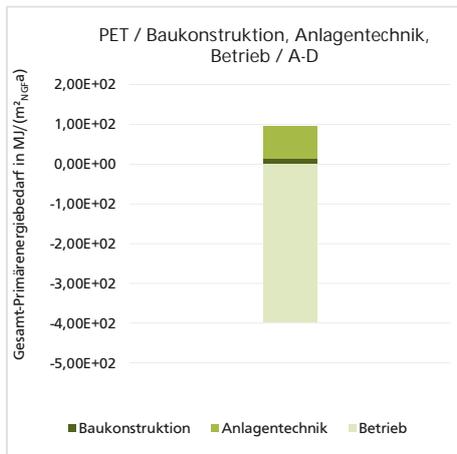


Abb. 128: Gesamtwirkungsabschätzung PET

Abb. 129: Verteilung PET Baukonstruktion und Anlagentechnik

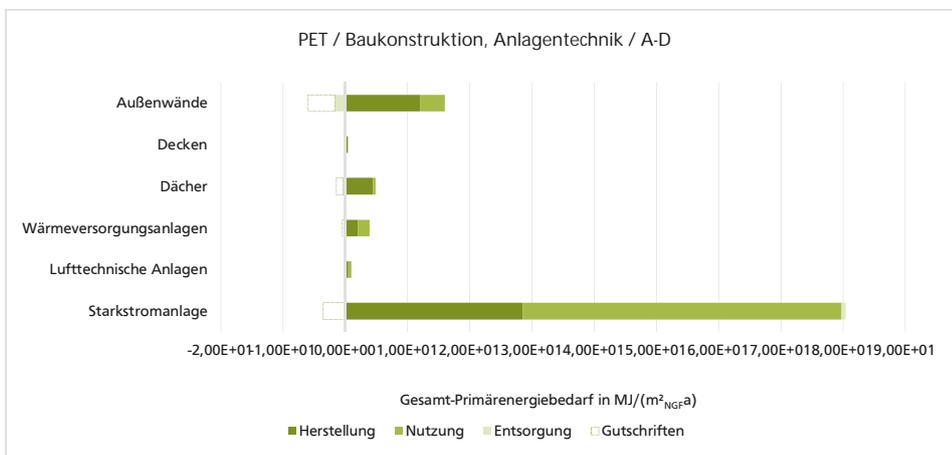


Abb. 130: Gesamtwirkungsabschätzung PET nach Phasen und Gruppen

---

### 4.4.3. Bewertung

Die Untersuchungen zeigen, dass die Umweltwirkungen des zum Effizienzhaus Plus sanierten Gebäudes hauptsächlich durch die baulichen und anlagentechnischen Maßnahmen verursacht werden.

Bei Betrachtung der verschiedenen Lebenszyklusstadien wird der Einfluss der Ausführungsart und der Fenster deutlich. Für die Fassadenbekleidung wird ein vorgehängtes hinterlüftetes System gewählt. Die Lebensdauer kann hier mit 50 Jahren angesetzt werden. Im Gegensatz zum Wärmedämmverbundsystem im EnEV-Szenario muss hier die Bekleidung nicht innerhalb des Betrachtungszeitraums erneuert werden. Die Fenster sind in der Herstellungsphase für mehr als die Hälfte des Treibhauspotenzials verantwortlich, obwohl sie nicht einmal ein Zehntel der Masse ausmachen. Hinzu kommt, dass sie innerhalb des Betrachtungszeitraums mindestens einmal ausgetauscht werden.

Die Anlagentechnik beansprucht jedoch den größten Anteil. Vor allem die Photovoltaik-Anlage kann hier als Hauptverursacher identifiziert werden. Der gesamte Herstellungsprozess von der Gewinnung von Silizium aus Quarzsand bis Herstellung der Solarzelle und zum fertigen PV-Modul ist heute noch sehr aufwendig. Nicht unerheblich sind auch die Umweltwirkungen aus der gläsernen Frontscheibe eines jeden Moduls. Sowohl die Automatisierung als auch der Wirkungsgrad der Module werden stetig verbessert, wodurch auch von einer positiven Entwicklung der umweltbezogenen Qualität ausgegangen werden kann.

Die PV-Anlage ist notwendig, um die geforderten negativen end- und primärenergetisch Jahresnettoenergiebilanzen für den Effizienzhaus Plus-Standard zu erreichen. Der Vorteil des Standards zeigt sich im Betrieb. Die PV-Anlage erzeugt mehr Energie als das Gebäude im Jahr benötigt. Durch diesen auf erneuerbaren Energien basierenden Betrieb können die potenziellen Umweltwirkungen mehr als ausgeglichen werden. Die CO<sub>2</sub>-Emissionen für Baukonstruktion, Anlagentechnik sowie für den Betrieb können durch die Gutschrift des erneuerbar gewonnen Stroms der PV-Anlage im Lebenszyklus mehrfach ausgeglichen werden.

---

## 4.5 Aufstockung und Sanierung zum Effizienzhaus Plus

---

### 4.5.1. Sachbilanz

#### Gebäudebetrieb

| ENDENERGIEBEDARF              | MENGE  | EINHEIT                | LEBENSZYKLUSSTADIEN |
|-------------------------------|--------|------------------------|---------------------|
| Strom Wärmepumpe - Heizung    | 11,9   | kWh/(m <sup>2</sup> a) | B6                  |
| Strom Wärmepumpe - Warmwasser | 6,5    | kWh/(m <sup>2</sup> a) | B6                  |
| Stromgutschrift PV            | 57.779 | kWh/a                  | D                   |

Bezugsgröße:  $A_N$  EnEV: 1.078 m<sup>2</sup>

#### Baukonstruktion

##### KG 331 Tragende Außenwände

| BAUTEIL     | FLÄCHE<br>[m <sup>2</sup> ] | BAUSTOFF                   | DICKE<br>[mm] | NUTZUNGS-<br>DAUER [A] | LEBENSZYKLUS-<br>STADIEN |
|-------------|-----------------------------|----------------------------|---------------|------------------------|--------------------------|
| Aufstockung | 266                         | Gipskartonplatte           | 12,5          | 50                     | A1-A3, B4,<br>C3, C4, D  |
|             |                             | Dämmung (Steinwolle, 92 %) | 30            | 50                     |                          |
|             |                             | Holz-UK (8 %)              | 30            | 50                     |                          |
|             |                             | Dampfbremse (PE)           | 0,2           | 50                     |                          |
|             |                             | OSB-Platte                 | 12            | 50                     |                          |
|             |                             | Dämmung (Steinwolle, 82 %) | 120           | 50                     |                          |
|             |                             | Holz-UK (8 %)              | 120           | 50                     |                          |
|             |                             | MDF-Platte                 | 12            | 50                     |                          |

### KG 332 Nichttragende Außenwände

| BAUTEIL     | FLÄCHE<br>[m <sup>2</sup> ] | BAUSTOFF                   | DICKE<br>[mm] | NUTZUNGS-<br>DAUER [A] | LEBENSZYKLUS-<br>STADIEN |
|-------------|-----------------------------|----------------------------|---------------|------------------------|--------------------------|
| Gaubenwände | 176                         | Gipskartonplatte           | 12,5          | 50                     | A1-A3, B4,<br>C3, C4, D  |
|             |                             | Dämmung (Steinwolle, 92 %) | 30            | 50                     |                          |
|             |                             | Holz-UK (8 %)              | 30            | 50                     |                          |
|             |                             | Dampfbremse (PE)           | 0,2           | 50                     |                          |
|             |                             | OSB-Platte                 | 12            | 50                     |                          |
|             |                             | Dämmung (Steinwolle, 92 %) | 100           | 50                     |                          |
|             |                             | Holz-UK (8 %)              | 100           | 50                     |                          |
|             |                             | MDF-Platte                 | 12            | 50                     |                          |

### KG 334 Außentüren und Fenster

| BAUTEIL                 | MAßE<br>[m] | ANZAHL | BAUSTOFF                                   | NUTZUNGS-<br>DAUER [A] | LEBENS-<br>ZYKLUS-<br>STADIEN |
|-------------------------|-------------|--------|--|------------------------|-------------------------------|
| Treppenhaus-<br>fenster | 0,9 x 1,6   | 2      | Rahmen: PVC (56,8 %)                       | 40                     | A1-A3, B4,<br>C3, C4, D       |
|                         |             |        | Verglasung: 3fach Ver-<br>glasung (43,2 %) | 30                     |                               |
|                         |             |        | Fugendichtband PE-/PP-Folie                | 30                     |                               |
|                         |             |        | Fensterbeschlag                            | 25                     |                               |

| BAUTEIL                 | MAßE<br>[m] | ANZAHL | BAUSTOFF                                   | NUTZUNGS-<br>DAUER [A] | LEBENS-<br>ZYKLUS-<br>STADIEN |
|-------------------------|-------------|--------|--|------------------------|-------------------------------|
| Treppenhaus-<br>fenster | 0,9 x 2,5   | 2      | Rahmen: PVC (61,2 %)                       | 40                     | A1-A3, B4,<br>C3, C4, D       |
|                         |             |        | Verglasung: 3fach Ver-<br>glasung (38,8 %) | 30                     |                               |
|                         |             |        | Fugendichtband PE-/PP-Folie                | 30                     |                               |
|                         |             |        | Fensterbeschlag                            | 25                     |                               |

| BAUTEIL          | MAßE [m]    | ANZAHL | BAUSTOFF                               | NUTZUNGS-DAUER [A] | LEBENS-ZYKLUS-STADIEN |
|------------------|-------------|--------|--|--------------------|-----------------------|
| Hausein-gangstür | 1,01 x 2,01 | 2      | Rahmen: Alu (62,2 %)                   | 50                 | A1-A3, B4, C3, C4, D  |
|                  |             |        | Verglasung: 3fach Ver-glasung (37,8 %) | 30                 |                       |
|                  |             |        | Fugendichtband PE-/PP-Folie            | 40                 |                       |
|                  |             |        | Türbeschlag                            | 30                 |                       |

| BAUTEIL         | MAßE [m]    | ANZAHL | BAUSTOFF                               | NUTZUNGS-DAUER [A] | LEBENS-ZYKLUS-STADIEN |
|-----------------|-------------|--------|--|--------------------|-----------------------|
| Fenster EG West | 1,1 x 2,245 | 8      | Rahmen: PVC (65,2 %)                   | 40                 | A1-A3, B4, C3, C4, D  |
|                 |             |        | Verglasung: 3fach Ver-glasung (34,8 %) | 30                 |                       |
|                 |             |        | Fugendichtband PE-/PP-Folie            | 40                 |                       |
|                 |             |        | Fensterbeschlag                        | 25                 |                       |

| BAUTEIL           | MAßE [m]   | ANZAHL | BAUSTOFF                               | NUTZUNGS-DAUER [A] | LEBENS-ZYKLUS-STADIEN |
|-------------------|------------|--------|--|--------------------|-----------------------|
| Fenster 1.OG West | 1,1 x 2,31 | 8      | Rahmen: PVC (65,5 %)                   | 40                 | A1-A3, B4, C3, C4, D  |
|                   |            |        | Verglasung: 3fach Ver-glasung (34,5 %) | 30                 |                       |
|                   |            |        | Fugendichtband PE-/PP-Folie            | 40                 |                       |
|                   |            |        | Fensterbeschlag                        | 25                 |                       |

| BAUTEIL                            | MAßE [m]   | ANZAHL | BAUSTOFF                               | NUTZUNGS-DAUER [A] | LEBENS-ZYKLUS-STADIEN |
|------------------------------------|------------|--------|--|--------------------|-----------------------|
| Fenster EG und 1.OG Nord, Süd, Ost | 1,2 x 1,45 | 20     | Rahmen: PVC (61,9 %)                   | 40                 | A1-A3, B4, C3, C4, D  |
|                                    |            |        | Verglasung: 3fach Ver-glasung (38,1 %) | 30                 |                       |
|                                    |            |        | Fugendichtband PE-/PP-Folie            | 40                 |                       |
|                                    |            |        | Fensterbeschlag                        | 25                 |                       |

| BAUTEIL           | MAßE [m]  | ANZAHL | BAUSTOFF                              | NUTZUNGSDAUER [A] | LEBENSZYKLUSSTADIEN  |
|-------------------|-----------|--------|---------------------------------------|-------------------|----------------------|
| Fenster 2.OG West | 1,1 x 2,5 | 16     | Rahmen: PVC (66,2 %)                  | 40                | A1-A3, B4, C3, C4, D |
|                   |           |        | Verglasung: 3fach Verglasung (33,8 %) | 30                |                      |
|                   |           |        | Fugendichtband PE-/PP-Folie           | 40                |                      |
|                   |           |        | Fensterbeschlag                       | 25                |                      |

| BAUTEIL        | MAßE [m]  | ANZAHL | BAUSTOFF                               | NUTZUNGSDAUER [A] | LEBENSZYKLUSSTADIEN  |
|----------------|-----------|--------|--|-------------------|----------------------|
| Gauben-Fenster | 1,1 x 2,5 | 12     | Rahmen: PVC (66,2 %)                   | 40                | A1-A3, B4, C3, C4, D |
|                |           |        | Verglasung: 3fach Isolierglas (33,8 %) | 30                |                      |
|                |           |        | Fugendichtband PE-/PP-Folie            | 40                |                      |
|                |           |        | Fensterbeschlag                        | 25                |                      |

| BAUTEIL               | MAßE [m]   | ANZAHL | BAUSTOFF                               | NUTZUNGSDAUER [A] | LEBENSZYKLUSSTADIEN  |
|-----------------------|------------|--------|--|-------------------|----------------------|
| Gauben-Festverglasung | 1,25 x 2,5 | 12     | Rahmen: PVC (68,9 %)                   | 40                | A1-A3, B4, C3, C4, D |
|                       |            |        | Verglasung: 3fach Isolierglas (31,1 %) | 30                |                      |
|                       |            |        | Fugendichtband PE-/PP-Folie            | 40                |                      |
|                       |            |        | Fensterbeschlag                        | 25                |                      |

### KG 335 Außenwandbekleidungen, außen

| BAUTEIL    | FLÄCHE [m²] | BAUSTOFF               | DICKE [mm] | NUTZUNGSDAUER [A] | LEBENSZYKLUSSTADIEN  |
|------------|-------------|------------------------|------------|-------------------|----------------------|
| Kellerwand | 90          | Klebemörtel            | 5          | 40                | A1-A3, B4, C3, C4, D |
|            |             | Perimeterdämmung (EPS) | 140        | 40                |                      |
|            |             | PE-Noppenfolie         | 0,2        | 40                |                      |
|            |             | Armierungsmörtel       | 10         | 40                |                      |
|            |             | Leichtputz             | 10         | 50                |                      |

| BAUTEIL                  | FLÄCHE<br>[m <sup>2</sup> ] | BAUSTOFF             | DICKE<br>[mm] | NUTZUNGSDAUER [A] | LEBENSZYKLUSSTADIEN     |
|--------------------------|-----------------------------|----------------------|---------------|-------------------|-------------------------|
| Außenwand<br>WDVS (Nord) | 114                         | Klebemörtel          | 5             | 40                | A1-A3, B4,<br>C3, C4, D |
|                          |                             | Dämmung (Steinwolle) | 120           | 50                |                         |
|                          |                             | Dämmung (Steinwolle) | 120           | 50                |                         |
|                          |                             | Armierungsmörtel     | 10            | 40                |                         |
|                          |                             | Leichtputz           | 10            | 50                |                         |

| BAUTEIL                                 | FLÄCHE<br>[m <sup>2</sup> ] | BAUSTOFF                   | DICKE<br>[mm] | NUTZUNGSDAUER [A] | LEBENSZYKLUSSTADIEN     |
|---|-----------------------------|----------------------------|---------------|-------------------|-------------------------|
| Außenwand<br>Faserzement<br>(West, Ost) | 413                         | Holz-UK (8 %)              | 120           | 50                | A1-A3, B4,<br>C3, C4, D |
|   |                             | Dämmung (Steinwolle, 92 %) | 120           | 50                |                         |
|   |                             | Holz-UK (8 %)              | 120           | 50                |                         |
|   |                             | Dämmung (Steinwolle, 92 %) | 120           | 50                |                         |
|   |                             | Folie (PP)                 | 0,2           | 50                |                         |
|   |                             | Holz-UK (8 %)              | 30            | 50                |                         |
|   |                             | Faserzementfassade         | 8             | 50                |                         |

| BAUTEIL  | FLÄCHE<br>[m <sup>2</sup> ] | BAUSTOFF                   | DICKE<br>[mm] | NUTZUNGSDAUER [A] | LEBENSZYKLUSSTADIEN     |
|--|-----------------------------|----------------------------|---------------|-------------------|-------------------------|
| Außenwand<br>PV (Süd)<br><br>(PV-Module<br>werden in KG 400<br>berücksichtigt) | 111                         | Holz-UK (8 %)              | 120           | 50                | A1-A3, B4,<br>C3, C4, D |
|  |                             | Dämmung (Steinwolle, 92 %) | 120           | 50                |                         |
|  |                             | Holz-UK (8 %)              | 120           | 50                |                         |
|  |                             | Dämmung (Steinwolle, 92 %) | 120           | 50                |                         |
|  |                             | Folie (PP)                 | 0,2           | 50                |                         |
|  |                             | Holz-UK (8 %)              | 30            | 50                |                         |

| BAUTEIL     | FLÄCHE<br>[m <sup>2</sup> ] | BAUSTOFF             | DICKE<br>[mm] | NUTZUNGSDAUER [A] | LEBENSZYKLUSSTADIEN     |
|-------------|-----------------------------|----------------------|---------------|-------------------|-------------------------|
| Gaubenwände | 176                         | Klebemörtel          | 5             | 40                | A1-A3, B4,<br>C3, C4, D |
|             |                             | Dämmung (Steinwolle) | 150           | 50                |                         |
|             |                             | Holz-UK (8 %)        | 30            | 50                |                         |
|             |                             | Faserzementfassade   | 8             | 50                |                         |

### KG 338 Sonnenschutz

| BAUTEIL  | FLÄCHE<br>[m <sup>2</sup> ] | BAUSTOFF             | DICKE<br>[mm] | NUTZUNGS-<br>DAUER [A] | LEBENSZYKLUS-<br>STADIEN |
|----------|-----------------------------|----------------------|---------------|------------------------|--------------------------|
| Rolladen | 8,4                         | Rolladen, Kunststoff | -             | 40                     | A1-A3, B4,<br>C3, C4, D  |

### KG 341 Tragende Innenwände

| BAUTEIL                    | FLÄCHE<br>[m <sup>2</sup> ] | BAUSTOFF         | DICKE<br>[mm] | NUTZUNGS-<br>DAUER [A] | LEBENSZYKLUS-<br>STADIEN |
|----------------------------|-----------------------------|------------------|---------------|------------------------|--------------------------|
| Erweiterung<br>Treppenhaus | 73                          | Gipskartonplatte | 12,5          | 50                     | A1-A3, B4,<br>C3, C4, D  |
|                            |                             | Brettsperholz    | 240           | 50                     |                          |
|                            |                             | Gipskartonplatte | 12,5          | 50                     |                          |

| BAUTEIL                          | FLÄCHE<br>[m <sup>2</sup> ] | BAUSTOFF                   | DICKE<br>[mm] | NUTZUNGS-<br>DAUER [A] | LEBENSZYKLUS-<br>STADIEN |
|----------------------------------|-----------------------------|----------------------------|---------------|------------------------|--------------------------|
| Erweiterung In-<br>nenwände 2.OG | 6                           | Gipskartonplatte           | 12,5          | 50                     | A1-A3, B4,<br>C3, C4, D  |
|                                  |                             | Dämmung (Steinwolle, 92 %) | 250           | 50                     |                          |
|                                  |                             | Holz-UK (8 %)              | 250           | 50                     |                          |
|                                  |                             | Gipskartonplatte           | 12,5          | 50                     |                          |

| BAUTEIL              | FLÄCHE<br>[m <sup>2</sup> ] | BAUSTOFF                   | DICKE<br>[mm] | NUTZUNGS-<br>DAUER [A] | LEBENSZYKLUS-<br>STADIEN |
|----------------------|-----------------------------|----------------------------|---------------|------------------------|--------------------------|
| Innenwän-<br>de 3.OG | 22                          | Gipskartonplatte           | 12,5          | 50                     | A1-A3, B4,<br>C3, C4, D  |
|                      |                             | Dämmung (Steinwolle, 92 %) | 150           | 50                     |                          |
|                      |                             | Holz-UK (8 %)              | 150           | 50                     |                          |
|                      |                             | Gipskartonplatte           | 12,5          | 50                     |                          |

### KG 342 Nichttragende Innenwände

| BAUTEIL              | FLÄCHE<br>[m <sup>2</sup> ] | BAUSTOFF                   | DICKE<br>[mm] | NUTZUNGS-<br>DAUER [A] | LEBENSZYKLUS-<br>STADIEN |
|----------------------|-----------------------------|----------------------------|---------------|------------------------|--------------------------|
| Innenwän-<br>de 3.OG | 235                         | Gipskartonplatte           | 12,5          | 50                     | A1-A3, B4,<br>C3, C4, D  |
|                      |                             | Dämmung (Steinwolle, 92 %) | 100           | 50                     |                          |
|                      |                             | Holz-UK (8 %)              | 100           | 50                     |                          |
|                      |                             | Gipskartonplatte           | 12,5          | 50                     |                          |

### KG 344 Innentüren

| BAUTEIL    | AN-ZAHL | BAUSTOFF                | NUTZUNGSDAUER [A] | LEBENSZYKLUSSTADIEN  |
|------------|---------|-------------------------|-------------------|----------------------|
| Innentüren | 28      | Holz und Holzwerkstoffe | 50                | A1-A3, B4, C3, C4, D |

### KG 351 Deckenkonstruktionen

| BAUTEIL        | AN-ZAHL | BAUSTOFF       | DICKE [mm] | NUTZUNGSDAUER [A] | LEBENSZYKLUSSTADIEN  |
|----------------|---------|----------------|------------|-------------------|----------------------|
| Treppenstufen  | 32      | Brettsper Holz | 20         | 50                | A1-A3, B4, C3, C4, D |
| Treppen-Podest | 2       | Brettsper Holz | 140        | 50                |                      |
| Laufplatte     | 2       | Brettsper Holz | 180        | 50                |                      |

| BAUTEIL       | FLÄCHE [m <sup>2</sup> ] | BAUSTOFF       | DICKE [mm] | NUTZUNGSDAUER [A] | LEBENSZYKLUSSTADIEN  |
|---------------|--------------------------|----------------|------------|-------------------|----------------------|
| Decke 2./3.OG | 262                      | Brettsper Holz | 140        | 50                | A1-A3, B4, C3, C4, D |

### KG 353 Deckenbekleidungen

| BAUTEIL     | FLÄCHE [m <sup>2</sup> ] | BAUSTOFF             | DICKE [mm] | NUTZUNGSDAUER [A] | LEBENSZYKLUSSTADIEN  |
|-------------|--------------------------|----------------------|------------|-------------------|----------------------|
| Kellerdecke | 220                      | Leichtmauermörtel    | 5          | 50                | A1-A3, B4, C3, C4, D |
|             |                          | Dämmung (Steinwolle) | 50         | 50                |                      |

| BAUTEIL       | FLÄCHE [m <sup>2</sup> ] | BAUSTOFF           | DICKE [mm] | NUTZUNGSDAUER [A] | LEBENSZYKLUSSTADIEN  |
|---------------|--------------------------|--------------------|------------|-------------------|----------------------|
| Decke 1./2.OG | 262                      | Trittschalldämmung | 40         | 50                | A1-A3, B4, C3, C4, D |
|               |                          | Abdichtung         | 0,2        | 50                |                      |
|               |                          | Zementestrich      | 60         | 50                |                      |
|               |                          | Stabparkett        | 10         | 50                |                      |

| BAUTEIL       | FLÄCHE<br>[m <sup>2</sup> ] | BAUSTOFF           | DICKE<br>[mm] | NUTZUNGS-<br>DAUER [A] | LEBENSZYKLUS-<br>STADIEN |
|---------------|-----------------------------|--------------------|---------------|------------------------|--------------------------|
| Decke 2./3.OG | 262                         | Schüttung (Sand)   | 90            | 50                     | A1-A3, B4,<br>C3, C4, D  |
|               |                             | Trittschalldämmung | 40            | 50                     |                          |
|               |                             | Abdichtung         | 0,2           | 50                     |                          |
|               |                             | Zementestrich      | 60            | 50                     |                          |
|               |                             | Stabparkett        | 10            | 50                     |                          |

#### KG 361 Dachkonstruktionen

| BAUTEIL   | FLÄCHE<br>[m <sup>2</sup> ] | BAUSTOFF                   | DICKE<br>[mm] | NUTZUNGS-<br>DAUER [A] | LEBENSZYKLUS-<br>STADIEN |
|---|-----------------------------|----------------------------|---------------|------------------------|--------------------------|
| Dach<br>(PV-Module<br>werden in KG 400<br>berücksichtigt) | 327                         | Gipskartonplatte           | 12,5          | 50                     | A1-A3, B4,<br>C3, C4, D  |
|   |                             | Dämmung (Steinwolle, 92 %) | 30            | 50                     |                          |
|   |                             | Holz-UK (8 %)              | 30            | 50                     |                          |
|   |                             | Dampfbremse (PE)           | 0,2           | 40                     |                          |
|   |                             | OSB-Platte                 | 12            | 50                     |                          |
|   |                             | Dämmung (Steinwolle, 86 %) | 240           | 50                     |                          |
|   |                             | Sparren (14 %)             | 240           | 50                     |                          |
|   |                             | Unterspannbahn (PP)        | 0,2           | 30                     |                          |
|   |                             | Holz-UK (8 %)              | 30            | 50                     |                          |

| BAUTEIL     | FLÄCHE<br>[m <sup>2</sup> ] | BAUSTOFF             | DICKE<br>[mm] | NUTZUNGS-<br>DAUER [A] | LEBENSZYKLUS-<br>STADIEN |
|-------------|-----------------------------|----------------------|---------------|------------------------|--------------------------|
| Gauben-Dach | 104                         | Brettsperrholz       | 140           | 50                     | A1-A3, B4,<br>C3, C4, D  |
|             |                             | Dampfbremse (PE)     | 0,2           | 40                     |                          |
|             |                             | Dämmung (Steinwolle) | 240           | 50                     |                          |
|             |                             | Unterspannbahn (PP)  | 0,2           | 30                     |                          |
|             |                             | Holz-UK (8 %)        | 30            | 50                     |                          |
|             |                             | Kupfer               | 5             | 50                     |                          |

### 362 Dachfenster

| BAUTEIL             | MAßE [m]    | ANZAHL | BAUSTOFF                              | NUTZUNGS-DAUER [A] | LEBENS-ZYKLUS-STADIEN |
|---------------------|-------------|--------|---------------------------------------|--------------------|-----------------------|
| Dachflächen-Fenster | 0,78 x 1,62 | 2      | Rahmen: PVC (53 %)                    | 40                 | A1-A3, B4, C3, C4, D  |
|                     |             |        | Verglasung: 2fach Iso-lierglas (47 %) | 30                 |                       |
|                     |             |        | Fugendichtband PE-/PP-Folie           | 40                 |                       |
|                     |             |        | Fensterbeschlag                       | 25                 |                       |

| BAUTEIL     | MAßE [m]  | ANZAHL | BAUSTOFF                                | NUTZUNGS-DAUER [A] | LEBENS-ZYKLUS-STADIEN |
|-------------|-----------|--------|---|--------------------|-----------------------|
| Lichtkuppel | 0,6 x 0,9 | 4      | Rahmen: PVC (63,3 %)                    | 40                 | A1-A3, B4, C3, C4, D  |
|             |           |        | Verglasung: 2fach Iso-lierglas (36,7 %) | 30                 |                       |
|             |           |        | Fugendichtband PE-/PP-Folie             | 40                 |                       |
|             |           |        | Fensterbeschlag                         | 25                 |                       |

### Technische Anlagen

#### KG 421 Wärmeerzeugungsanlagen

| BEZEICHNUNG            | MENGE | EINHEIT | NUTZUNGS-DAUER [A] | LEBENSZYKLUS-STADIEN |
|------------------------|-------|---------|--------------------|----------------------|
| Luft-Wasser-Wärmepumpe | 1     | Stück   | 18                 | A1-A3, B4, C3, C4, D |

| BEZEICHNUNG               | MENGE | EINHEIT | NUTZUNGS-DAUER [A] | LEBENSZYKLUS-STADIEN |
|---------------------------|-------|---------|--------------------|----------------------|
| Pufferspeicher, Edelstahl | 164,8 | kg      | 20                 | A1-A3, B4, C3, C4, D |

| BEZEICHNUNG                        | MENGE | EINHEIT | NUTZUNGS-DAUER [A] | LEBENSZYKLUS-STADIEN |
|------------------------------------|-------|---------|--------------------|----------------------|
| Frischwasserstationen <sup>1</sup> | 16    | Stück   | 18                 | A1-A3, B4, C3, C4, D |

<sup>1</sup> Datensatz für 1 Strom-Wärmepumpe (Wasser-Wasser) 10 kW

---

---

*KG 423 Raumheizflächen*

| BEZEICHNUNG                | MENGE | EINHEIT | NUTZUNGS-<br>DAUER [A] | LEBENSZYKLUS-<br>STADIEN |
|----------------------------|-------|---------|------------------------|--------------------------|
| Niedertemperaturheizkörper | 32    | Stück   | 30                     | A1-A3, B4,<br>C3, C4, D  |

| BEZEICHNUNG     | MENGE | EINHEIT        | NUTZUNGS-<br>DAUER [A] | LEBENSZYKLUS-<br>STADIEN |
|-----------------|-------|----------------|------------------------|--------------------------|
| Fußbodenheizung | 414   | m <sup>2</sup> | 50                     | A1-A3, B4,<br>C3, C4, D  |

*KG 431 Lüftungsanlagen*

| BEZEICHNUNG       | MENGE | EINHEIT | NUTZUNGS-<br>DAUER [A] | LEBENSZYKLUS-<br>STADIEN |
|-------------------|-------|---------|------------------------|--------------------------|
| Lüfter, dezentral | 64    | Stück   | 12                     | A1-A3, B4,<br>C3, C4, D  |

*KG 442 Eigenstromversorgungsanlagen*

| BEZEICHNUNG              | MENGE | EINHEIT        | NUTZUNGS-<br>DAUER [A] | LEBENSZYKLUS-<br>STADIEN |
|--------------------------|-------|----------------|------------------------|--------------------------|
| PV-Anlage (Dach+Fassade) | 600   | m <sup>2</sup> | 20                     | A1-A3, B4,<br>C3, C4, D  |

## 4.5.2. Wirkungsabschätzung

| LEBENSZYKLUSANALYSE                             |                         |                                | Treibhaus-<br>potenzial   | Ozonschicht-<br>abbau-<br>potenzial                | Ozonbildungs-<br>potenzial                           | Versauerungs-<br>potenzial                                      | Überdüngungs-<br>potenzial                                      | Nicht<br>erneuerbarer<br>Primärenergie-<br>bedarf | Erneuerbarer<br>Primärenergie-<br>bedarf   | Gesamt-<br>Primärenergie-<br>bedarf        |
|---|-------------------------|--------------------------------|---|--|--|---|---|---|--|--|
| Effizienzhaus Plus<br>Aufstockung und Sanierung |                         |                                | GWP   | ODP  | POCP   | AP  | EP  | PENRT   | PERT                                       | PET  |
|   |                         |                                | [kg CO <sub>2</sub> -Äq./<br>(m <sup>2</sup> <sub>GGF</sub> a)] | [kg R11-Äq./<br>(m <sup>2</sup> <sub>GGF</sub> a)] | [kg Ethen-Äq./<br>(m <sup>2</sup> <sub>GGF</sub> a)] | [kg SO <sub>2</sub> -Äq./<br>(m <sup>2</sup> <sub>GGF</sub> a)] | [kg PO <sub>4</sub> -Äq./<br>(m <sup>2</sup> <sub>GGF</sub> a)] | [MJ/<br>(m <sup>2</sup> <sub>GGF</sub> a)]        | [MJ/<br>(m <sup>2</sup> <sub>GGF</sub> a)] | [MJ/<br>(m <sup>2</sup> <sub>GGF</sub> a)] |
| Gesamter Lebenszyklus A-D                       |                         |                                | -4,70E+00   | 7,81E-09   | 2,79E-03   | 1,05E-02  | 1,41E-03  | -6,18E+01   | 5,00E+01                                   | -1,18E+01                                  |
| Herstellung                                     | A1                      | Rohstoffgewinnung              |   |  |  |   |   |   |  |  |
|   | A2                      | Transport zum Hersteller       | 2,12E+00  | 1,20E-07   | 2,16E-03   | 1,69E-02  | 2,50E-03  | 6,10E+01  | 4,16E+01                                   | 1,03E+02                                   |
|   | A3                      | Herstellung                    |   |  |  |   |   |   |  |  |
|   | A1-A3                   | KG 330 Außenwände              | 3,68E-01  | 3,78E-08   | 5,14E-04   | 4,11E-03  | 6,10E-04  | 1,37E+01  | 7,91E+00                                   | 2,16E+01                                   |
|   | A1-A3                   | KG 340 Innenwände und -türen   | -1,70E-01   | 1,98E-08   | 1,10E-04   | 7,57E-04  | 7,57E-04  | 3,46E+00  | 5,37E+00                                   | 8,83E+00                                   |
|   | A1-A3                   | KG 350 Decken                  | -2,44E-01   | 1,84E-08   | 2,06E-04   | 1,21E-03  | 2,07E-04  | 4,28E+00  | 1,20E+01                                   | 1,63E+01                                   |
|   | A1-A3                   | KG 360 Dächer                  | -5,03E-02   | 2,34E-08   | 1,93E-04   | 2,57E-03  | 2,62E-04  | 5,79E+00  | 6,34E+00                                   | 1,21E+01                                   |
|   | A1-A3                   | KG 420 Wärmeversorgungsanlagen | 1,37E-01  | 1,97E-08   | 6,13E-05   | 4,06E-04  | 4,28E-05  | 2,54E+00  | 1,08E-01                                   | 2,65E+00                                   |
|   | A1-A3                   | KG 430 Lufttechnische Anlagen  | 2,82E-02  | 5,73E-12   | 9,61E-06   | 1,33E-04  | 9,44E-06  | 4,52E-01  | 6,06E-02                                   | 5,13E-01                                   |
| A1-A3   | KG 440 Starkstromanlage | 2,06E+00                       | 4,81E-10  | 1,07E-03   | 7,71E-03   | 6,11E-04  | 3,08E+01  | 9,84E+00  | 4,07E+01                                   |  |
| Nutzung   | B2                      | Instandhaltung                 |   |  |  |   |   |   |  |  |
|   | B6                      | Energieverbrauch im Betrieb    | 2,13E+01  | 4,36E-08   | 4,34E-03   | 4,32E-02  | 5,02E-03  | 2,94E+02  | 1,42E+02                                   | 4,36E+02                                   |
|   | B2                      | KG 330 Außenwände              | 4,53E-01  | 1,62E-09   | 2,53E-04   | 1,38E-03  | 2,10E-04  | 4,96E+00  | 2,83E-01                                   | 5,25E+00                                   |
|   | B2                      | KG 340 Innenwände und -türen   | 0,00E+00  | 0,00E+00   | 0,00E+00   | 0,00E+00  | 0,00E+00  | 0,00E+00  | 0,00E+00                                   | 0,00E+00                                   |
|   | B2                      | KG 350 Decken                  | 0,00E+00  | 0,00E+00   | 0,00E+00   | 0,00E+00  | 0,00E+00  | 0,00E+00  | 0,00E+00                                   | 0,00E+00                                   |
|   | B2                      | KG 360 Dächer                  | 5,91E-02  | 1,41E-12   | 2,67E-05   | 3,69E-04  | 1,28E-05  | 8,06E-01  | 1,34E-02                                   | 8,19E-01                                   |
|   | B2                      | KG 420 Wärmeversorgungsanlagen | 8,53E-02  | 3,95E-08   | 3,68E-05   | 2,78E-04  | 3,54E-05  | 1,29E+00  | 9,28E-02                                   | 1,38E+00                                   |
|   | B2                      | KG 430 Lufttechnische Anlagen  | 4,40E-02  | 4,64E-12   | 1,34E-05   | 1,84E-04  | 1,33E-05  | 6,10E-01  | 5,16E-02                                   | 6,62E-01                                   |
|   | B2                      | KG 440 Starkstromanlage        | 3,66E+00  | 8,21E-10   | 1,92E-03   | 1,31E-02  | 1,11E-03  | 5,45E+01  | 1,85E+01                                   | 7,29E+01                                   |
|   | B6                      | Strombedarf                    | 2,26E+00  | 2,26E-10   | 2,78E-04   | 3,71E-03  | 4,84E-04  | 3,09E+01  | 6,72E+01                                   | 9,81E+01                                   |
| B6  | Strombedarf Nutzerstrom | 1,47E+01                       | 1,48E-09  | 1,81E-03   | 2,42E-02   | 3,15E-03  | 2,01E+02  | 5,54E+01  | 2,57E+02                                   |  |
| Entsorgung                                      | C3                      | Abfallverwertung               |   |  |  |   |   |   |  |  |
|   | C4                      | Entsorgung                     | 2,16E+00  | 2,81E-09   | 5,78E-05   | 5,42E-04  | 2,37E-04  | 1,37E+00  | -1,60E+01                                  | -1,46E+01                                  |
|   | C3-C4                   | KG 330 Außenwände              | 5,95E-01  | 5,22E-10   | 1,34E-05   | 8,71E-05  | 9,43E-05  | 1,62E-01  | -3,36E+00                                  | -3,20E+00                                  |
|   | C3-C4                   | KG 340 Innenwände und -türen   | 3,15E-01  | 7,96E-10   | 2,51E-06   | 1,54E-05  | 1,41E-05  | 7,66E-02  | -2,70E+00                                  | -2,62E+00                                  |
|   | C3-C4                   | KG 350 Decken                  | 6,11E-01  | 7,90E-10   | 1,22E-05   | 1,03E-04  | 3,29E-05  | 2,87E-01  | -5,29E+00                                  | -5,01E+00                                  |
|   | C3-C4                   | KG 360 Dächer                  | 4,72E-01  | 7,01E-10   | 4,94E-06   | 2,30E-05  | 4,07E-05  | 5,08E-02  | -4,72E+00                                  | -4,67E+00                                  |
|   | C3-C4                   | KG 420 Wärmeversorgungsanlagen | 4,47E-02  | 2,86E-14   | 4,24E-07   | 4,41E-06  | 7,59E-07  | 8,58E-03  | 1,13E-03                                   | 9,70E-03                                   |
|   | C3-C4                   | KG 430 Lufttechnische Anlagen  | 4,77E-03  | 2,39E-15   | 5,55E-08   | 4,10E-07  | 1,26E-07  | 8,13E-04  | 9,37E-05                                   | 9,07E-04                                   |
| C3-C4   | KG 440 Starkstromanlage | 1,21E-01                       | 2,86E-12  | 2,43E-05   | 3,09E-04   | 5,46E-05  | 7,85E-01  | 1,07E-01  | 8,92E-01                                   |  |
| Gutschriften                                    | D                       | Gutschriften                   | -3,03E+01   | -1,58E-07  | -3,77E-03  | -5,01E-02   | -6,35E-03   | -4,18E+02   | -1,17E+02                                  | -5,35E+02                                  |
|   | D                       | KG 330 Außenwände              | -3,07E-01   | -3,12E-08  | -1,89E-05  | -3,09E-04   | -1,98E-05   | -5,73E+00   | -2,91E+00                                  | -8,65E+00                                  |
|   | D                       | KG 340 Innenwände und -türen   | -1,38E-01   | -3,20E-08  | -1,03E-05  | -1,45E-04   | -1,10E-06   | -2,89E+00   | -7,41E-01                                  | -3,63E+00                                  |
|   | D                       | KG 350 Decken                  | -2,69E-01   | -5,27E-08  | -2,08E-05  | -2,83E-04   | -8,65E-06   | -5,28E+00   | -9,53E-01                                  | -6,23E+00                                  |
|   | D                       | KG 360 Dächer                  | -2,29E-01   | -3,94E-08  | -1,03E-05  | -2,18E-04   | -4,06E-06   | -4,35E+00   | -2,94E+00                                  | -7,29E+00                                  |
|   | D                       | KG 420 Wärmeversorgungsanlagen | -5,29E-02   | -1,25E-12  | -2,06E-05  | -1,58E-04   | -1,44E-05   | -6,12E-01   | -3,91E-02                                  | -6,51E-01                                  |
|   | D                       | KG 430 Lufttechnische Anlagen  | -1,09E-02   | -3,41E-12  | -2,99E-06  | -4,15E-05   | -2,94E-06   | -1,48E-01   | -3,49E-02                                  | -1,83E-01                                  |
|   | D                       | KG 440 Starkstromanlage        | -3,45E-01   | -7,29E-11  | -1,29E-04  | -1,48E-03   | -1,10E-04   | -4,36E+00   | -7,17E-01                                  | -5,08E+00                                  |
|   | D                       | Gutschrift: Strom aus PV       | -2,89E+01   | -2,90E-09  | -3,56E-03  | -4,74E-02   | -6,19E-03   | -3,95E+02   | -1,09E+02                                  | -5,04E+02                                  |

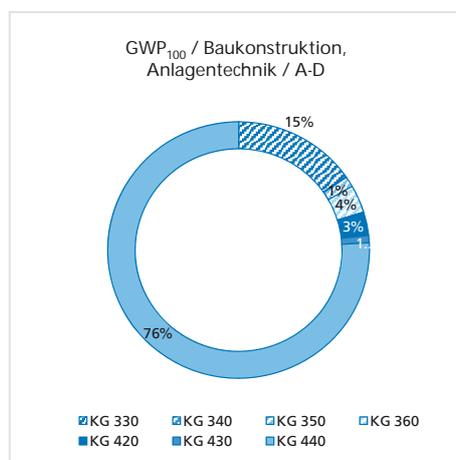
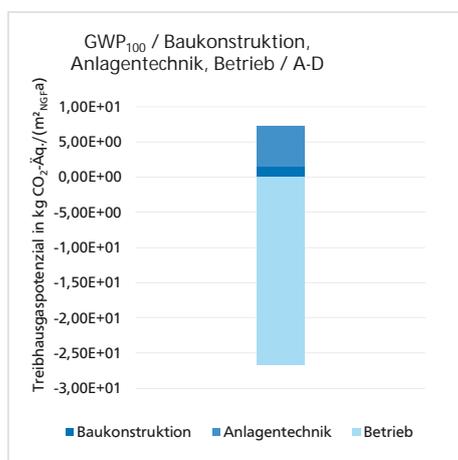
Tab. 15: Wirkungsabschätzung der Aufstockung und Sanierung zum Effizienzhaus Plus

### Treibhauspotenzial GWP<sub>100</sub>

Das Diagramm in Abb. 131 verdeutlicht, dass die verursachten Treibhausemissionen des aufgestockten und zum Effizienzhaus Plus sanierten Gebäudes hauptsächlich auf die Anlagentechnik zurückzuführen sind. Der Vorteil des Standards zeigt sich im Betrieb: Die Emissionen für Baukonstruktion, Anlagentechnik sowie für den Betrieb können durch die Gutschrift des erneuerbar gewonnenen Stroms der PV-Anlage im Lebenszyklus mehrfach ausgeglichen werden. Insgesamt ergibt sich ein Treibhauspotenzial von  $-19 \text{ kg CO}_2 / (\text{m}^2_{\text{NGF}} \cdot \text{a})$ . Im Ringdiagramm in Abb. 132 geht der hohe Anteil des Treibhauspotenzials der Anlagentechnik mit 80 % im Vergleich zur Baukonstruktion mit 10 % klar hervor. Allein Dreiviertel der Emissionen gehen auf die Photovoltaikanlage zurück. Das Treibhauspotenzial der Baukonstruktion ist dem erhöhten Dämmstandard sowie den Fenstern zuzuschreiben.

Abb. 131: Gesamtwirkungsabschätzung GWP<sub>100</sub>

Abb. 132: Verteilung GWP<sub>100</sub> Baukonstruktion und Anlagentechnik



Bei Betrachtung der verschiedenen Lebenszyklusstadien in Abb. 133 wird erneut der enorme Einfluss der PV-Anlage deutlich. Sie muss zweimal im Betrachtungszeitraum ausgetauscht werden, was zu zusätzlichen Emissionen in der Nutzungsphase führt. Bezüglich der Baukonstruktion zeichnet sich der positive Einfluss durch den Einsatz nachwachsender Rohstoffe ab. CO<sub>2</sub> wird in Holz gebunden und kann somit einen Teil der Treibhausemissionen für Herstellung, Nutzung und Entsorgung wieder ausgleichen.

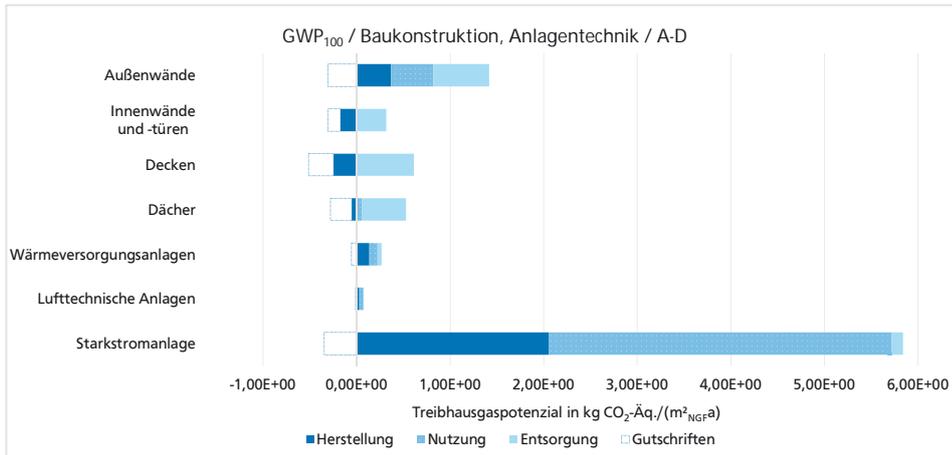


Abb. 133: Verteilung GWP<sub>100</sub> nach Phasen und Gruppen

### Eutrophierungspotenzial EP

Die Diagramme in Abb. 134 und Abb. 135 verdeutlichen, dass das Eutrophierungspotenzial zu etwa gleichen Teilen auf Baukonstruktion und Anlagentechnik verteilt ist. Die Gutschrift durch den regenerativ gewonnenen Strom im Betrieb kann das Potenzial im Betrachtungszeitraum ausgleichen. Insgesamt kann ein Eutrophierungspotenzial von  $-174E-03 \text{ kg PO}_4\text{-Äq./.(m}^2_{\text{NGF}}\text{a)}$  nachgewiesen werden.

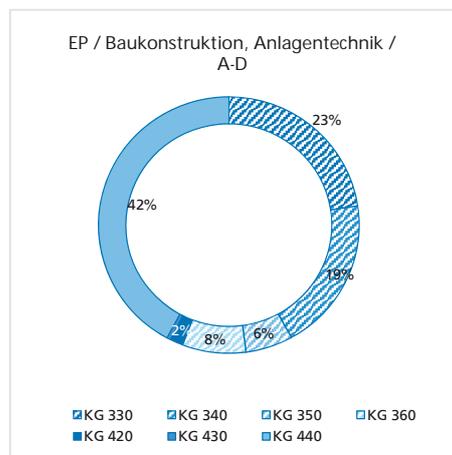
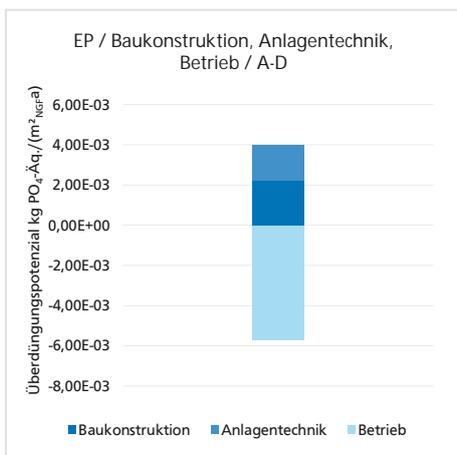


Abb. 134: Gesamtwirkungsabschätzung EP

Abb. 135: Verteilung EP Baukonstruktion und Anlagentechnik

Die Betrachtung im Lebenszyklus in Abb. 136 zeigt den Einfluss der Langlebigkeit von Baustoffen und technischen Anlagen deutlich. Im Gegensatz zu den Innen-

wänden und Innentüren werden sowohl die Fenster als auch die Photovoltaikanlage im Betrachtungszeitraum mindestens einmal ausgetauscht, was zu Umweltwirkungen in der Nutzungsphase führt.

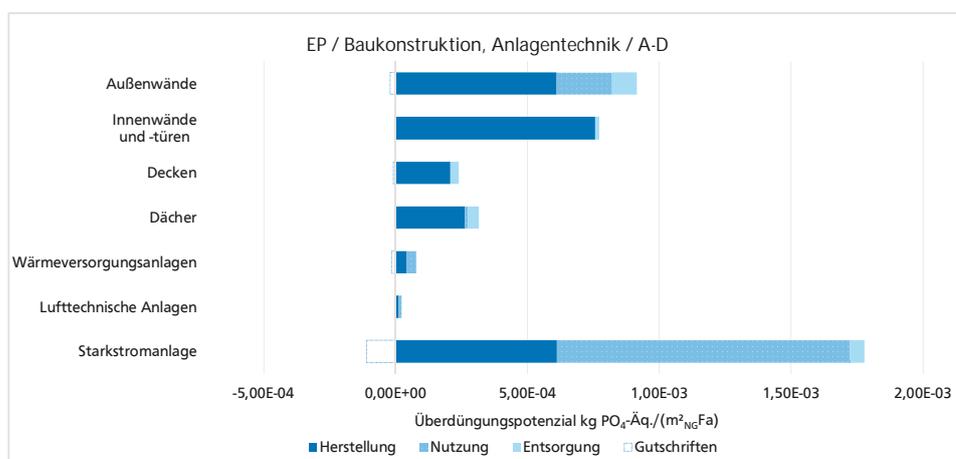


Abb. 136: Verteilung EP nach Phasen und Gruppen

### Photochemisches Oxidantienbildungspotenzial POCP

Die Diagramme in Abb. 137 und Abb. 138 zeigen noch deutlicher den Einfluss der Anlagentechnik. Durch die Gutschriften das Photochemische Oxidantienbildungspotenzial zumindest auf ein Minimum von  $9,72E-04$  kg Ethen-Äq./ $(m^2_{NGF}a)$  reduziert werden.

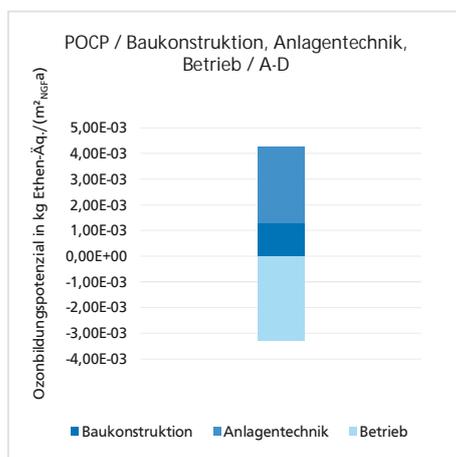
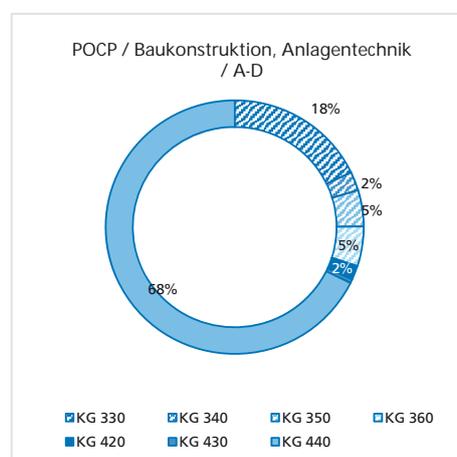


Abb. 137: Gesamtwirkungsabschätzung POCP

Abb. 138: Verteilung POCP Baukonstruktion und Anlagentechnik



Bei Betrachtung der verschiedenen Lebenszyklusstadien in Abb. 139 wird erneut der Einfluss der Langlebigkeit von Baustoffen und technischen Anlagen deutlich.

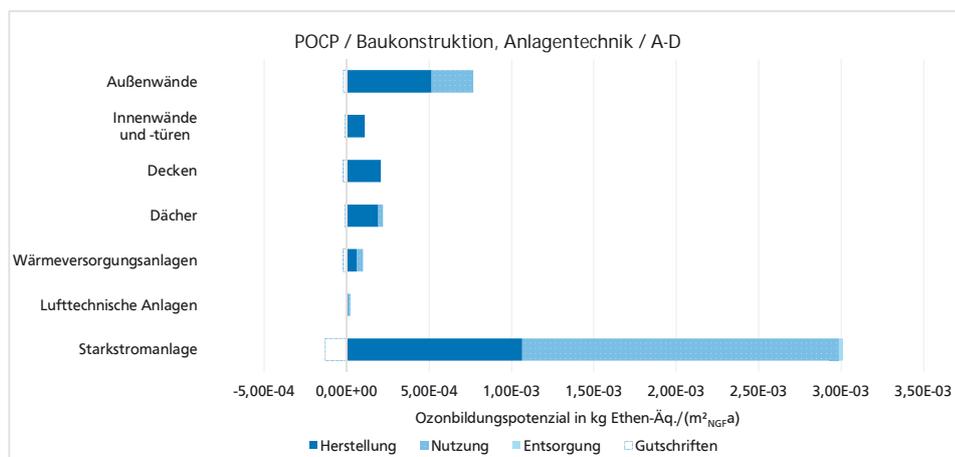


Abb. 139: Verteilung POCP nach Phasen und Gruppen

### Ozonabbaupotenzial ODP

Das Ozonabbaupotenzial beträgt  $6,33E-09 \text{ kg PO}_4\text{-Äq.}/(\text{m}^2_{\text{NGF}}\text{a})$ . An den Diagrammen in Abb. 140, Abb. 141 und Abb. 142 kann ein erheblicher Einfluss von Anlagentechnik und Baukonstruktion festgestellt werden. Die Umweltwirkungen können durch die Gutschriften der Baukonstruktion und der erneuerbaren Energie ausgeglichen werden. Der höchste Anteil beim Vergleich von Baukonstruktion und Anlagentechnik liegt hier erneut bei den Wärmeversorgungsanlagen - im speziellen bei den Frischwasserstationen, für die bislang kein entsprechender Datensatz verfügbar ist. Die Ergebnisse in diesem Bereich sind wie bereits erwähnt unter Vorbehalt zu betrachten. Bei Betrachtung der verschiedenen Lebenszyklusstadien in Abb. 142 zeichnet sich der Einfluss der Baustoffwahl ab. Allein durch die Gutschriften für die Holzkonstruktionen kann das Ozonabbaupotenzial der meisten Bauteile wieder ausgeglichen werden.



Abb. 140: Gesamtwirkungsabschätzung ODP

Abb. 141: Verteilung ODP Baukonstruktion und Anlagentechnik

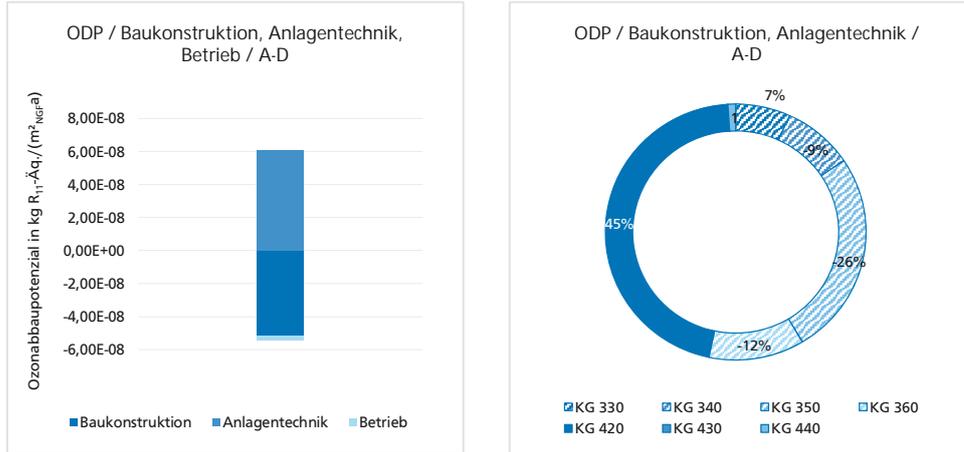
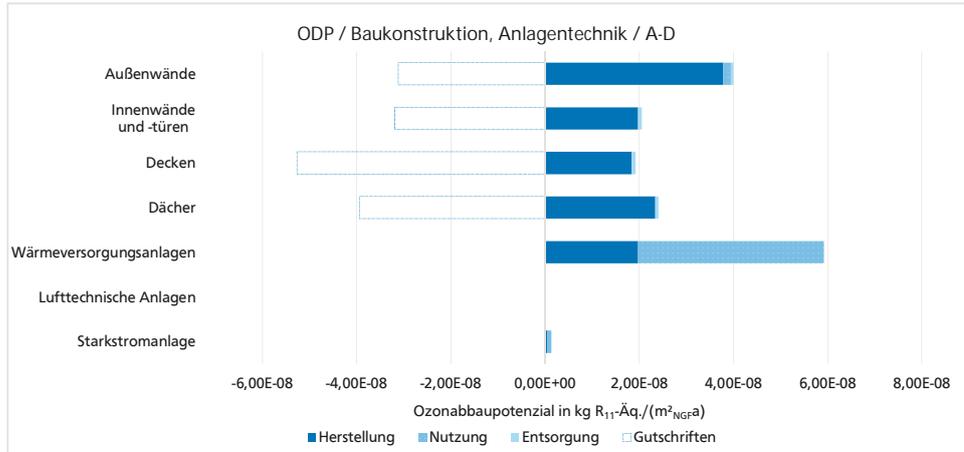


Abb. 142: Verteilung ODP nach Phasen und Gruppen



### Versauerungspotenzial AP

In den Untersuchungen wird ein Versauerungspotenzial in Höhe von  $-1,36E-02 \text{ kg SO}_2\text{-Äq.}/(\text{m}^2_{\text{NGF}}\cdot\text{a})$  nachgewiesen. Auch hier ist die Anlagentechnik für den Großteil verantwortlich (Abb. 143 bis Abb. 145). Das Versauerungspotenzial kann durch den auf erneuerbaren Energien basierenden Betrieb im Betrachtungszeitraum ausgeglichen werden (Abb. 143). Der Einfluss der Langlebigkeit der Anlagentechnik zeichnet sich in Abb. 145 ab. Die Photovoltaik-Anlage muss während des Betrachtungszeitraums zweimal ausgetauscht werden und führt dadurch zu Umweltwirkungen in der Nutzungsphase. Bei der Baukonstruktion fällt die Herstellungsphase aufgrund des Dämmstoffs Steinwolle stärker ins Gewicht.

Steinwolle hat zwar eine angesetzte Lebensdauer von 50 Jahren, verursacht aber allein in der Herstellung 0,6 kg/m<sup>3</sup> Schwefeldioxid. Im Vergleich dazu liegt das Versauerungspotenzial einer MDF-Platte bei 0,3 kg/m<sup>3</sup>.

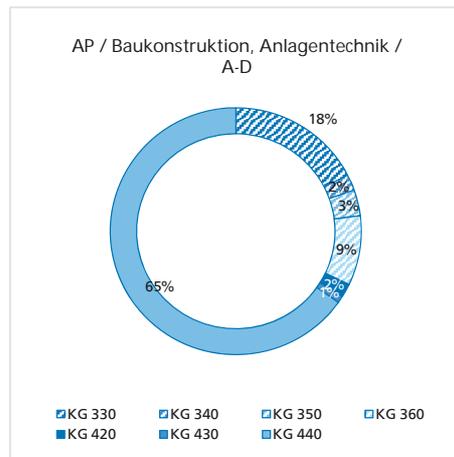
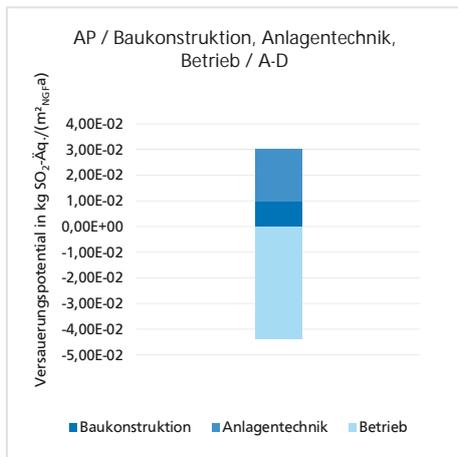


Abb. 143: Gesamtwirkungsabschätzung AP

Abb. 144: Verteilung AP Baukonstruktion und Anlagentechnik

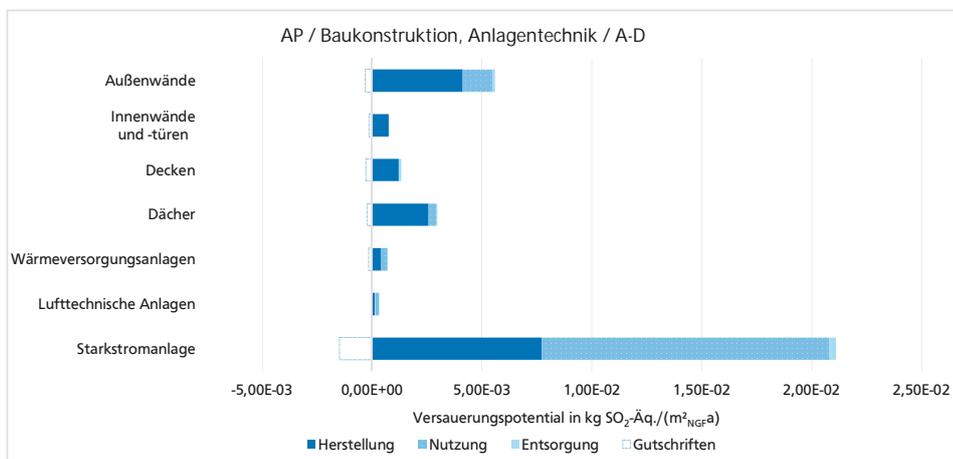


Abb. 145: Verteilung AP nach Phasen und Gruppen

### Gesamtprimärenergie PET

Die Diagramme in Abb. 146, Abb. 147 und Abb. 148 verdeutlichen erneut, dass der Gesamt-Primärenergiebedarf hauptsächlich auf die Anlagentechnik zurückzuführen ist. Die Gutschriften einiger Baustoffe sowie die Gutschriften des auf regenerativen Energien basierenden Betriebs können den notwendigen Gesamtprimärenergiebedarf ausgleichen. Er liegt bei -268 MJ/(m<sup>2</sup><sub>NGF</sub>·a). Das entspricht 74 kWh/(m<sup>2</sup><sub>NGF</sub>·a).

Abb. 146: Gesamtwirkungsabschätzung PET

Abb. 147: Verteilung PET Baukonstruktion und Anlagentechnik

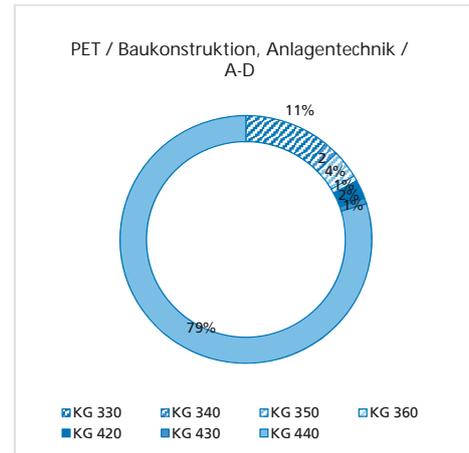
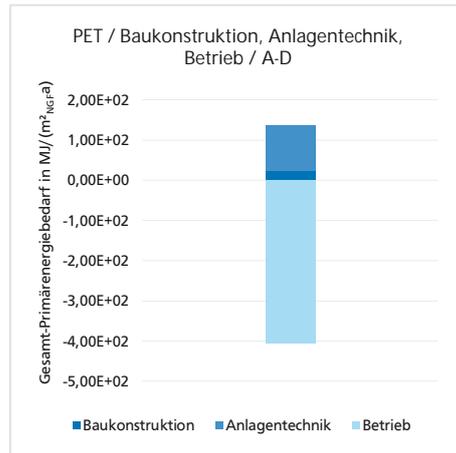
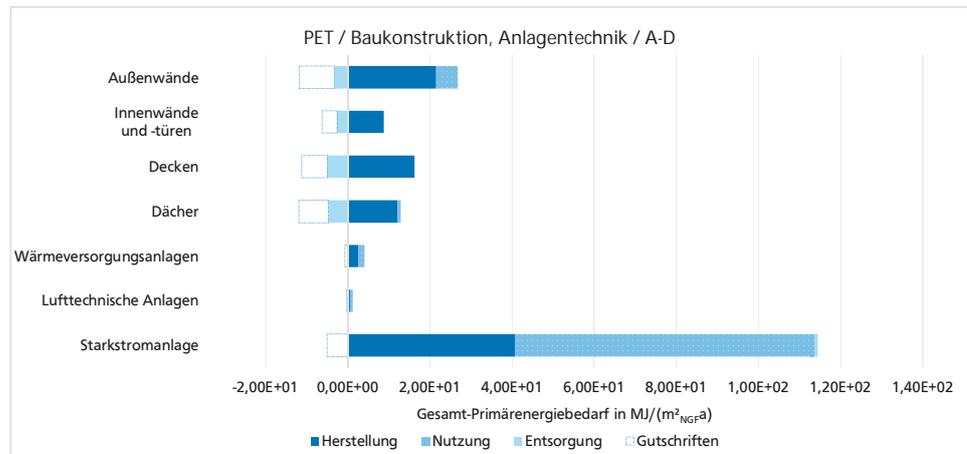


Abb. 148: Verteilung PET nach Phasen und Gruppen



### 4.5.3. Bewertung

Die Untersuchungen zeigen, dass die Umweltwirkungen des aufgestockten und zum Effizienzhaus Plus sanierten Gebäudes hauptsächlich durch die baulichen und anlagentechnischen Maßnahmen verursacht werden.

Bei Betrachtung der verschiedenen Lebenszyklusstadien wird der Einfluss der Konstruktions- und Baustoffwahl deutlich. Für die Fassadenbekleidung wird ein vorgehängtes hinterlüftetes System gewählt. Die Lebensdauer kann hier mit 50 Jahren angesetzt werden. Im Gegensatz zum WDVS muss hier die Bekleidung nicht innerhalb des Betrachtungszeitraums erneuert werden. Die zwei aufgestockten Geschosse werden in einer Holzrahmenbauweise ausgeführt. Der Vor-

---

teil des nachwachsenden Rohstoffs wird im Lebenszyklus sichtbar: CO<sub>2</sub> wird beispielsweise in Holz gebunden und kann somit einen Teil der Treibhausemissionen für Herstellung, Nutzung und Entsorgung wieder ausgleichen. Im Gegensatz zu den meisten konventionellen Bauvorhaben werden die bestehenden Wände des ehemaligen Dachgeschosses weitestgehend weitergenutzt, sodass lediglich die Erweiterung um die fehlenden Teilstücke bei den Giebelwänden in die Bilanzierung einfließt. Dadurch kann in diesem Geschoss fast vollständig auf die Herstellung neuer Innenwände verzichtet werden.

Die Anlagentechnik beansprucht auch in diesem Szenario, ähnlich der Sanierung zum Effizienzhaus Plus, den größten Anteil der potenziellen Umweltwirkungen. Auch hier kann die Photovoltaikanlage als Hauptverursacher identifiziert werden. Der gesamte Herstellungsprozess von der Gewinnung von Silizium aus Quarzsand bis Herstellung der Solarzelle und dem fertigen PV-Modul ist heute noch sehr aufwendig. Nicht unerheblich sind auch die Umweltwirkungen aus der gläsernen Frontscheibe eines jeden Moduls. Sowohl die Automatisierung als auch der Wirkungsgrad der Module werden stetig verbessert, wodurch auch von einer positiven Entwicklung der umweltbezogenen Qualität ausgegangen werden kann.

Die PV-Anlage ist notwendig, um die geforderten negativen end- und primärenergetisch Jahresnettoenergiebilanzen für den Effizienzhaus Plus-Standard zu erreichen. Der Vorteil des Standards zeigt sich im Betrieb. Die PV-Anlage erzeugt mehr Energie als das Gebäude im Jahr benötigt. Durch diesen auf erneuerbaren Energien basierenden Betrieb können die potenziellen Umweltwirkungen mehr als ausgeglichen werden.



---

## 5. Ökonomische Untersuchung im Lebenszyklus

# Ökonomischer Lebenszyklus

---

Energetische Weiterentwicklungen im Gebäudebestand sind häufig mit umfangreichen Investitionen verbunden und sollen unter anderem zu einer Reduktion der zukünftigen Auszahlungen führen. Gleichzeitig lösen sie noch weitere – nicht monetär erfassbare – Vorteile aus. Eine erhöhte Unabhängigkeit von Energieimporten und -preisen sowie mehr Komfort und Behaglichkeit stellen hier nur einige Beispiele dar.

Gleichwohl handelt es sich um langfristige Investitionsentscheidungen. Für Investoren und Bauherrn ist es von Bedeutung zu wissen, ob und wann sich eine energetische Weiterentwicklung amortisiert. Die ökonomische Vorteilhaftigkeit verschiedener Alternativen steht im Fokus der Investitionsentscheidung. Im vorliegenden Kapitel wird die ökonomische Vorteilhaftigkeit der entwickelten Szenarien im Lebenszyklus untersucht und bewertet.

---

## 5.1 Grundlagen und Randbedingungen

---

### 5.1.1. Wissenschaftliche Methode

Die ökonomische Vorteilhaftigkeit wird anhand der dynamischen Kapitalwertmethode untersucht. Bei der Kapitalwertmethode wird der Gegenwartswert einer Investition betrachtet. Die zu unterschiedlichen Zeitpunkten anfallenden Zahlungen werden unter Verwendung der Zinseszinsrechnung auf einen gemeinsamen Vergleichspunkt bezogen. Damit soll festgestellt werden, ob sich die Investition lohnt oder das Geld vorzugsweise bei der Bank zu einem festen Kalkulationszinssatz (sogenannter „Zinsfuß“) angelegt werden soll.

Im ersten Schritt werden die Endwerte der Zahlungen durch Aufzinsung (Askontierung) ermittelt (Abb. 149). Sie drücken den Wert der Zahlung zu einem späteren Zeitpunkt aus.

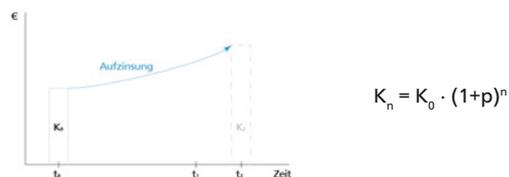


Abb. 149: Prinzip der Askontierung/Aufzinsung

Auf dieser Grundlage werden im zweiten Schritt die Kapital- oder Barwerte der Zahlungen durch Abzinsung (Diskontierung) mit dem festzulegenden Kalkulationszinssatz ermittelt (Abb. 150). Sie drücken den gegenwärtigen Wert der zukünftigen Zahlung aus.

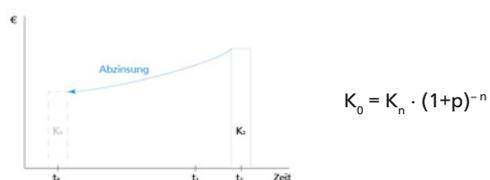


Abb. 150: Prinzip der Diskontierung/Abzinsung

$K_0$  - Anfangswert  
zum Zeitpunkt 0

$K_n$  - Endwert  
zum Zeitpunkt n

p - Zinssatz  
Preissteigerung

n - Zeit in Jahren

---

Im Unterschied zu weniger aufwendigen statischen Verfahren, werden bei der Kapitalwertmethode die zeitliche Abfolge der Zahlungen und Randbedingungen sowie Zinseffekte berücksichtigt. Daraus ergibt sich eine enge Verknüpfung der Aussagekraft mit der vorhandenen Datenbasis und den gewählten Randbedingungen.

Auf dieser Basis werden ökonomische Wirkungsindikatoren untersucht und abschließend bewertet.

### 5.1.2. Untersuchungsrahmen

#### Zahlungen

##### *Auszahlungen*

Abb. 151 zeigt die berücksichtigten Herstellungs- und Nutzungskosten. Die Auszahlungen setzen sich aus den Aufwendungen zur Herstellung der Szenarios und zur Nutzung der Gebäude zusammen. Zur Ermittlung der Anfangsinvestition ist eine Zusammenstellung der Baukosten nach Kostengruppen 300 und 400 gemäß DIN 276 erforderlich.

Dabei ist das sogenannte Kopplungsprinzip zu beachten. Nach aktueller Energieeinsparung sind energieeinsparende Maßnahmen an der Gebäudehülle nur bei umfangreicheren Vorhaben, wenn mehr als 10 % der Bauteilfläche betroffen sind, durchzuführen. Dazu zählt bei Außenwänden beispielsweise die Erneuerung des Außenputzes. Werden Bauteile (zum Beispiel Fenster) ausgetauscht, so sind ebenfalls die Anforderungen der aktuellen Energieeinsparung, unter Wahrung des Wirtschaftlichkeitsgebots, einzuhalten.

Dadurch ergibt sich eine Differenzierung der Baukosten in Sowieso-Kosten und energiebedingte Mehrkosten. Bei der nachträglichen Dämmung einer Fassade gehören beispielsweise die Kosten für das Gerüst zu den Sowieso-Kosten. Die Kosten für die Dämmung werden den energiebedingten Mehrkosten zugeordnet. Die Nutzungskosten setzen sich gemäß DIN 18960 aus den Instandsetzungskosten und den Kosten für den Betrieb des Gebäudes zusammen.

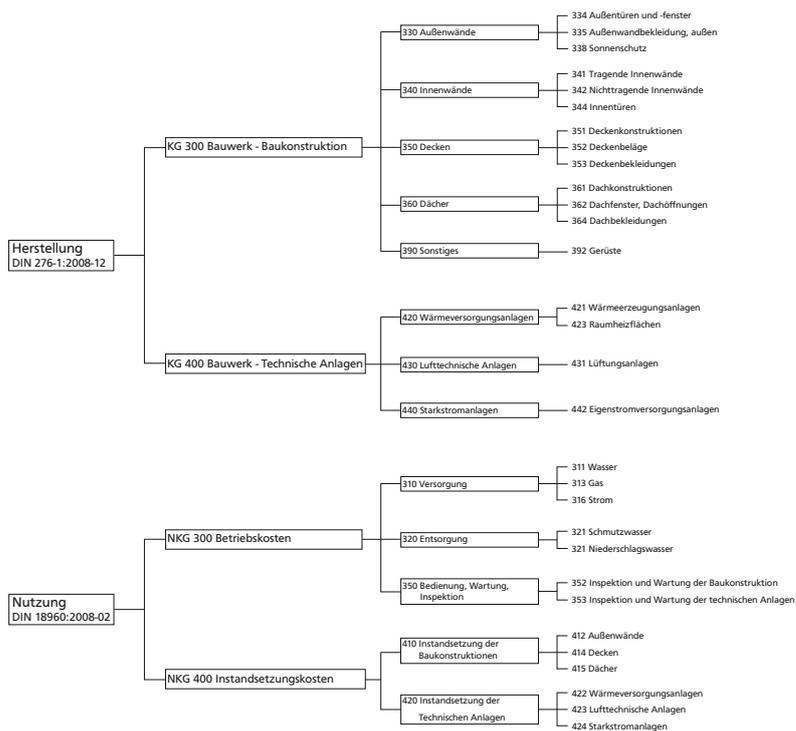


Abb. 151: Berücksichtigte Herstellungs- und Nutzungskosten

### Einzahlungen

Die positiven Auswirkungen einer energetischen Weiterentwicklung, wie die Energiekosteneinsparungen und Komfortgewinn, kommt Eigentümern von selbst genutzten Wohnraum direkt zugute. Im Geschosswohnungsbau profitieren vor allem die Mieter. Eigentümer von vermieteten Geschosswohnungsbauten können nur indirekt über zusätzliche Mieteinnahmen einen Nutzen aus ihren Investitionen ziehen.

---

## Systemgrenzen

Verfahren zur Bewertung der ökonomischen Vorteilhaftigkeit sind stets als vereinfachte rechnerische Abbildungen von viel komplexeren realen Situationen zu betrachten. Sowohl bei den anzusetzenden Randbedingungen als auch bei den anzusetzenden Zahlungen handelt es sich um Prognosen zukünftiger Werte. Eine Unschärfe zwischen den theoretischen Annahmen und praktischen Tatsachen ist nicht vermeidbar. Im vorliegenden Forschungsvorhaben ist die Unschärfe vertretbar, da sie die Gegenüberstellung der Szenarien nicht beeinflusst.

Folgende Randbedingungen wurden für die dynamische Kapitalwertmethode angesetzt:

- Betrachtungszeitraum: 50 Jahre
- Preissteigerung Baukosten: 2 %
- Preissteigerung Wasser und Abwasser: 3 %
- Preissteigerung Energie: 4 %
- Kalkulationszinssatz: 5,5 %
- Mietpreissteigerung: 5 %

Die Wahl der Werte für die Randbedingungen beeinflusst maßgebend das Ergebnis der Lebenszykluskostenanalyse. So können weit in der Zukunft liegende Zahlungen je nach Höhe des Kalkulationszinssatzes an Bedeutung gewinnen oder verlieren.

Bei einer Untersuchung der ökonomischen Vorteilhaftigkeit werden ausschließlich monetäre Faktoren betrachtet. Damit wird eine transparente Entscheidungsgrundlage erarbeitet. Investitionsentscheidungen basieren jedoch auf einer Reihe weiterer Faktoren, die nicht monetär erfasst werden können. Dazu zählt das reduzierte Risiko von Tauwasserausfall und Schimmelpilzbildung bei sachgerechter Durchführung. Die wirtschaftliche Nutzungsdauer und der (Rest-)Wert der Immobilie werden verbessert, wodurch dessen Vermarktbarkeit positiv beeinflusst wird. Niedrige Energiekosten, höherer Komfort und Wohnwert sowie bessere thermische Behaglichkeit können zu einer verbesserten Vermietbarkeit des Gebäudes führen. Wird die Energie aus erneuerbaren Quellen gewonnen, kann auch die Unabhängigkeit von Importen fossiler Brennstoffe ein wesentlicher Entscheidungsfaktor sein.

---

## Betrachtungszeitraum

Der Betrachtungszeitraum grenzt die berücksichtigten Austausch- und Instandhaltungsperioden der Szenarien ein. Im vorliegenden Forschungsvorhaben wird der Betrachtungszeitraum gemäß dem vereinfachten Verfahren der DGNB und analog zur ökologischen Lebenszyklusanalyse auf 50 Jahre festgesetzt.

## Datenbasis

Das Vorgehen orientiert sich am vereinfachten Verfahren gemäß der Deutschen Gesellschaft Nachhaltiges Bauen (DGNB NWO15 ECO1.1 Gebäudebezogene Kosten im Lebenszyklus). Die Herstellungskosten werden auf Grundlage von real eingeholten Angeboten und Rechnungen zusammengetragen und durch statistische Kostenkennwerte (BKI 2016, SIRADOS 2017) ergänzt.

Die Kosten für Inspektion, Wartung und Instandsetzung werden anhand von Prozentsätzen in Relation zu den Herstellungskosten ermittelt. Die Prozentsätze werden durch die DGNB auf Basis der AMEV und der VDI 2067:2000 vorgegeben. Für die Untersuchung des unsanierten Bestands werden diese Kosten auf Basis des Baukostenindex ermittelt. Die Endenergiebedarfe für Heizung und Warmwasser werden gemäß DIN 18599 bilanziert. Die Frischwasser- und Abwassermengen werden gemäß VDI 3807 Blatt 3 berechnet. Die Niederschlagsmenge bezieht sich auf die versiegelte Grundstücksfläche unter Berücksichtigung der entsprechenden Abflussbeiwerte. Die verwendeten Einheitspreise für Energieträger, Frischwasser und Abwasser entsprechen den Vorgaben der DGNB.

Bei der angesetzten Kaltmiete von 9,50 €/m<sup>2</sup> handelt es sich um die reale Miete für die bestehenden Gebäude. Sie entspricht dem Durchschnitt von 9,54 €/m<sup>2</sup> für vermietete Wohnungen in Darmstadt von 60 m<sup>2</sup> Größe der vergangenen sieben Jahre<sup>1</sup>. Bei den Szenarien wird diese Ausgangsmiete um das Doppelte der Energiekostensparnis und einen Sicherheitszuschlag von 5 %<sup>2</sup> für steigende Mietpreise erhöht. Diese Berechnung orientiert sich an einer Empfehlung der Deutschen Energie-Agentur (DENA 2012). Die Miete könnte ebenfalls auf Basis § 559 BGB um 11 % der energiesparenden und wohnwertverbessernden Kosten erhöht werden. Von diesem Ansatz wird Abstand genommen aufgrund der resultierenden, als überhöhten und damit sozial unverträglichen Mietpreise.

---

1 Eigene Berechnung auf Grundlage der Mietpreisentwicklung für 60 m<sup>2</sup> Mietwohnungen in Hessen von 2011 bis 2018: wohnungsboerse.net, 01.06.2017.

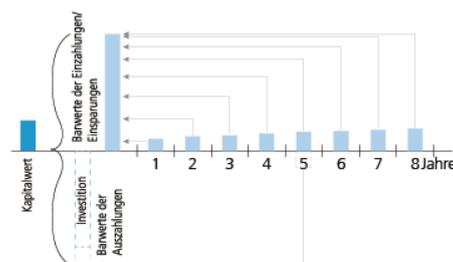
2 Eigene Berechnung auf Grundlage der Mietpreisentwicklung für 60 m<sup>2</sup> Mietwohnungen in Hessen von 2011 bis 2018: wohnungsboerse.net, 01.06.2017.

## Ökonomische Wirkungsindikatoren

Anhand der ökonomischen Wirkungsindikatoren kann die ökonomische Vorteilhaftigkeit eines Szenarios sowohl absolut (*Lohnt sich das Szenario?*) als auch relativ (*Welches Szenario lohnt sich mehr?*) bewertet werden. Folgende ökonomische Wirkungsindikatoren werden gemäß der Zielgruppe „Wohnungseigentümer von vermieteten Geschosswohnungsbauten“ untersucht:

### Kapitalwert

Für den Betrachtungszeitraum von 50 Jahren werden die Kapitalwerte der Ein- und Auszahlungen für den Bestand und für die Szenarien ermittelt und aufsummiert. Auf dieser Basis werden die Einsparungen (Nutzungskosten) und Erträge (Mieterhöhung, Einspeisevergütung) ermittelt. Davon werden die energiebedingten Anfangsinvestitionen abgezogen (Abb. 152). Ist der resultierende Kapitalwert größer als Null, ist die Investition vorteilhafter als die alternative Geldanlage (absolute Vorteilhaftigkeit). Bei der Gegenüberstellung der Szenarien ist das Szenario mit dem höchsten Kapitalwert das vorteilhafteste (relative Vorteilhaftigkeit).



$$K = K_{\text{Einsparungen und Erträge, 50a}} - K_{\text{Herstellung, energiebedingt}}$$

Abb. 152: Kapitalwert

### Amortisationszeit

Die Amortisationszeit umfasst den Zeitraum bis die energiebedingten Mehrkosten für die Herstellung durch die Einsparung (Nutzungskosten) und Erträge (Mieterhöhung, Einspeisevergütung) gedeckt werden (Abb. 153). Sie sollte innerhalb des Betrachtungszeitraums liegen (absolute Vorteilhaftigkeit). Bei der Gegenüberstellung ist das Szenario mit der kürzesten Amortisationszeit das vorteilhafteste (relative Vorteilhaftigkeit).

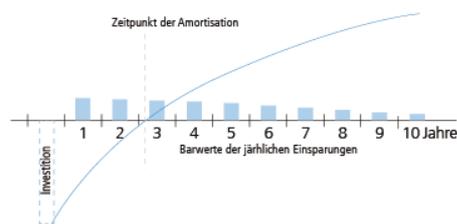


Abb. 153: Amortisationszeit

### Restwert

Die energetische Weiterentwicklung wirkt sich positiv auf die Länge der wirtschaftlichen Gesamtnutzungsdauer der Gebäude aus. Die Gesamtnutzungsdauer im Zuge der energetischen Weiterentwicklung wird nach Empfehlungen von Kleiber et al. (KLEIBER et al. 2017) ermittelt. Die Investition in die energetische Weiterentwicklung hat demzufolge über den Betrachtungszeitraum von 50 Jahren hinaus Bestand. Der Restwert des Gebäudes wird anhand des Annuitätenfaktors  $a_n$  und Rentenbarwertfaktors  $b_t$  sowie dem Kapitalwert der energiebedingten Mehrkosten  $K_0$  ermittelt. Die Bewertung des Restwerts erfolgt ausschließlich durch die relative Vorteilhaftigkeit anhand der Gegenüberstellung der Szenarien. Das Szenario mit dem höchsten Restwert ist das vorteilhafteste.

$$R = (1 - a_n \cdot b_t) \cdot K_0 = \left(1 - \frac{p}{(1 + p)^n}\right) + \frac{1 - (1 + p)^{-t}}{p} \cdot K_0$$

R - Restwert

a - Annuitätenfaktor

b - Rentenbarwertfaktor

### Bezugseinheit

Die berücksichtigten Kosten werden auf die gemeinsame Vergleichseinheit

$$\text{€}_{\text{netto}} / \text{Bruttogrundfläche}$$

bezogen, um die Ergebnisse einander gegenüberstellen zu können und um einen Vergleich mit anderen Projekten ermöglichen zu können.

---

## 5.2 Der unsanierte Bestand als Ausgangspunkt der Untersuchungen

---

Der unsanierte Bestand bildet den Ausgangspunkt der Untersuchungen. Beide Bestandsgebäude sind nahezu baugleich. Für die Gegenüberstellung mit den Szenarien wird hier der Durchschnitt der Ergebnisse beider Gebäude dargestellt. Bei der Betrachtung des unsanierten Bestands wurde lediglich der gesetzlich geforderte Austausch des Heizkessels im Jahr 2021 einbezogen. Weitere Maßnahmen sind nicht erforderlich.

Als Bezugsgröße wird die Bruttogrundfläche von 1.096 m<sup>2</sup> angesetzt.

### 5.2.1. Herstellung

KG 400 Technische Anlagen

| KOSTENGRUPPE (DIN 276)         | VOLLKOSTEN<br>[€ <sub>NETTO</sub> /m <sup>2</sup> <sub>BGF</sub> ] | ENERGIEBEDINGTE<br>MEHRKOSTEN<br>[€ <sub>NETTO</sub> /m <sup>2</sup> <sub>BGF</sub> ] |
|--------------------------------|--|---|
| KG 420 Wärmeversorgungsanlagen | 4,60   | 0,00  |
| <b>KG 400 Total</b>            | <b>4,60</b>  | <b>0,00</b>   |

### 5.2.2. Nutzung

KG 300 Betrieb

| KOSTENGRUPPE (DIN 18960)              | BARWERT 50 JAHRE<br>[€ <sub>NETTO</sub> /m <sup>2</sup> <sub>BGF</sub> ] |
|---------------------------------------|--|
| KG 310 Versorgung                     | 442,80   |
| KG 320 Entsorgung                     | 58,50  |
| KG 350 Bedienung, Inspektion, Wartung | 68,20  |
| <b>KG 300 Total</b>                   | <b>569,50</b>  |

KG 400 Instandsetzung

| KOSTENGRUPPE              | BARWERT 50 JAHRE<br>[€ <sub>NETTO</sub> /m <sup>2</sup> <sub>BGF</sub> ] |
|---------------------------|--|
| KG 410 Baukonstruktion    | 40,50  |
| KG 420 Technische Anlagen | 73,70  |
| <b>KG 400 Total</b>       | <b>114,20</b>  |

---

### 5.2.3. Wirkungsabschätzung

Der unsanierte Bestand verursacht jedes Jahr Energiekosten (Strom und Wärme) in Höhe von 12.993 € ( $12 \text{ €}_{\text{netto}}/\text{m}^2_{\text{BGF}}$ ). Das ist das Doppelte der Kaltmiete bei einer Wohnfläche von 607 m<sup>2</sup>. Die hohen Energiekosten sind unter anderem auf den ineffizienten Betrieb des Gas-Spezialkessels zurückzuführen. Zudem resultieren hohe Wärmeverluste durch die ungedämmte und zum Teil undichte Gebäudehülle sowie durch die bereits in „2.2.1. Thermografie“ beschriebenen Wärmebrücken.

---

## 5.3 Sanierung nach Energieeinsparverordnung EnEV

---

### 5.3.1. Herstellung

Als Bezugsgröße wird die Bruttogrundfläche von 1.137 m<sup>2</sup> angesetzt.

#### KG 300 Baukonstruktion

| KOSTENGRUPPE (DIN 276)    | VOLLKOSTEN<br>[€ <sub>NETTO</sub> /m <sup>2</sup> <sub>BGF</sub> ] | ENERGIEBEDINGTE<br>MEHRKOSTEN<br>[€ <sub>NETTO</sub> /m <sup>2</sup> <sub>BGF</sub> ] |
|---------------------------|--|---|
| KG 330 Außenwände         | 126,70   | 39,20   |
| KG 350 Decken             | 9,10   | 19,10   |
| KG 360 Dächer             | 39,00  | 18,00   |
| KG 390 Sonstige Maßnahmen | 22,30  | 0,00  |
| <b>KG 300 Total</b>       | <b>197,10</b>  | <b>66,30</b>  |

#### KG 400 Technische Anlagen

| KOSTENGRUPPE (DIN 276)         | VOLLKOSTEN<br>[€ <sub>NETTO</sub> /m <sup>2</sup> <sub>BGF</sub> ] | ENERGIEBEDINGTE<br>MEHRKOSTEN<br>[€ <sub>NETTO</sub> /m <sup>2</sup> <sub>BGF</sub> ] |
|--------------------------------|--|---|
| KG 420 Wärmeversorgungsanlagen | 8,90   | 8,90  |
| KG 430 Lüftungsanlagen         | 55,30  | 0,00  |
| <b>KG 400 Total</b>            | <b>64,20</b>   | <b>8,90</b>   |

#### KG 700 Baunebenkosten<sup>1</sup>

| KOSTENGRUPPE (DIN 276)                            | VOLLKOSTEN<br>[€ <sub>NETTO</sub> /m <sup>2</sup> <sub>BGF</sub> ] | ENERGIEBEDINGTE<br>MEHRKOSTEN<br>[€ <sub>NETTO</sub> /m <sup>2</sup> <sub>BGF</sub> ] |
|---|--|---|
| KG 730 Architekten- und In-<br>genieursleistungen | 182,90   | 0,00  |
| <b>KG 730 Total</b>                               | <b>182,90</b>  | <b>0,00</b>   |

<sup>1</sup> Baunebenkosten werden informativ angeführt, fließen aber nicht in die Berechnungen mit ein.

### 5.3.2. Nutzung

#### KG 300 Betrieb

| KOSTENGRUPPE (DIN 18960)              | BARWERT 50 JAHRE<br>[€ <sub>NETTO</sub> /m <sup>2</sup> <sub>BGF</sub> ] |
|---------------------------------------|--|
| KG 310 Versorgung                     | 178,60   |
| KG 320 Entsorgung                     | 56,40  |
| KG 350 Bedienung, Inspektion, Wartung | 3,50   |
| <b>KG 300 Total</b>                   | <b>238,50</b>  |

#### KG 400 Instandsetzung

| KOSTENGRUPPE              | BARWERT 50 JAHRE<br>[€ <sub>NETTO</sub> /m <sup>2</sup> <sub>BGF</sub> ] |
|---------------------------|--|
| KG 410 Baukonstruktion    | 15,80  |
| KG 420 Technische Anlagen | 1,10   |
| <b>KG 400 Total</b>       | <b>16,90</b>   |

#### Einzahlungen / Erträge

| EINZAHLUNG                | BARWERT 50 JAHRE<br>[€ <sub>NETTO</sub> /m <sup>2</sup> <sub>BGF</sub> ] |
|---------------------------|--|
| Mehreinnahmen Miete       | 373,80   |
| <b>Einzahlungen Total</b> | <b>373,80</b>  |

### 5.3.3. Wirkungsabschätzung

#### Kapitalwert

Der Kapitalwert der jährlichen Einsparungen und Gewinne von  $801 \text{ €}_{\text{netto}}/\text{m}^2_{\text{BGF}}$  liegt über den energiebedingten Mehrkosten von rund  $75 \text{ €}_{\text{netto}}/\text{m}^2_{\text{BGF}}$ . Es ergibt sich ein Kapitalwert von rund  $726 \text{ €}_{\text{netto}}/\text{m}^2_{\text{BGF}}$ . Eine konventionelle Sanierung nach Energieeinsparverordnung stellt sich hier als vorteilhafter als die alternative Geldanlage heraus.

Die detaillierte Betrachtung der Kapitalwerte der Ein- und Auszahlungen in Abb. 154 veranschaulicht, dass die Betriebskosten die höchsten Auszahlungen verursachen.

Das Ringdiagramm in Abb. 155 zeigt, dass der Anteil der energiebedingten Mehrinvestitionen etwas mehr als ein Drittel der Gesamtinvestition beträgt.

Im nach Kostengruppen gegliederten Ringdiagramm in Abb. 156 fällt auf, dass die Kostengruppe 330 Außenwände die meisten Kosten verursacht. Die Außenwände beanspruchen zum einen die größte Fläche der Bauteile. Die Kosten für die Dämmung sind entsprechend für zwei Drittel in dieser Kostengruppe verantwortlich. Zum anderen sind die Fenster kostenintensive Bauteile. Die Fenster verursachen etwa ein Viertel der Kosten, obwohl ihr Flächenanteil geringer ist.

Abb. 154: Kapitalwerte der Aus- und Einzahlungen, t=50a

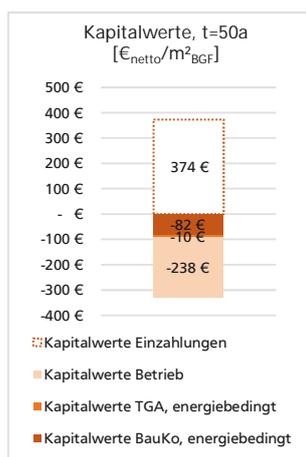


Abb. 155: Sowieso- und energiebedingte Mehrkosten

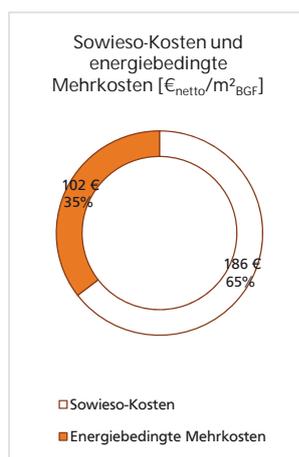
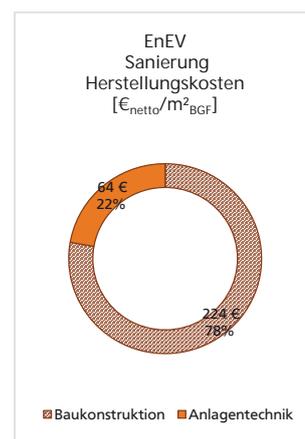
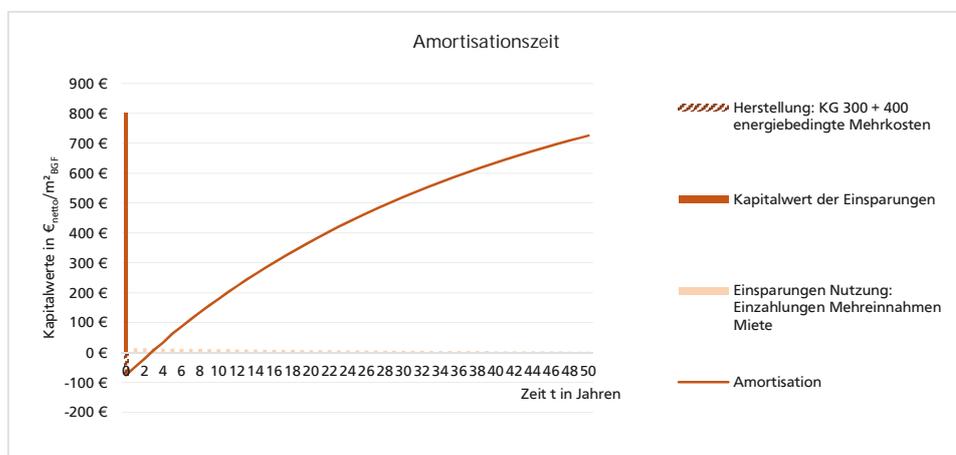


Abb. 156: Herstellungskosten nach Kostengruppen



### Amortisationszeit

Abb. 157: Die energiebedingten Mehrkosten einer Sanierung nach EnEV ist bereits nach drei Jahren amortisiert.



---

Die energiebedingten Mehrkosten der Sanierung zum Effizienzhaus Plus können durch die Einsparungen an Energiekosten sowie durch die Gewinne aus Einspeiservergütung und zusätzlichen Mieteinnahmen innerhalb von nur 3 Jahren ausgeglichen werden (vergleiche Abb. 157). Der Zeitpunkt der Amortisation liegt innerhalb des Betrachtungszeitraums.

#### Restwert

Für das Szenario wurde eine Gesamtnutzungsdauer von 133 Jahren ermittelt. Ausgehend davon ergibt sich ein Restwert von etwa  $5 \text{ €}_{\text{netto}}/\text{m}^2_{\text{BGF}}$

#### 5.3.4. Bewertung

Eine konventionelle Sanierung nach Energieeinsparverordnung ist in diesem konkreten Fall mit einer Investition von etwa  $261 \text{ €}_{\text{netto}}/\text{m}^2_{\text{BGF}}$  realisierbar. Die energiebedingten Mehrkosten betragen etwa ein Drittel dieser Kosten. Sie können zum Teil auf die Miete umgelegt werden. Im Zusammenspiel mit den gesunkenen Energiekosten amortisieren sich die energiebedingten Mehrkosten folglich bereits nach drei Jahren.

Die Mieter ziehen ebenfalls ihre Vorteile aus der Sanierung. Zum einen profitieren sie monetär durch die um 62 % sinkenden Energiekosten.

Die nicht-monetären Vorteile betreffen sowohl Vermieter als auch Mieter. So können beispielsweise der verbesserte Schutz vor Tauwasser und Schimmel und demzufolge eine höhere Behaglichkeit und mehr Komfort genannt werden. Diese Vorteile resultieren unter anderem aus dem verbesserten Wärmeschutz der Gebäudehülle. Die Temperaturamplitude zwischen Innen- und Außentemperatur wird geglättet. Im Sommer heizen sich die Räume nicht zu stark auf. Im Winter geht weniger Wärme nach draußen verloren. Die kontrollierte Wohnungslüftung sorgt für mehr Komfort und stellt den Mindestluftwechsel sicher. Neben zufriedenen Mietern profitiert der Vermieter auch von der längeren Nutzungsdauer des Gebäudes.

Da ohnehin Sanierungsbedarf besteht, stellt sich dieses Szenario als vorteilhaft heraus.

---

## 5.4 Sanierung zum Effizienzhaus Plus

---

### 5.4.1. Herstellung

Als Bezugsgröße wird die Bruttogrundfläche von 1.171 m<sup>2</sup> angesetzt.

#### KG 300 Baukonstruktion

| KOSTENGRUPPE (DIN 276)    | VOLLKOSTEN<br>[€ <sub>NETTO</sub> /m <sup>2</sup> <sub>BGF</sub> ] | ENERGIEBEDINGTE<br>MEHRKOSTEN<br>[€ <sub>NETTO</sub> /m <sup>2</sup> <sub>BGF</sub> ] |
|---------------------------|--|---|
| KG 330 Außenwände         | 191,40   | 69,10   |
| KG 350 Decken             | 8,90   | 8,90  |
| KG 360 Dächer             | 35,20  | 21,30   |
| KG 390 Sonstige Maßnahmen | 26,00  | 4,30  |
| <b>KG 300 Total</b>       | <b>261,50</b>  | <b>103,60</b>   |

#### KG 400 Technische Anlagen

| KOSTENGRUPPE (DIN 276)         | VOLLKOSTEN<br>[€ <sub>NETTO</sub> /m <sup>2</sup> <sub>BGF</sub> ] | ENERGIEBEDINGTE<br>MEHRKOSTEN<br>[€ <sub>NETTO</sub> /m <sup>2</sup> <sub>BGF</sub> ] |
|--------------------------------|--|---|
| KG 420 Wärmeversorgungsanlagen | 64,60  | 67,30   |
| KG 430 Lüftungsanlagen         | 65,40  | 18,00   |
| KG 440 Starkstromanlagen       | 77,50  | 77,50   |
| <b>KG 400 Total</b>            | <b>207,50</b>  | <b>162,80</b>   |

#### KG 700 Baunebenkosten<sup>1</sup>

| KOSTENGRUPPE (DIN 276)                       | VOLLKOSTEN<br>[€ <sub>NETTO</sub> /m <sup>2</sup> <sub>BGF</sub> ] | ENERGIEBEDINGTE<br>MEHRKOSTEN<br>[€ <sub>NETTO</sub> /m <sup>2</sup> <sub>BGF</sub> ] |
|--|--|---|
| KG 730 Architekten- und Ingenieursleistungen | 328,30   | 0,00  |
| <b>KG 730 Total</b>                          | <b>328,30</b>  | <b>0,00</b>   |

<sup>1</sup> Baunebenkosten werden informativ angeführt, fließen aber nicht in die Berechnungen mit ein.

## 5.4.2. Nutzung

### KG 300 Betrieb

| KOSTENGRUPPE (DIN 18960)              | BARWERT 50 JAHRE<br>[€ <sub>NETTO</sub> /m <sup>2</sup> <sub>BGF</sub> ] |
|---------------------------------------|--|
| KG 310 Versorgung                     | 99,10  |
| KG 320 Entsorgung                     | 54,80  |
| KG 350 Bedienung, Inspektion, Wartung | 48,10  |
| <b>KG 300 Total</b>                   | <b>202,00</b>  |

### KG 400 Instandsetzung

| KOSTENGRUPPE              | BARWERT 50 JAHRE<br>[€ <sub>NETTO</sub> /m <sup>2</sup> <sub>BGF</sub> ] |
|---------------------------|--|
| KG 410 Baukonstruktion    | 24,60  |
| KG 420 Technische Anlagen | 30,00  |
| <b>KG 400 Total</b>       | <b>54,60</b>   |

### Einzahlungen / Erträge

| EINZAHLUNG                    | BARWERT 50 JAHRE<br>[€ <sub>NETTO</sub> /m <sup>2</sup> <sub>BGF</sub> ] |
|-------------------------------|--|
| Mehreinnahmen Miete           | 458,40   |
| Einspeisevergütung (20 Jahre) | 32,00  |
| <b>Einzahlungen Total</b>     | <b>490,40</b>  |

## 5.4.3. Wirkungsabschätzung

### Kapitalwert

Der Kapitalwert der jährlichen Einsparungen und Gewinne von  $919 \text{ €}_{\text{netto}}/\text{m}^2_{\text{BGF}}$  liegt über den energiebedingten Mehrkosten von rund  $264 \text{ €}_{\text{netto}}/\text{m}^2_{\text{BGF}}$ . Es ergibt sich ein Kapitalwert von rund  $657 \text{ €}_{\text{netto}}/\text{m}^2_{\text{BGF}}$ . Eine zukunftsorientierte Sanierung zum Effizienzhaus Plus nach BMU stellt sich hier als vorteilhafter als die alternative Geldanlage heraus.

Die detaillierte Betrachtung der Kapitalwerte der Ein- und Auszahlungen in Abb. 158 veranschaulicht, dass die Herstellung und Nutzung der Anlagentechnik die höchsten Auszahlungen verursachen.

Das Ringdiagramm in Abb. 159 zeigt, dass der Anteil der energiebedingten Mehrinvestitionen mehr als die Hälfte der Gesamtinvestition beträgt.

Im nach Kostengruppen gegliederten Ringdiagramm in Abb. 160 fällt auf, dass die Kostengruppe 330 Außenwände die meisten Kosten verursacht. Die Außenwände beanspruchen zum einen die größte Fläche der Bauteile. Die Kosten für die Dämmung sind entsprechend für fast 70 % in dieser Kostengruppe verantwortlich. Zum anderen sind die Fenster kostenintensive Bauteile. Die Fenster verursachen fast 30 % der Kosten, obwohl ihr Flächenanteil geringer ist. Die Photovoltaikanlage in Kostengruppe 440 kann als zweiter Hauptverursacher der Herstellungskosten identifiziert werden.

Abb. 158: Kapitalwerte der Aus- und Einzahlungen, t=50a

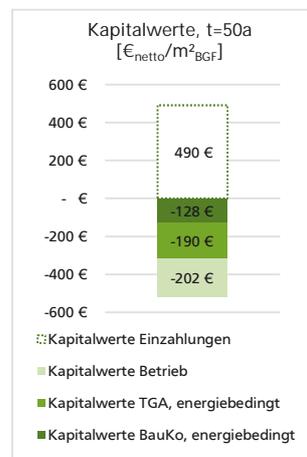


Abb. 159: Sowieso- und energiebedingte Mehrkosten

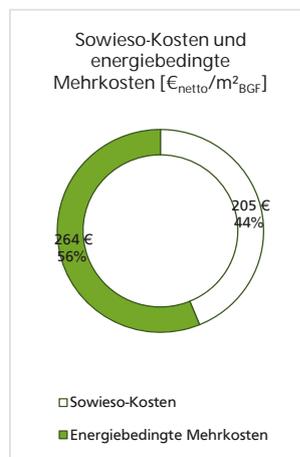
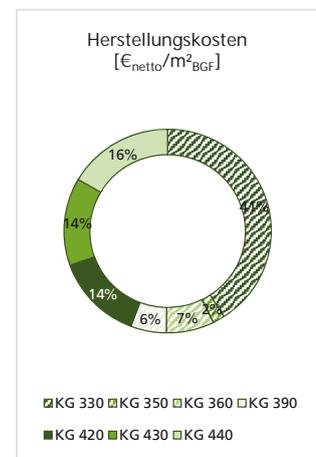


Abb. 160: Herstellungskosten nach Kostengruppen



### Amortisationszeit

Die energiebedingten Mehrkosten der Sanierung zum Effizienzhaus Plus können durch die Einsparungen an Energiekosten sowie durch die Gewinne aus Einspeisevergütung und zusätzlichen Mieteinnahmen innerhalb von 9 Jahren ausgeglichen werden (vergleiche Abb. 161). Der Zeitpunkt der Amortisation liegt innerhalb des Betrachtungszeitraums.

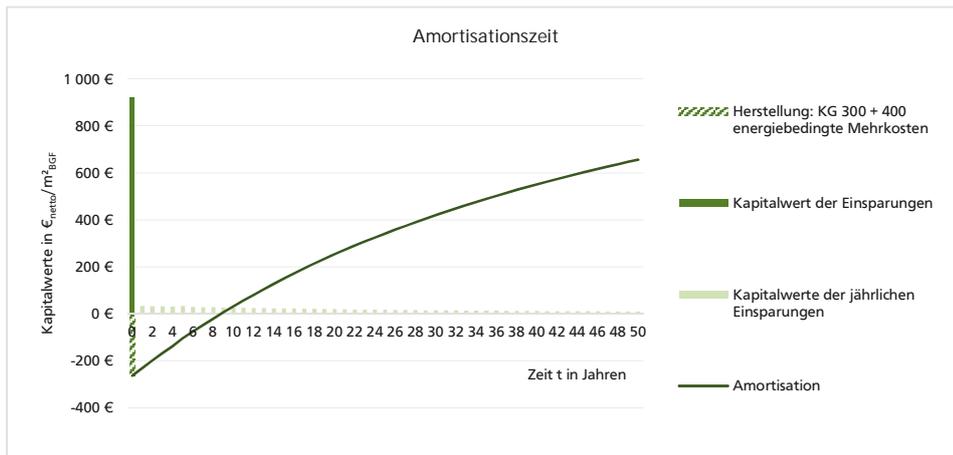


Abb. 161: Die Sanierung zum Effizienzhaus Plus amortisiert sich innerhalb von 9 Jahren.

#### Restwert

Für das Szenario wurde eine Gesamtnutzungsdauer von 145 Jahren ermittelt. Ausgehend davon ergibt sich ein Restwert von etwa  $18 \text{ €}_{\text{netto}}/\text{m}^2_{\text{BGF}}$

#### 5.4.4. Bewertung

Eine zukunftsorientierte Sanierung zum Effizienzhaus Plus ist in diesem konkreten Fall mit einer Investition von etwa  $469 \text{ €}_{\text{netto}}/\text{m}^2_{\text{BGF}}$  umsetzbar. Die energiebedingten Mehrkosten betragen etwa zwei Drittel dieser Kosten. Sie können zum Teil auf die Miete umgelegt werden. Hier zeichnet sich bereits ab, dass sich der Blickwinkel auf Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen verändern sollte. Der Energiestandard äußert seine Vorteile im Betrieb: Durch die auf ein Minimum reduzierten Energiekosten amortisieren sich die energiebedingten Mehrkosten bereits nach 9 Jahren.

Die Mieter ziehen ebenfalls ihren Nutzen aus der Sanierung. Sie profitieren vor allem monetär, denn die Energiekosten betragen nicht mal mehr ein Zehntel der ursprünglichen Kosten.

Als nicht-monetäre Vorteile für Vermieter und Mieter können beispielsweise der verbesserte Schutz vor Tauwasser und Schimmel und demzufolge eine höhere Behaglichkeit und mehr Komfort genannt werden. Diese Vorteile resultieren unter anderem aus dem verbesserten Wärmeschutz der Gebäudehülle. Die Temperaturamplitude zwischen Innen- und Außentemperatur wird geglättet. Im Sommer heizen sich die Räume nicht zu stark auf. Im Winter geht weniger Wär-

---

me nach draußen verloren. Die kontrollierte Wohnungslüftung sorgt für mehr Komfort, stellt den Mindestluftwechsel sicher und temperiert gleichzeitig die Luft aus der gewonnenen Abwärme.

Neben zufriedenen Mietern profitiert der Vermieter von der längeren Nutzungsdauer, der Wertsteigerung und vor allem von der besseren Vermarktbarkeit des Gebäudes als zukunftsorientiertes Vorbild. Damit wird auch das Potenzial zur Aufwertung der Siedlung ausgeschöpft. Durch die Nutzung erneuerbarer Energie wird nicht nur ein Beitrag zur Energiewende geleistet, sondern auch eine Unabhängigkeit von steigenden und von der Importpolitik abhängigen Energiepreisen erzielt.

Das Szenario stellt sich als vorteilhaft heraus.

---

## 5.5 Aufstockung und Sanierung zum Effizienzhaus Plus

---

### 5.5.1. Herstellung

Als Bezugsgröße wird die Bruttogrundfläche von 1.467 m<sup>2</sup> angesetzt.

#### KG 300 Baukonstruktion

| KOSTENGRUPPE (DIN 276)    | VOLLKOSTEN<br>[€ <sub>NETTO</sub> /m <sup>2</sup> <sub>BGF</sub> ] | ENERGIEBEDINGTE<br>MEHRKOSTEN<br>[€ <sub>NETTO</sub> /m <sup>2</sup> <sub>BGF</sub> ] |
|---------------------------|--|---|
| KG 330 Außenwände         | 217,90   | 63,50   |
| KG 340 Innenwände         | 29,70  | 0,00  |
| KG 350 Decken             | 67,60  | 7,10  |
| KG 360 Dächer             | 85,40  | 17,30   |
| KG 390 Sonstige Maßnahmen | 25,60  | 3,40  |
| <b>KG 300 Total</b>       | <b>426,20</b>  | <b>91,30</b>  |

#### KG 400 Technische Anlagen

| KOSTENGRUPPE (DIN 276)         | VOLLKOSTEN<br>[€ <sub>NETTO</sub> /m <sup>2</sup> <sub>BGF</sub> ] | ENERGIEBEDINGTE<br>MEHRKOSTEN<br>[€ <sub>NETTO</sub> /m <sup>2</sup> <sub>BGF</sub> ] |
|--------------------------------|--|---|
| KG 420 Wärmeversorgungsanlagen | 64,20  | 64,20   |
| KG 430 Lüftungsanlagen         | 66,00  | 15,80   |
| KG 440 Starkstromanlagen       | 80,20  | 80,20   |
| <b>KG 400 Total</b>            | <b>210,40</b>  | <b>160,20</b>   |

#### KG 700 Baunebenkosten<sup>1</sup>

| KOSTENGRUPPE (DIN 276)                       | VOLLKOSTEN<br>[€ <sub>NETTO</sub> /m <sup>2</sup> <sub>BGF</sub> ] | ENERGIEBEDINGTE<br>MEHRKOSTEN<br>[€ <sub>NETTO</sub> /m <sup>2</sup> <sub>BGF</sub> ] |
|--|--|---|
| KG 730 Architekten- und Ingenieursleistungen | 445,50   | 0,00  |
| <b>KG 730 Total</b>                          | <b>445,50</b>  | <b>0,00</b>   |

#### 5.5.2. Nutzung

##### KG 300 Betrieb

| KOSTENGRUPPE (DIN 18960)              | BARWERT 50 JAHRE<br>[€ <sub>NETTO</sub> /m <sup>2</sup> <sub>BGF</sub> ] |
|---------------------------------------|--|
| KG 310 Versorgung                     | 101,10   |
| KG 320 Entsorgung                     | 49,20  |
| KG 350 Bedienung, Inspektion, Wartung | 47,40  |
| <b>KG 300 Total</b>                   | <b>198,00</b>  |

##### KG 400 Instandsetzung

| KOSTENGRUPPE              | BARWERT 50 JAHRE<br>[€ <sub>NETTO</sub> /m <sup>2</sup> <sub>BGF</sub> ] |
|---------------------------|--|
| KG 410 Baukonstruktion    | 21,70  |
| KG 420 Technische Anlagen | 29,00  |
| <b>KG 400 Total</b>       | <b>50,70</b>   |

##### Einzahlungen / Erträge

| EINZAHLUNG                    | BARWERT 50 JAHRE<br>[€ <sub>NETTO</sub> /m <sup>2</sup> <sub>BGF</sub> ] |
|-------------------------------|--|
| Mehreinnahmen Miete           | 520,30   |
| Einspeisevergütung (20 Jahre) | 25,90  |
| <b>Einzahlungen Total</b>     | <b>546,20</b>  |

<sup>1</sup> Baunebenkosten werden informativ angeführt, fließen aber nicht in die Berechnungen mit ein.

### 5.5.3. Wirkungsabschätzung

#### Kapitalwert

Der Kapitalwert der jährlichen Einsparungen und Gewinne von  $984 \text{ €}_{\text{netto}}/\text{m}^2_{\text{BGF}}$  liegt über den energiebedingten Mehrkosten von rund  $251 \text{ €}_{\text{netto}}/\text{m}^2_{\text{BGF}}$ . Es ergibt sich ein Kapitalwert von rund  $733 \text{ €}_{\text{netto}}/\text{m}^2_{\text{BGF}}$ . Eine Aufstockung und zukunftsorientierte Sanierung zum Effizienzhaus Plus nach BMU stellt sich hier als vorteilhafter als die alternative Geldanlage heraus.

Die detaillierte Betrachtung der Kapitalwerte der Ein- und Auszahlungen in Abb. 162 veranschaulicht, dass die Herstellung und die Nutzung der Anlagentechnik die höchsten Auszahlungen verursachen. An zweiter Stelle stehen die Betriebskosten. Dies ist unter anderem darauf zurückzuführen, dass in den Betriebskosten auch die Kosten für Wartung, Inspektion und Instandhaltung von Baukonstruktion und Anlagentechnik integriert sind und bereits ein Drittel der Kosten in dieser Kostengruppe verursachen.

Das Ringdiagramm in Abb. 163 zeigt, dass der Anteil der energiebedingten Mehrinvestitionen etwa ein Drittel der Gesamtinvestition beträgt.

In Abb. 164 fällt auf, dass die Kostengruppe 330 Außenwände die meisten Kosten verursacht. Dies resultiert vor allem durch den Abriss und Neubau der Außenwände und Fenster für die Aufstockung. Zum anderen ist die Außenwandfläche die größte Fläche der Bauteile. Hinzu kommen die Kosten für die 3-fach verlasteten Fenster.

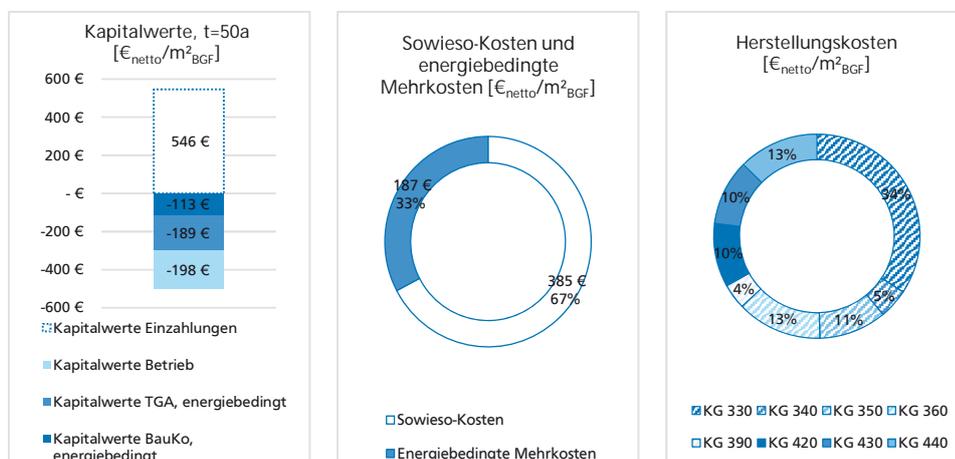


Abb. 162: Kapitalwerte der Aus- und Einzahlungen, t=50a

Abb. 163: Sowieso- und energiebedingte Mehrkosten

Abb. 164: Herstellungskosten nach Kostengruppen

## Amortisationszeit

Die energiebedingten Mehrkosten zur Aufstockung und Sanierung zum Effizienzhaus Plus können durch die Einsparungen an Energiekosten sowie durch die Gewinne aus Einspeisevergütung und zusätzlichen Mieteinnahmen innerhalb von 8 Jahren ausgeglichen werden (vergleiche Abb. 165). Der Zeitpunkt der Amortisation liegt innerhalb der ersten Dekade des Betrachtungszeitraums.

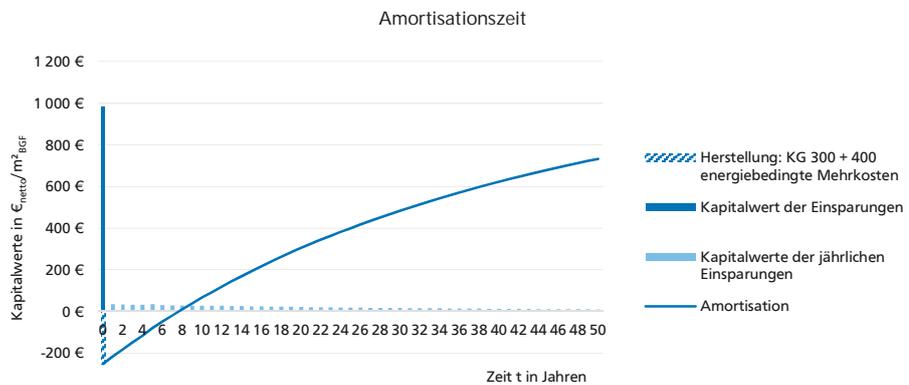


Abb. 165: Die Aufstockung und Sanierung zum Effizienzhaus Plus amortisiert sich innerhalb von 8 Jahren.

## Restwert

Für das Szenario wurde eine Gesamtnutzungsdauer von 152 Jahren ermittelt. Ausgehend davon ergibt sich ein Restwert von  $17 \text{ €}_{\text{netto}}/\text{m}^2_{\text{BGF}}$

### 5.5.4. Bewertung

Die Verbindung einer zukunftsorientierten Sanierung zum Effizienzhaus Plus in Verbindung mit neuem Wohnraum ist in diesem konkreten Fall mit einer Investition von etwa  $572 \text{ €}_{\text{netto}}/\text{m}^2_{\text{BGF}}$  umsetzbar. Die energiebedingten Mehrkosten betragen etwa ein Drittel dieser Kosten. Sie können zum Teil auf die Miete umgelegt werden. In der Höhe der energiebedingten Mehrkosten von  $187 \text{ €}_{\text{netto}}/\text{m}^2_{\text{BGF}}$  zeichnet sich bereits ab, dass sich der Blickwinkel auf Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen verändern sollte. Der Energiestandard äußert seine Vorteile im Betrieb: Durch die auf ein Minimum reduzierten Energiekosten amortisieren sich die energiebedingten Mehrkosten bereits nach 8 Jahren. Gleichzeitig wird hier auch der Vorteil des zusätzlichen Wohnraums deutlich. Trotz mehr Flä-

---

che, die mit Energie versorgt werden muss, betragen die Energiekosten nur gerade mal ein Zehntel der ursprünglichen Kosten. Aus dieser Veränderung ziehen gerade auch die Mieter ihren Vorteil aus der Sanierung.

Als nicht-monetäre Vorteile für Vermieter und Mieter können beispielsweise der verbesserte Schutz vor Tauwasser und Schimmel sowie eine höhere Behaglichkeit und mehr Komfort genannt werden. Diese Vorteile resultieren unter anderem aus dem verbesserten Wärmeschutz der Gebäudehülle. Die Temperaturamplitude zwischen Innen- und Außentemperatur wird geglättet. Im Sommer heizen sich die Räume nicht zu stark auf. Im Winter geht weniger Wärme nach draußen verloren. Die kontrollierte Wohnungslüftung sorgt für mehr Komfort, stellt den Mindestluftwechsel sicher und temperiert gleichzeitig die Luft aus der gewonnenen Abwärme.

Die zunehmende Dichte im Gebäude durch die steigende Zahl der Bewohner könnte zur Herausforderung werden. Dieser Faktor ist sehr individuell. Einerseits kann die höhere Belegungsdichte zu Spannungen führen. Andererseits kann sich auch eine sozial sehr verbundene Bewohnerschaft entwickeln.

Neben zufriedenen Mietern profitiert der Vermieter von der längeren Nutzungsdauer, der Wertsteigerung und vor allem von der besseren Vermarktbarkeit des Gebäudes als zukunftsorientiertes Vorbild. Damit wird auch das Potenzial zur Aufwertung der Siedlung ausgeschöpft. Der Vermieter erzielt nicht nur mehr Mieteinnahmen. Er spart zusätzlich die Kosten zum Herrichten des Grundstücks, da er bereits vorhandene Flächen nutzt. Auch das Weiternutzen der Innenwände des ehemaligen Dachgeschosses führt zu Kosteneinsparungen. Die ehemaligen Giebelwände müssen lediglich erweitert werden. Die Kosten für neue Innenwände und Türen werden für dieses Geschoss bedeutend reduziert. Auf diese Weise gibt der Bauherr einen Impuls zur Entlastung des angespannten Wohnungsmarktes.

Durch die Nutzung erneuerbarer Energie wird nicht nur ein Beitrag zur Energiewende geleistet, sondern auch eine Unabhängigkeit von steigenden und von der Importpolitik abhängigen Energiepreisen erzielt.

Das Szenario kann als vorteilhaft bewertet werden.



---

## 6. Effizienzsteigerung

**Effizienzsteigerung**

---

Für den anspruchsvollen Effizienzhaus Plus Standard sind sowohl end- als auch primärenergetisch negative Jahresnettoenergiebilanzen nachzuweisen. In bewohnten Altbauten mit vorgegebenen Strukturen müssen bei den Maßnahmen an der Gebäudehülle und bei der technischen Gebäudeausstattung stets Kompromisse und kreative Lösungen gefunden werden.

Im Hinblick auf eine Übertragbarkeit des Konzepts wurden weitestgehend am Markt verfügbare Strategien und Technologien angewendet. Im Rahmen des Forschungsprojekts wurden darüber hinaus Potenziale zur Steigerung der Effizienz untersucht:

- Integrale Fassade
- PV-Luftkollektor
- PV-Batteriespeicher
- Elektromobilität
- Nutzerinterface.

---

## 6.1 Integrale Fassade

---

Während eine Modernisierung der Fassade von außen erfolgen kann, sind die etablierten Strategien für den nachträglichen Einbau von Lüftungssystemen bislang noch mit Baumaßnahmen im Innenraum verbunden. Werden Komponenten der Sanierung gesondert voneinander ausgeführt, bedeutet dies zum einen immer logistische Abhängigkeiten und Unsicherheiten der verschiedenen Gewerke (Abb. 166). Zum anderen müssen Schnittstellen sorgfältig geplant werden. Dennoch besteht häufig die Gefahr, dass wesentliche Fügungen und Anschlusspunkte, wie beispielsweise die Luftdichtheitsebene, bauphysikalisch nicht sauber ausgeführt werden können.

Diese bei konventionellen Sanierungen bislang gesondert geplanten Maßnahmen haben, wenn man sie miteinander verknüpft, bedeutende Synergiepotenziale. Insbesondere die Fassade kann dazu beitragen, die bereits erwähnten ökonomischen, baubetrieblichen und baukulturellen Hemmnisse zu überwinden. Ein erhebliches Einsparpotenzial stellt die Verbesserung der Gebäudehülle in Kombination mit einer kontrollierten Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung dar. Das Ziel ist die Entwicklung eines innovativen, vorfertigbaren, integralen und dabei wirtschaftlichen Fassadensystems zur Nachrüstung im bewohnten Bestand (siehe Abb. 167).

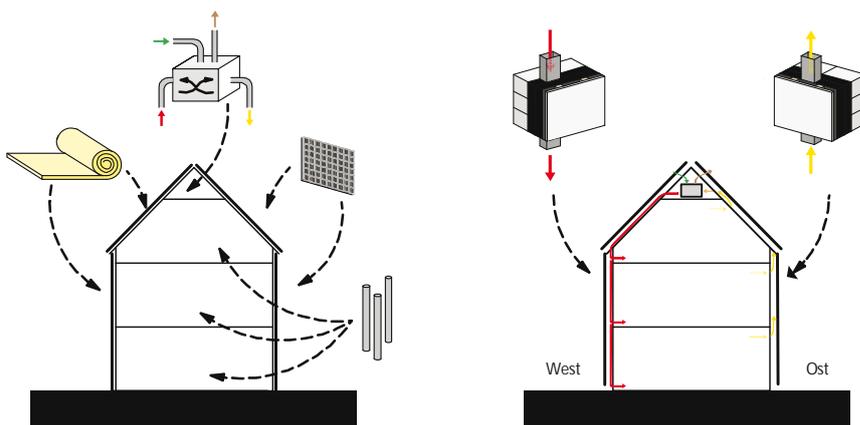


Abb. 166: konventionelle Sanierung mit einzelnen Komponenten

Abb. 167: Integrale Fassade mit zusammengefassten Elementen

Resultierende Effizienz und die Verminderung von Lüftungsverlusten und Geräuschemissionen bringen spürbare Vorteile. Das reduziert Hürden von Sanierungen und wirkt als Motor für eine steigende Sanierungstätigkeit. So kann ein kontrolliertes Lüftungssystem, integriert in der Dämmebene der Außenwand, die Leistung von Lüftungszentralen erhöhen. Einen weiteren Gewinn bildet die zusätzliche Verknüpfung mit den Potenzialen der Solarstrahlung zur Gewinnung

---

elektrischer und thermischer Energie in den Fassadenelementen. Die Planung und Montage als additives Modul reduziert den Einfluss auf die Innenräume auf ein zumutbares Minimum und verbessert so den Mieterkomfort.

Integrale Fassadensysteme, wie das hier Beschriebene, sind bislang noch nicht auf dem Markt verfügbar.

#### Umweltrelevanz

Ganzheitlich konzipierte Strategien, so wie das integrale Fassadensystem, versprechen Erfolge durch Langlebigkeit sowie ebenfalls durch den Einbezug der Rückbaubarkeit und Trennbarkeit in die Planung. Konventionelle Sanierungen setzen sich aus einer Vielzahl einzelner gesondert ausgeführter Bestandteile der Gebäudehülle, Energiegewinnung und -versorgung et cetera zusammen. Die Nachteile spiegeln sich sowohl in Logistik und Ausführung von bauphysikalisch essentiellen Fügungen als auch in den ökologischen und ökonomischen Lebenszyklusbetrachtungen wider. Durch die Verknüpfung mehrerer Komponenten kann deren Anzahl reduziert werden. Das reduziert wiederum die Umweltwirkungen bei der Herstellung, Instandhaltung und Entsorgung der Bauteile reduziert und verringert so auch den Wartungsaufwand. Zum anderen entstehen Synergieeffekte, wie beispielsweise die Reduktion der Geräuschemissionen oder die Effizienzsteigerung von Photovoltaikmodulen: Die Luft, die sich hinter den PV-Modulen erwärmt, wird durch den natürlichen thermischen Auftrieb abtransportiert. Dadurch überhitzen die Module nicht und arbeiten länger effizient. Die wiederum rückwärtig der Module vortemperierte Luft wird zu einer Lüftungszentrale geführt und erhöht damit dessen Wärmerückgewinnungsgrad. Gleichzeitig wird durch das System nicht nur die Energieerzeugung optimiert, sondern auch die Effizienz der Verteilung und Nutzung durch geringere Lüftungs- und Leitungsverluste gesteigert.

#### Darstellung eines möglichen Konzepts

Im Fritz-Dächert-Weg 56-58 befinden sich ostseitig die Ablufträume, wie Bäder und Küchen. Im Westen, zur Straße orientiert, sind Wohn- und Individualräume, die mit vortemperierter Frischluft versorgt werden müssen. Die Südfassade eignet sich am besten zur Nutzung solarer Strahlungsenergie (siehe Abb. 168).

Die bestehenden Außenwände werden mit einer zweilagigen Dämmschicht aus Steinwolle und einer vorgehängten hinterlüfteten Fassade optimiert. Abb. 169 zeigt den Verlauf der Abluftkanäle auf der Ost- und der Südfassade. Die verbrauchte, bereits vorgewärmte Luft wird im Fensterbereich angesaugt und über Flachka-

näle in der zweiten Dämmebene zur Lüftungszentrale geführt. Auf der Südseite wird die Außenluft bodennah angesaugt und ebenfalls über Kanäle zum Lüftungsgerät im Dachgeschoss geführt. Die aufsteigende Luft nimmt die rückwärtig der PV-Module entstehende Wärme auf, steigt durch den natürlichen thermischen Auftrieb nach oben und wird dort zum Lüftungsgerät geführt.

Durch dieses Abführen der warmen Luft werden die Module vor Überhitzung geschützt. Dies wirkt sich positiv auf ihre Leistung aus. Gleichzeitig wird wiederum der Wärmerückgewinnungsgrad des Lüftungsgeräts erhöht.

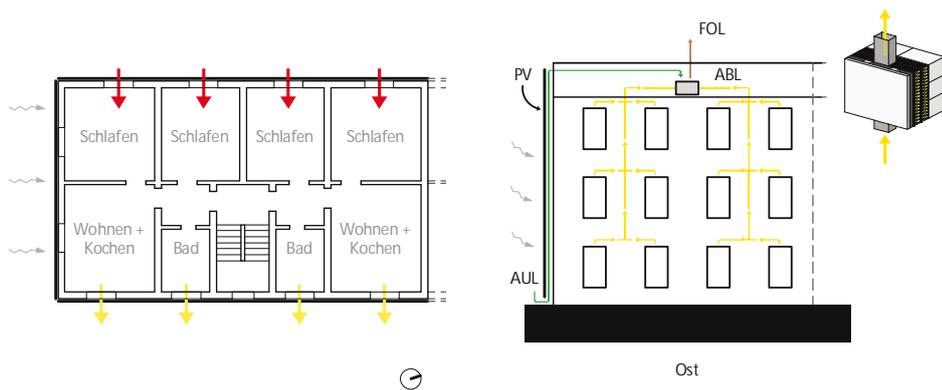


Abb. 168: Darstellung der Zu- und Ablufträume im Grundriss

Abb. 169: Schema Abluft

In Abb. 170 sind zwei mögliche Leitungsebenen für die PV-Luftkollektorelemente dargestellt. Die Kanäle könnten entweder ebenfalls in der zweiten Dämmschicht oder direkt rückwärtig der PV-Fassade in der Hinterlüftungsebene verlegt werden.

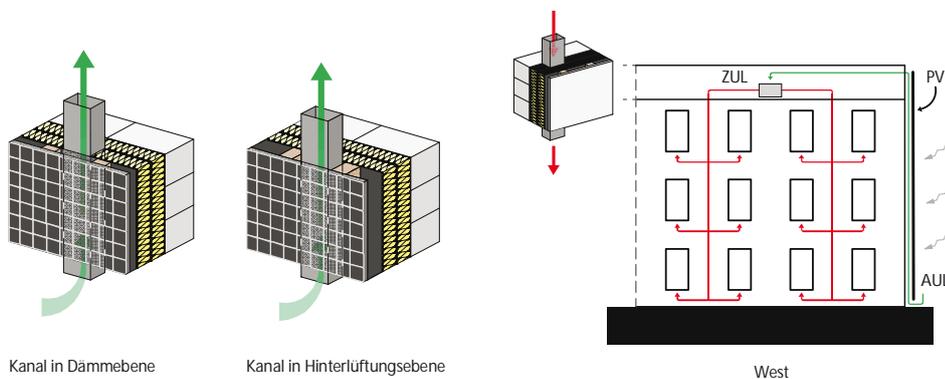


Abb. 170: Eine mögliche Positionierung der Flachkanäle für den PV-Luftkollektor

Abb. 171: Schema Zuluft

---

Westseitig wird die vortemperierte, gefilterte Luft über Flachkanäle in der ersten Dämmschicht entlang der Außenwand zu den Wohnungen geführt und im Fensterbereich eingeblasen (siehe Abb. 171). Da im Zuge von Sanierungen der Außenwände häufig auch die Fenster ausgetauscht werden, könnten diese bereits im Fassadenmodul integriert werden, sodass keinerlei Bohrungen mehr notwendig sind.

#### Ausblick

Die Fassadentechnologie als nachhaltige Innovation setzt auf eine integrale, elementierte Lösung, die wirtschaftlich, ökologisch und soziokulturell vertretbar ist. Die Serialität des Systems kann neue Impulse hinsichtlich Nutzerfreundlichkeit, Baubetrieb und Kosteneffizienz setzen. Der steigende Anreiz für Bauherrn kann für eine flächendeckende Sanierungsaktivität sorgen und somit einen wesentlichen Beitrag zum Erreichen der Klimaziele leisten.

In Kooperation mit der Planungsgemeinschaft DUO wurden bereits Lösungsansätze entwickelt. Der Ausschnitt Abb. 172 aus den Plänen in Abb. 172 zeigt erste Annäherungen an eine mögliche Strategie. Im Hinblick auf eine Vergleichbarkeit mit dem Gebäude im Fritz-Dächert-Weg 52-54, das dezentral be- und entlüftet wird, wurde mit dem Fördermittelgeber auch für das Effizienzhaus Plus im Fritz-Dächert-Weg 56-58 die Untersuchung der dezentralen Lösung vereinbart. Das Konzept mit der zentralen Lüftungsanlage wird daher hier nicht weiter verfolgt.

Im Rahmen zukünftiger Projekte können die beschriebenen Ansätze weiterentwickelt und umgesetzt werden.

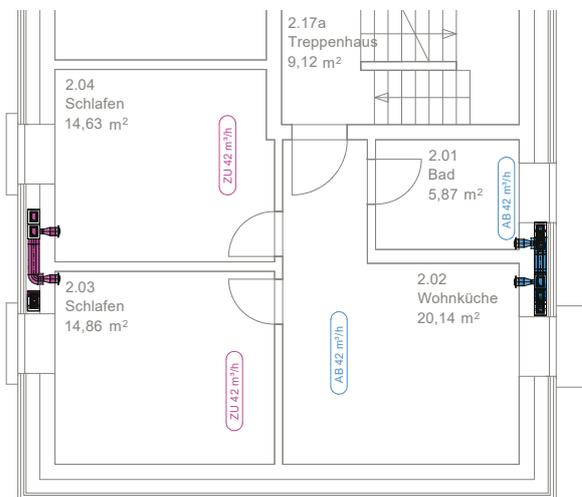
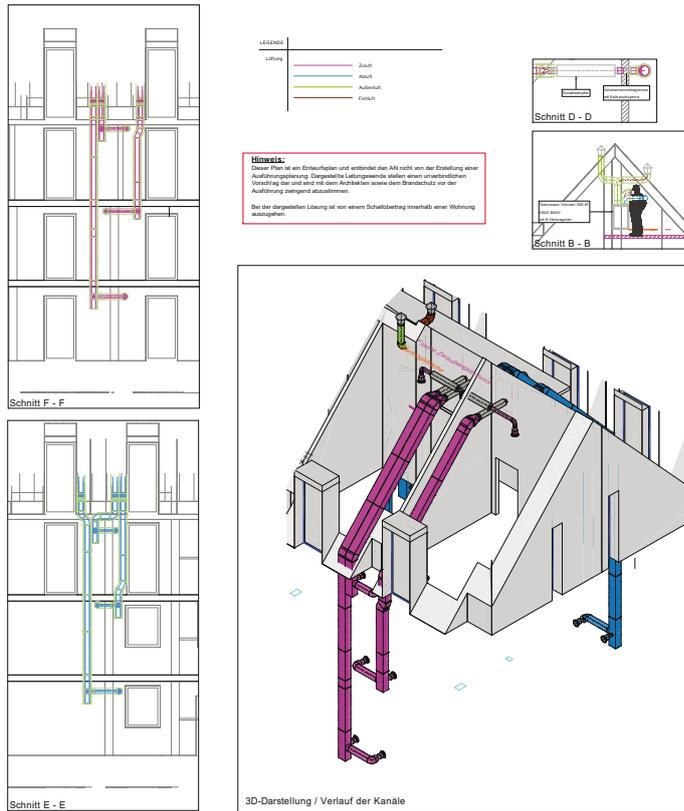


Abb. 172: zentrales Lüftungskonzept

Quelle: Planungsgemeinschaft DUO

---

## 6.2 PV-Luftkollektorfassade

---

Aufbauend auf der beschriebenen Strategie in Kapitel „4.1 Integrale Fassade“ wurden Überlegungen angestellt, inwieweit eine hinterströmte PV-Fassade den Wirkungsgrad der Wärmepumpe erhöhen kann. Exemplarisch wurde die mit PV-Modulen belegte Südfassade gewählt. Die Außenluft wird angesaugt und strömt durch Flachkanäle, die in der Hinterlüftungsebene oder in der äußeren Dämmebene verlegt werden. Die Fassadenausschnitte in Abb. 173 zeigen mögliche Positionen.

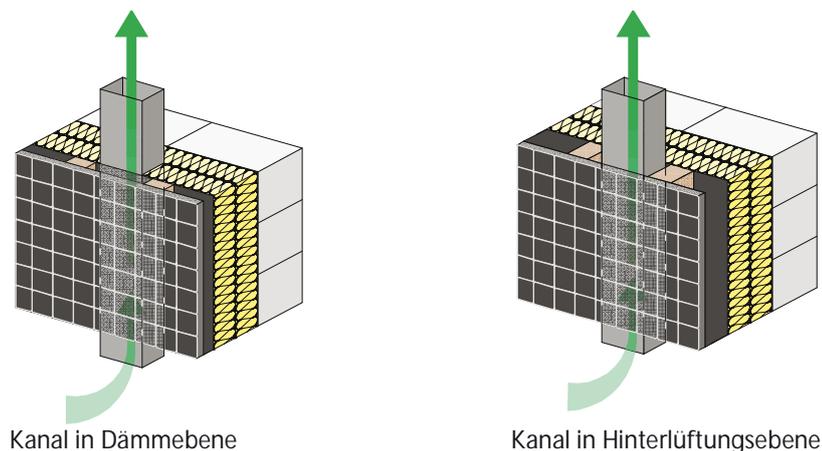


Abb. 173: Möglicher Aufbau einer PV-Luftkollektorfassade

Die aufsteigende Luft nimmt die Abwärme der PV-Module auf und kann zur Raumtemperierung genutzt werden. Dieser Synergieeffekt verhindert gleichzeitig das Überhitzen der Module und erhöht Effizienz sowie Lebensdauer der Module.

Um den Heiz- und Trinkwarmwasserbedarf des Gebäudes im Fritz-Dächert-Weg 56-58 zu decken, ist eine leistungsstarke Luft-Wasser-Wärmepumpe notwendig (zum Beispiel Vitocal 300-A AWO302.40). Es handelt sich dabei um ein Gerät zur Außenaufstellung. Hinsichtlich der Geräuschemissionen wird ein Abstand von vier bis fünf Meter zum Gebäude empfohlen. Die durch den Luftkollektor erwärmte Luft müsste folglich im Firstbereich entgegen des natürlichen Auftriebs wieder nach unten gedrückt und in den Kellerbereich geführt werden bis hin zur nördlich verorteten Wärmepumpe im Außenbereich. Die Folgen wären ein höherer Strombedarf (für den Transport in den Leitungen) sowie die Gefährdung der Effizienz der PV-Module, da sie mit warmer Luft hinterströmt würden.

Bislang sind keine vergleichbaren Systeme auf dem Markt verfügbar. Im Rahmen eines Beratungsgesprächs mit einem Projektierungsingenieur der Firma VIESSMANN stellte sich heraus, dass die Wärme zwar an das Gerät „herangebla-

sen“ werden kann, aber mehrere Argumente gegen den notwendigen Aufwand sprechen (siehe dazu Abb. 174). Zum einen wäre der Aufwand höher als der Nutzen der in der Zuluft enthaltenen Wärme bei einem Luftdurchsatz von 4.000 bis 4.500 m<sup>3</sup>/h. Zum anderen ist der Ertrag in den Sommermonaten am höchsten. Die „konventionelle“ Außenlufttemperatur würde dann ohnehin genügen. Die maximale Lufteintrittstemperatur liegt bei 35 °C. Bei Temperaturen darüber hinaus, schaltet sich die Wärmepumpe automatisch ab.

Diese Gründe betreffen ebenfalls die alternative Innenaufstellung. Dabei kommt noch hinzu, dass die erwärmte Luft nicht an das Gerät geführt kann, da die Wärmepumpe über feste Rohrverbindungen mit der Außenluft verbunden sein muss.

Die Abb. 175 zeigt die empfehlenswertere Alternative. Die Luft wird im Firstbereich abgesaugt. Die Abwärme könnte einer im Dachstuhl aufgestellten zentralen Lüftungsanlage zugeführt werden und deren Effizienz steigern. Es ist zu beachten, dass diese Funktion ausschließlich in den kühleren, aber sonnigen Wintermonaten nutzbar ist. In den warmen Jahreszeiten ist ein zusätzlicher Aufheizeffekt über die Zuluft nicht erwünscht.

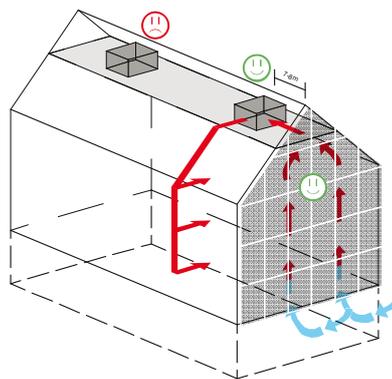
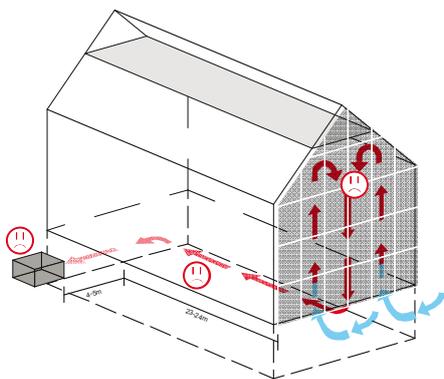


Abb. 174: Effizienzsteigerung der Wärmepumpe

Abb. 175: Effizienzsteigerung eines zentralen Lüftungsgeräts

Im vorangegangenen Kapitel wurde bereits erläutert, dass im Hinblick auf eine Vergleichbarkeit mit dem Fördermittelgeber die Untersuchung der dezentralen Lösung für beide Untersuchungsgebäude vereinbart wurde. Das Konzept mit der zentralen Lüftungsanlage wird hier nicht weiter verfolgt.

Im Rahmen zukünftiger Projekte kann der beschriebene Ansatz weiterentwickelt und umgesetzt werden.

### 6.3 PV-Batteriespeicher

Die Bundesregierung strebt bis zum Jahr 2050 eine Erhöhung des Anteils von erneuerbaren Energien am Stromverbrauch auf 80 % an. Zurzeit wird jedoch noch immer der größte Teil (65 %) durch fossile und atomare Energieträger gedeckt (AGEB 2017a). Im Gegensatz zu Energie aus erneuerbaren Quellen, sind fossile Brennstoffe begrenzt. Die Reichweite der verfügbaren Reserven wird je nach Energieträger auf 55 Jahre (Erdöl) bis 320 Jahre (Braunkohle) geschätzt (VGB POWERTECH 2017). Ein weiteres Problem bezüglich fossiler Brennstoffe sind die klimaschädlichen CO<sub>2</sub>-Emissionen und die Abhängigkeit von Importen aus dem Ausland. 2016 wurden über 70 % des Energieverbrauchs in Deutschland durch Importe gedeckt (AGEB 2017b).

Eine nachhaltige, von politischen und wirtschaftlichen Importen unabhängige Zukunft liegt in der Nutzung und dem Ausbau erneuerbarer Energien. Deren Effizienzgrade wurden und werden durch neue Technologien stetig vorangetrieben. Die wetterabhängige und jahreszeitlich bedingte Volatilität hingegen stellt noch immer ein großes Problem dar, wie das Diagramm in Abb. 176 verdeutlicht. Dargestellt sind die Ergebnisse aus der thermischen Simulation für Stromerzeugung und -verbrauch an einem typischen Tag im Frühling im Fritz-Dächert-Weg 56-58 (Szenario Aufstockung und Sanierung zum Effizienzhaus Plus). Typischerweise übersteigt insbesondere in der Mittags- und Nachmittagszeit der photovoltaisch erzeugte Strom den Energiebedarf.

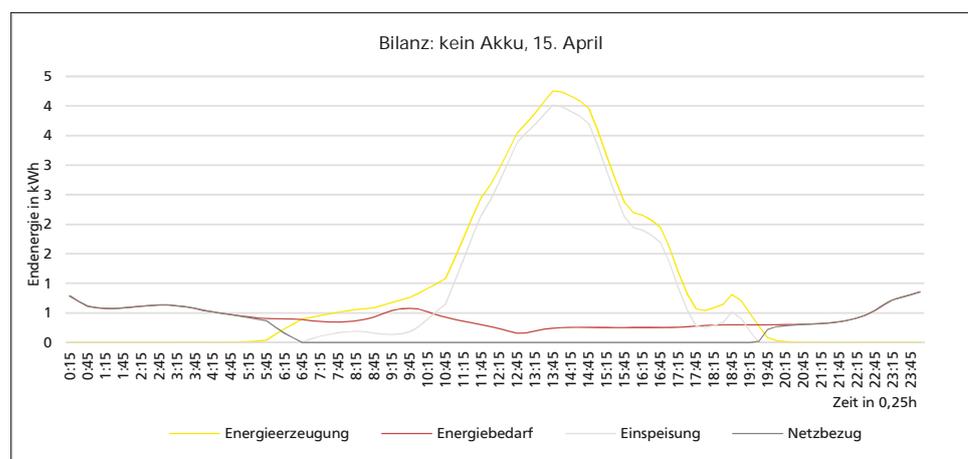


Abb. 176: Energiebilanz am 15. April

Der Jahresverlauf in Abb. 177 veranschaulicht die saisonale Diskrepanz. In den wärmeren Monaten, wenn der Wärmebedarf am niedrigsten ist, erreicht die PV-Anlage ihre maximalen Erträge.

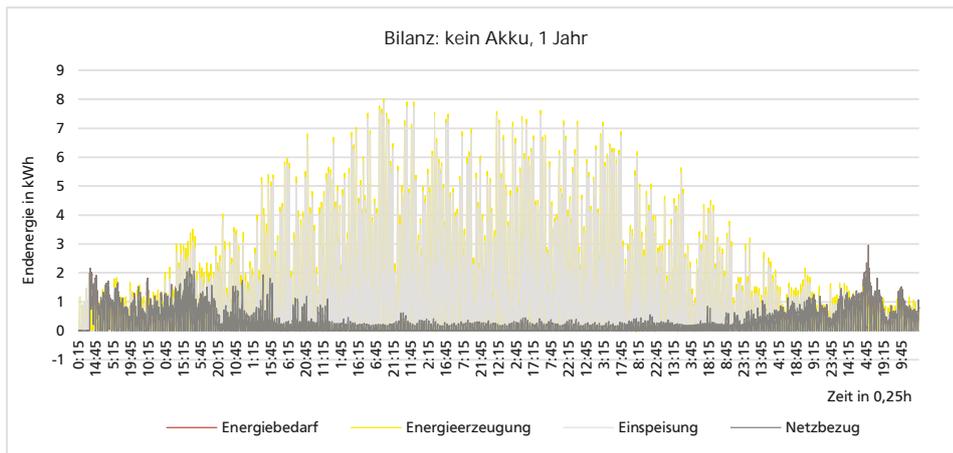


Abb. 177: Jahressimulation Stromerzeugung und -bedarf

Wird kein Strom durch die PV-Anlage produziert, wird er vom Netz bezogen. Ohne einen Speicher wird der überschüssig erzeugte Strom ins öffentliche Netz eingespeist. Angesichts der sinkenden staatlichen Zuschüsse für ins Netz eingespeisten Strom (Einspeisevergütung), wird es immer attraktiver, möglichst viel des vor Ort erzeugten Stroms selbst zu nutzen.

Das Ziel bei der Entwicklung von Bestandsgebäuden zu Effizienzhäusern Plus sollte nicht ein möglichst großer Überschuss an hauseigenem erzeugtem Strom sein, sondern möglichst viel davon im Gebäude zu nutzen.

Mithilfe eines PV-Batteriespeichers (zum Beispiel LG Chem RESU 10 auf Basis der Lithium-Ionen-Technologie) wird der überschüssig erzeugte Strom zwischengespeichert und bei einem späteren Bedarf wieder abgegeben. Neben den wirtschaftlichen Vorteilen des höheren Eigenverbrauchs, steigt die Unabhängigkeit von den tendenziell zunehmenden Strompreisen. Gleichzeitig wird ein Beitrag zur Entlastung des Stromnetzes geleistet.

#### Eigenverbrauchsanteil und Autarkiegrad

Das Potenzial eines PV-Batteriespeichers wird anhand des Eigenverbrauchsanteils (Nutzung des PV-Stroms, Abb. 178) und des Autarkiegrads oder Deckungsanteils (Deckungsanteil am Strombedarf, Abb. 179) bewertet.

Der **Eigenverbrauchsanteil** (Abb. 178) umfasst den Anteil des selbst genutzten PV-Stroms am produzierten PV-Strom. Er berechnet sich wie folgt:

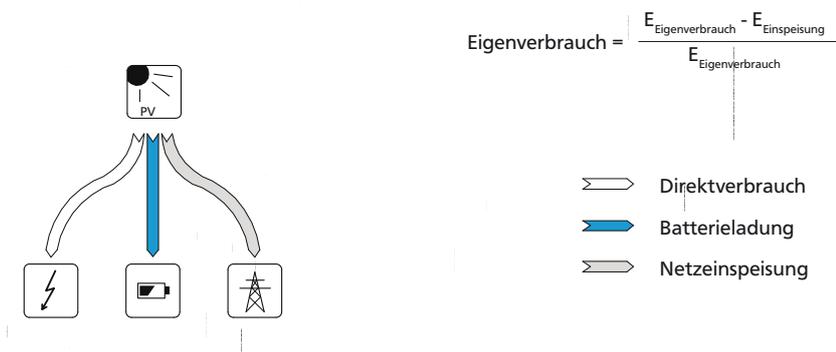


Abb. 178: Eigenverbrauchsanteil

Der **Autarkiegrad oder Deckungsanteil** (Abb. 179) ist der Anteil des selbst genutzten PV-Stroms am gesamten Stromverbrauch. Er berechnet sich wie folgt:

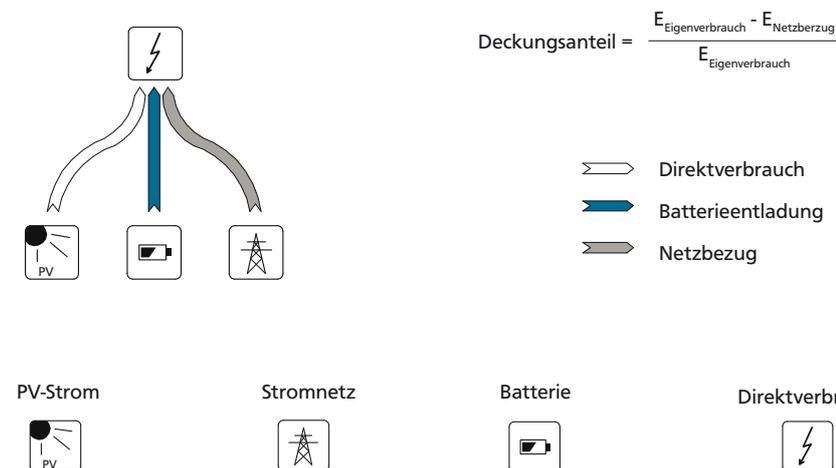


Abb. 179: Autarkiegrad / Deckungsanteil

### Bilanzierungsmodell PV-Batteriespeicher

Um die notwendigen Energieflüsse zur Bestimmung des Eigenverbrauchsanteils und des Autarkiegrads/Deckungsanteils zu ermitteln, wird ein Bilanzierungsmodell

dell nach Weißmann (WEIßMANN 2017) erstellt. So können Energieflüsse viertelstündlich erfasst und miteinander verrechnet werden.

Zunächst werden der Strombedarf und die Stromerzeugung durch die PV-Anlagen (Ostdach, Westdach, Südfassade) erfasst. Ist die Stromerzeugung höher als der Strombedarf, liegt ein Überschuss vor. Der erzeugte Strom wird dann vorrangig selbst verbraucht.

Wird mehr Strom produziert als direkt verbraucht werden kann, werden die Überschüsse zunächst zur Beladung des Batteriespeichers genutzt. Ist der Batteriespeicher vollständig aufgeladen, werden darüber hinausgehende Überschüsse ins Netz eingespeist (Abb. 180).

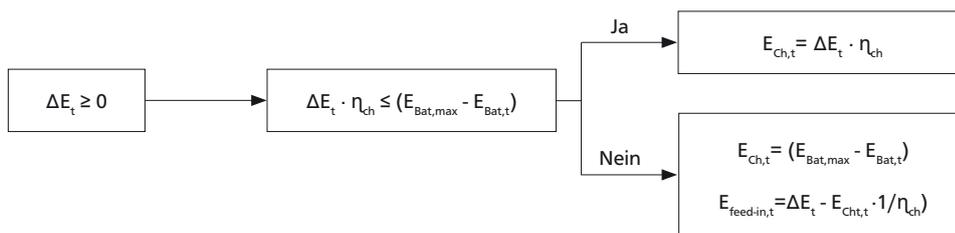


Abb. 180: Bilanzmodell Überschuss

Ist der Strombedarf höher als die Stromerzeugung, liegt eine Unterdeckung vor. Je nach Beladungszustand wird der Strombedarf zunächst aus der Batterie gedeckt. Ist die Batterie vollständig entladen, wird der verbleibende Bedarf dem Stromnetz entnommen (Abb. 181).

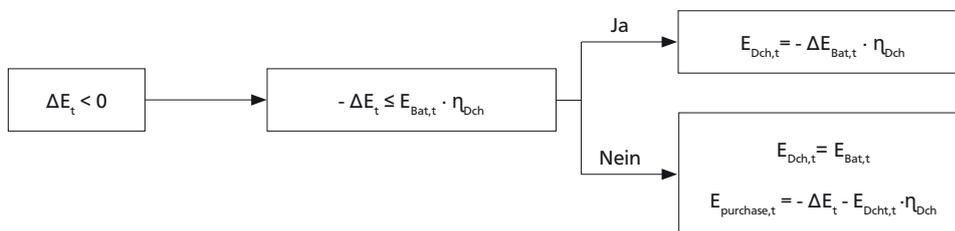


Abb. 181: Bilanzmodell Unterdeckung

Anhand der folgenden Varianten werden der Eigenverbrauchsanteil und der Autarkiegrad einander gegenübergestellt:

- Kein PV-Batteriespeicher
- 10 kWh PV-Batterie
- 20 kWh PV-Batterie.

---

Für die PV-Batteriespeicher wurden folgende Parameter zugrundegelegt:

- Maximale Ladekapazität  $E_{\text{Bat, max}}$ : 0 / 9,8 / 19,6 kWh
- Wirkungsgrad der Beladung  $\eta_{\text{ch}}$ : 0,96
- Wirkungsgrad der Entladung  $\eta_{\text{dch}}$ : 0,95
- Batterie wird vollständig beladen geliefert.

### Thermische Simulation

Mithilfe der thermodynamischen Simulation können nicht nur die Viertelstundenwerte für die PV-Erzeugung und den Endenergiebedarf ermittelt werden. In erster Linie dienen thermodynamische Gebäudesimulationen der optimalen Auslegung von Heiz- und Kühlanlagen. Sie ermöglichen eine realitätsnahe Abbildung von Prozessen, da - im Gegensatz zum genormten Standardverfahren - spezifische Parameter (Wetterbedingungen, Regelung, Belegung, Lüftungsverhalten etc.) vorgegeben und in die Berechnung einfließen.

Die thermodynamischen Simulationen im vorliegenden Projekt wurden mit der Software IDA Indoor Climate and Energy 4.8 (IDA ICE) durchgeführt. Die Grundlage bildet ein dreidimensionales Gebäudemodell, wie es in Abb. 182 dargestellt ist. Als Standort wurde Frankfurt am Main gewählt. Dieser Standort ist der nächstgelegene Standort mit verfügbaren Wetterdaten zum Untersuchungsgebäude in Darmstadt-Eberstadt.

Die Screenshots in Abb. 183 und Abb. 184 zeigen die Modelle für die Anlagen- und Lüftungstechnik.

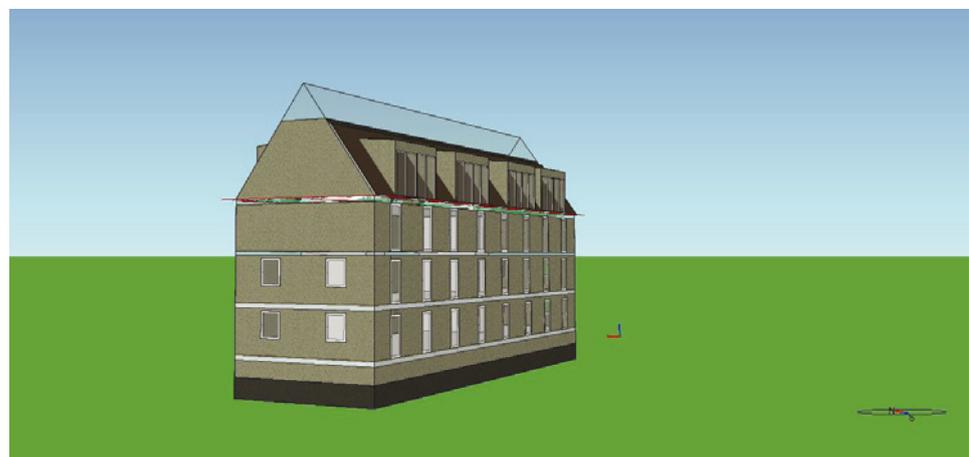


Abb. 182: Die Grundlage der thermodynamischen Simulation bildet ein vereinfachtes 3D-Gebäudemodell

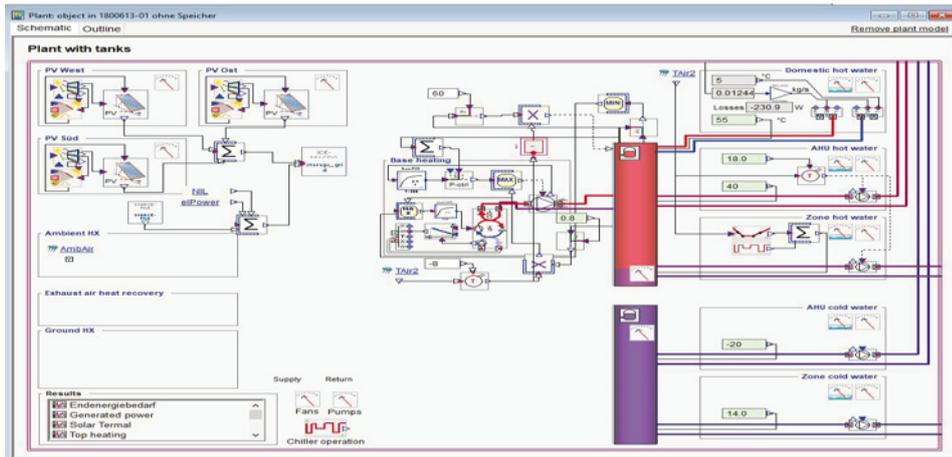


Abb. 183: Modell der Anlagentechnik

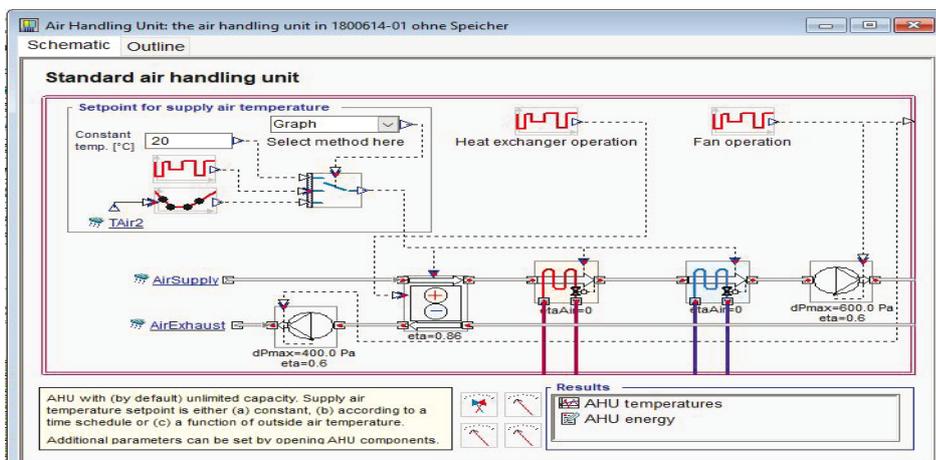


Abb. 184: Modell der Lüftungseinstellungen

## Ergebnisse

Der Einfluss der PV-Batteriespeicher auf den Eigenverbrauchsanteil und den Deckungsanteil wird exemplarisch an einem Tag im Frühling (15. April), an einem Sommertag (15. Juni) sowie an einem Tag im Herbst (15. September) verdeutlicht.

Abb. 185: Verlauf mit 10 kWh PV-Batterie am 15. April

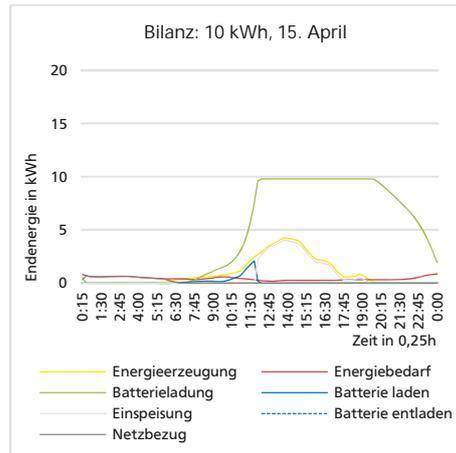


Abb. 186: Verlauf mit 20 kWh PV-Batterie am 15. April

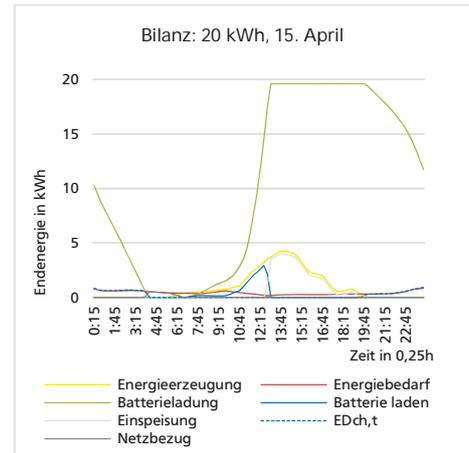


Abb. 187: Verlauf mit 10 kWh PV-Batterie am 15. Juni

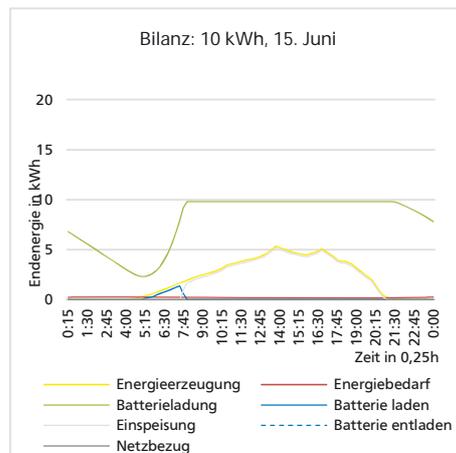


Abb. 188: Verlauf mit 20 kWh PV-Batterie am 15. Juni

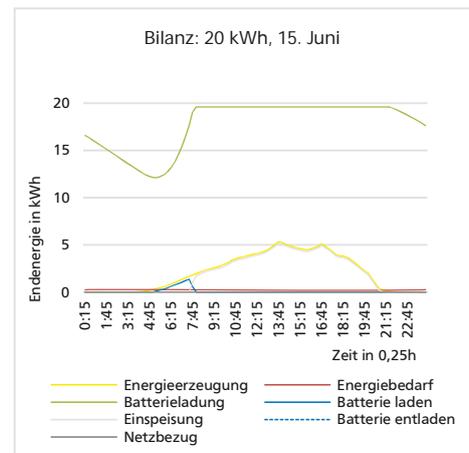


Abb. 189: Verlauf mit 10 kWh PV-Batterie am 15. September

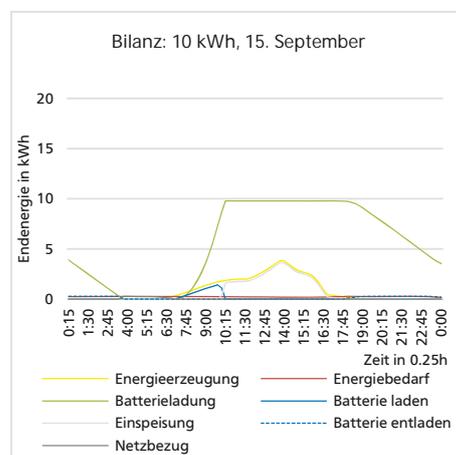
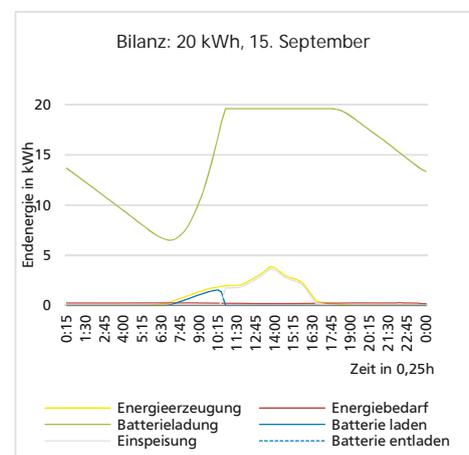


Abb. 190: Verlauf mit 20 kWh PV-Batterie am 15. September



Eine effektive und effiziente Batterienutzung zeichnet sich durch möglichst viele Ladezyklen aus. Die 10 kWh-Batterie wird an einem Frühlingstag (Abb. 185 ) und an einem Herbsttag (Abb. 189) einmal vollständig be- und entladen. Es bleiben nur geringe Zeitfenster, in denen weder erneuerbarer Strom von der Batterie oder direkt aus der PV-Anlage genutzt werden kann. Der Strombedarf wird dann durch das Netz gedeckt. An einem Sommertag (Abb. 187) werden die Potenziale der Batterie am besten ausgeschöpft. Der gespeicherte erneuerbare Strom kann die Zeiten, in denen die Sonne nicht scheint, vollständig überbrücken. Es muss kein Strom vom Netz bezogen und bezahlt werden. In der Jahresbilanz können der Eigenverbrauch und der Deckungsanteil auf fast das Doppelte erhöht werden.

Die 20 kWh-Batterie wird am effektivsten an einem Frühlingstag ausgenutzt (Abb. 186). Lediglich in den sehr frühen Morgenstunden muss Strom vom Netz zugekauft werden. Allerdings ist die Batterie bereits bis zu den Mittagsstunden vollständig aufgeladen. Überschüsse an erneuerbar produziertem Strom werden eingespeist. Vor allem im Sommer (Abb. 188) wird die Batterie nicht mal bis zur Hälfte entladen. Auch im Herbst (Abb. 190) kann das Potenzial nicht vollständig ausgeschöpft werden. Die 20 kWh-Batterie ist eindeutig überdimensioniert. Gleichwohl führt sie in der Jahresbilanz zu mehr als einer Verdopplung der Werte für Eigenverbrauch und Autarkie.

Im Diagramm in Abb. 191 sind die Ergebnisse für den Eigenverbrauchsanteil und den Autarkiegrad/Deckungsanteil der Varianten gegenübergestellt. Bereits mit einem 10 kWh-Lithium-Ionen-Akku ist eine Erhöhung von Eigenverbrauchsanteil und Autarkiegradum mehr als 40 % möglich. Mit der doppelten Speicherkapazität können die Werte nur noch um nicht mal weitere 10 % verbessert werden.

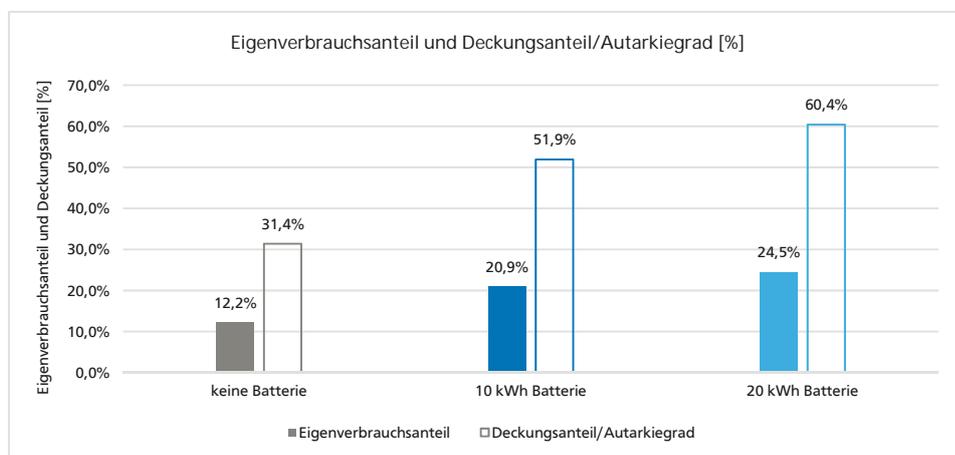


Abb. 191: Eigenverbrauchsanteil und Autarkiegrad der untersuchten Varianten

## Einfluss auf die ökologische Qualität

Lithium-Ionen-Batterien zählen zu den zurzeit am häufigsten angewendeten Batteriespeichern für Photovoltaik und auch in der Elektromobilität. Batteriespeicher sind mit einem hohen Materialaufwand verbunden. Der Gewinnungsprozess von Lithium aus Salzlauge ist begrenzt sowie bereits jetzt sehr aufwendig und flächenintensiv (zum Beispiel für die Salzlagerstätten). Auch die Herstellung der Elektrolytflüssigkeit und der Steuerungstechnik sowie die Gewinnung der metallischen Bestandteile verursachen Umweltbelastungen (CLEMM et al. 2016).

Neben der Effizienzsteigerung wird daher auch der Einfluss des Batteriespeichers auf die Ökobilanz des Szenarios „Aufstockung und Sanierung zum Effizienzhaus Plus“ überprüft. Die Technologie befindet sich momentan noch im Anfangsstadium. Daher sind in der Datenbank ökobaDat bislang lediglich numerische Informationen zur Herstellungsphase A1-A3 verfügbar (Lithium-Eisenphosphat LFP Batterie, vergleiche Tab. 16):

| WIRKUNGSINDIKATOR                                | EINHEIT                 | 10 KWH<br>PV-BATTERIE | 20 KWH<br>PV-BATTERIE |
|--|-------------------------|-----------------------|-----------------------|
| Treibhauspotenzial GWP <sub>100</sub>            | kg CO <sub>2</sub> -Äq. | 2.680                 | 5.360                 |
| Eutrophierungspotenzial EP                       | kg PO <sub>4</sub> -Äq. | 0,922                 | 1,844                 |
| Photochemisches Oxidantienbildungspotenzial POCP | kg Ethen-Äq.            | 1,09                  | 2,18                  |
| Ozonabbauopotenzial ODP                          | kg R <sub>11</sub> -Äq. | 2,79E-5               | 5,58E-5               |
| Versauerungspotenzial AP                         | kg SO <sub>2</sub> -Äq. | 12,05                 | 24,1                  |
| Primärenergiebedarf, nicht erneuerbar PENRT      | MJ                      | 37.350                | 74.700                |
| Primärenergiebedarf, erneuerbar PERT             | MJ                      | 9.802                 | 19.604                |
| Gesamtprimärenergiebedarf PET                    | MJ                      | 47.152                | 94.304                |

Tab. 16: Wirkungsindikatoren der PV-Akkus

Die Umweltwirkungen für die Entsorgung sowie Gutschriften können folglich noch nicht mit den heute zur Verfügung stehenden Informationen abgebildet werden. Laut aktueller Studien wird den Batterien ein hohes Recyclingpotenzial zugeschrieben (BUCHERT et al. 2011). Vor allem die metallurgische Aufbereitung zur Gewinnung von Lithiumhydroxid verursacht Umweltwirkungen. Gutschriften können durch das Dismantling (Zerlegung in Bestandteile und anschließendes Recycling) verzeichnet werden.

In den Diagrammen in Abb. 192 und Abb. 193 sind die Gesamtwirkungsabschätzungen des Szenarios für das Treibhauspotenzial GWP<sub>100</sub> unter Einbezug des PV-Batteriespeichers, in rot gekennzeichnet, dargestellt. Es ist zu beachten, dass

für die PV-Batterien lediglich die Herstellungsphase A1-A3 in der Berechnung berücksichtigt werden konnte (zweimal bei einer angesetzten Lebensdauer von 25 Jahren).

Es kann festgestellt werden, dass die 10 kWh PV-Batterie bereits 40 % des Treibhauspotenzials für Baukonstruktion und Anlagentechnik beansprucht (Abb. 192). Die 20 kWh PV-Batterie verursacht sogar mehr kg CO<sub>2</sub>-Äq. als Baukonstruktion und Anlagentechnik zusammen (Abb. 193). Auch wenn die Batterien die Vorteilhaftigkeit der Ökobilanz erheblich mindern, so können dennoch die Umweltwirkungen durch die Gutschriften aus erneuerbarem Strom wieder ausgeglichen werden.

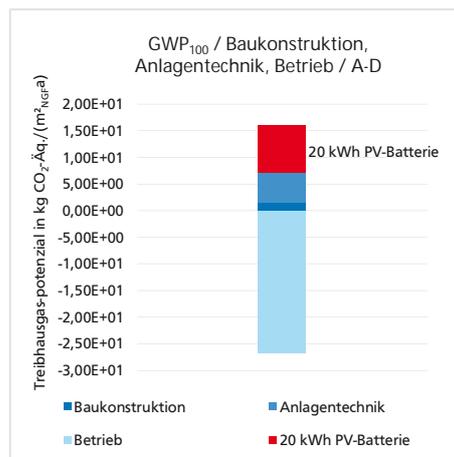
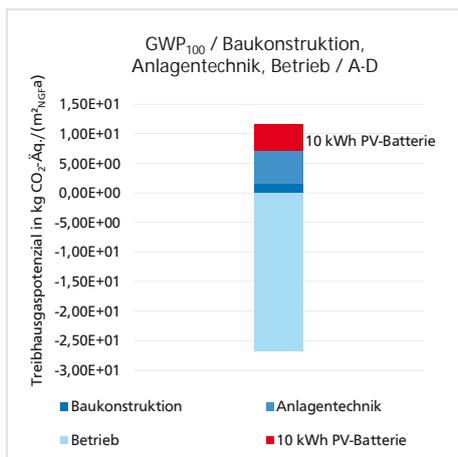


Abb. 192: Treibhauspotenzial mit 10 kWh PV-Batterie

Abb. 193: Treibhauspotenzial mit 20 kWh PV-Batterie

### Einfluss auf die ökonomische Qualität

Strom durch Photovoltaik-Anlagen unmittelbar am Gebäude selbst zu erzeugen ist historisch betrachtet eine relative junge Methode der Energiegewinnung<sup>1</sup>. Seitdem die 2012 eingeführte Einspeisevergütung für Erneuerbare Energien kontinuierlich reduziert wird, nimmt auch die Attraktivität, Strom ins Netz einzuspeisen immer weiter ab. Auch angesichts der stetig steigenden Strompreise gilt es, so viel Strom wie möglich direkt selbst zu verbrauchen. Die Nachfrage nach PV-Batteriespeichern ist bislang noch ziemlich neu und damit auch das Angebot noch gering. PV-Batteriespeicher sind folglich heute noch mit hohen Investitionen

<sup>1</sup> Bereits 600 v. Chr. wurde die Elektrizität durch Thales von Milet entdeckt. Die technische Nutzung begann etwa Mitte des 19. Jahrhunderts mit der Erfindung der ersten Dynamomaschine durch Werner Siemens.

verbunden. Daher wird überprüft, ob ein PV-Speicher wirtschaftliche Vorzüge durch den geringeren Bedarf an Netzstrom mit sich bringt.

Für den 10 kWh PV-Akku wurden von Investitionskosten in Höhe von 6.284 € angesetzt. Für den 20 kWh PV-Akku entsprechend das Doppelte <sup>2</sup>. Die angesetzten Kosten für Strom aus dem Netz (0,2 €/kWh) und die Höhe der Einspeisevergütung (0,124 €/kWh) entsprechen den Werten aus den vorangegangenen Untersuchungen. Als Berechnungsmethode wurde die statische Amortisationszeit gewählt, da hier eine überschlägige Berechnung genügt. Die statische Amortisationszeit wird wie folgt berechnet:

$$\text{Amortisationszeit} = \frac{\text{Investitionskosten}}{\text{Kostensparnis}}$$

Der zeitliche Verlauf der statischen Amortisationszeit ist in Abb. 194 dargestellt. Die Investitionskosten für den 10 kWh PV-Batteriespeicher amortisieren sich durch die Einsparungen bereits im zweiten Jahr nach dem Kauf. Die Investitionskosten für den 20 kWh-Batteriespeicher sind innerhalb von vier Jahren ausgeglichen. Die Lebensdauer eines Lithium-Ionen-Akkus wird mit 25 Jahren angesetzt. Die Kosten für die Akkus amortisieren sich also deutlich bevor sie ausgetauscht werden müssen.

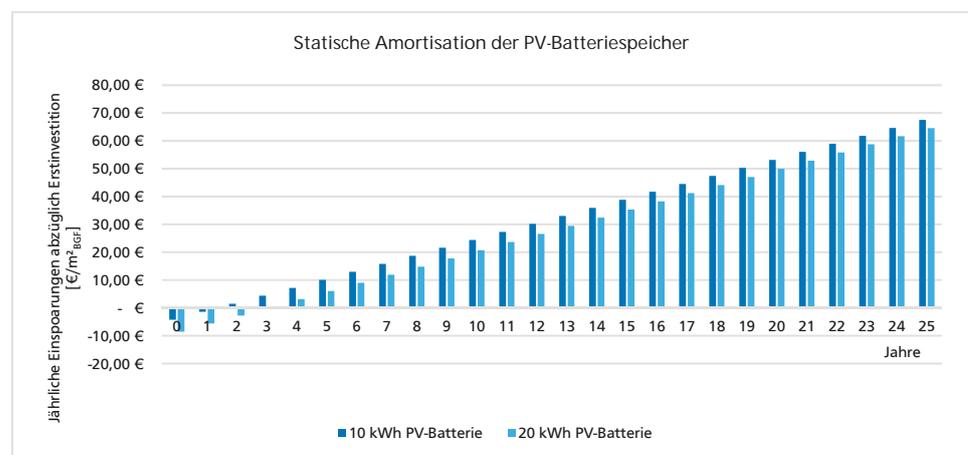


Abb. 194: Statische Amortisationszeit der PV-Batteriespeicher

---

## Fazit

Der Eigenverbrauchsanteil und der Deckungsanteil können mithilfe von PV-Batteriespeichern maßgeblich erhöht werden. Der energetische Vorteil vom 10 kWh zum 20 kWh-Speicher liegt bei weniger als 20 %. Gleichzeitig müssen aber die doppelten Investitionskosten und doppelte Umweltbelastungen in Kauf genommen werden. Gleichwohl können die Investitionskosten innerhalb des Lebenszyklus der Batterien amortisiert werden. Die ökologische Bilanz des Gesamtgebäudes wird durch eine Batterie verschlechtert, jedoch können diese Belastungen auch hier wieder ausgeglichen werden. Daraus kann geschlossen werden, dass die Speichergröße sinnvoll nach dem zu erwartenden Bedarf dimensioniert werden sollte. Ein überdimensionierter Speicher bringt weder Vorteile in ökonomischer noch in ökologischer Hinsicht. Studien schlagen als Faustformel vor: 1 kWh Speicherkapazität je 1 MWh Strombedarf (WENIGER et al. 2015). Diese Dimensionierung trifft auch im Abgleich mit den Ergebnissen der thermischen Simulation (Netzbezug ohne Batterie: 9,8 MWh/a) zu.

Ein Batteriespeicher ist eine sinnvolle Ergänzung zu strombasierten Konzepten. Zum einen werden die Preise für Strom aus dem Netz weiter steigen. Zum anderen kann von einer bedeutenden Minderung der Investitionskosten in absehbarer Zeit aufgrund der steigenden Nachfrage ausgegangen werden.

---

## 6.4 Elektromobilität

---

Der Verkehr war im Jahr 2016 mit 218 Millionen Tonnen der Hauptverursacher der klimaschädlichen CO<sub>2</sub>-Emissionen (DENA 2016). Ihn in die Planung einzu- beziehen, kann entscheidend dazu beitragen, die deutschen Klimaziele zu er- reichen. Der Fortschritt vom Effizienzhaus Plus im Gebäude zum Effizienzhaus Plus im Quartier zeichnet sich bereits ab (zum Beispiel Living Lab Wuppertal, Abb. 195). Mit dem stetig steigenden Anteil an erneuerbaren Energien bei der Stromproduktion, nimmt auch der Vorteil von Elektromotoren gegenüber Ver- brennungsmotoren weiter zu. Mit jedem Elektroauto können etwa 30 % CO<sub>2</sub>- Emissionen eingespart werden<sup>1</sup>. Das Aktiv-Stadthaus in Frankfurt (Abb. 196) stellt einen erfolgreichen Vorreiter für eine integrale Planung dar.

Abb. 195: Das Living- Lab in Wuppertal ist das erste Effizienzhaus Plus Quartier nach BMU  
Quelle: © BDF



Abb. 196: Im Aktiv- Stadthaus gibt es zurzeit drei Ladesäulen und fünf Carsharing-Modelle  
Quelle: Annekatriin Koch



Durch politische Anreize, wie die Richtlinie zur Förderung elektrisch betriebener Fahrzeuge (Umweltbonus, 2013), wird Elektromobilität immer attraktiver.

Gerade bei Mehrfamilienhäusern liegt ein großes Potenzial in E-Carsharing-Konzepten, da aufgrund der vielschichtigen Bedürfnisse je nach Angebot von einer hohen Auslastung ausgegangen werden kann. So ist beispielsweise das Vorhalten einer Ladesäule mit Stellplatz besonders attraktiv für Pendler mit Elektroautos. Ein Kontingent an E-Carsharing-Modellen kann wiederum für Menschen, die nur ab und zu ein Auto benötigen, eine Erleichterung im Alltag bringen.

Das Gebäude im Fritz-Dächert-Weg 56-58 liegt in Eberstadt nahe Darmstadt. Dort sind bislang keine Ladesäulen vorhanden. Die nächste Ladesäule befindet sich in weniger als 6 km Entfernung in Seeheim-Jugenheim. Im 10 km entfernten Zen-

---

1 Vergleich Smart for two

trum von Darmstadt gibt es zum aktuellen Zeitpunkt 5 Ladesäulen. Auf der Karte in Abb. 197 wird erkennbar, die Ladeinfrastruktur in der Umgebung bereits gut ausgebaut ist. Aufgrund des rasanten Ausbaus der Ladeinfrastruktur ist zu erwarten, dass das Netz an verfügbaren Ladesäulen in Zukunft immer dichter wird.

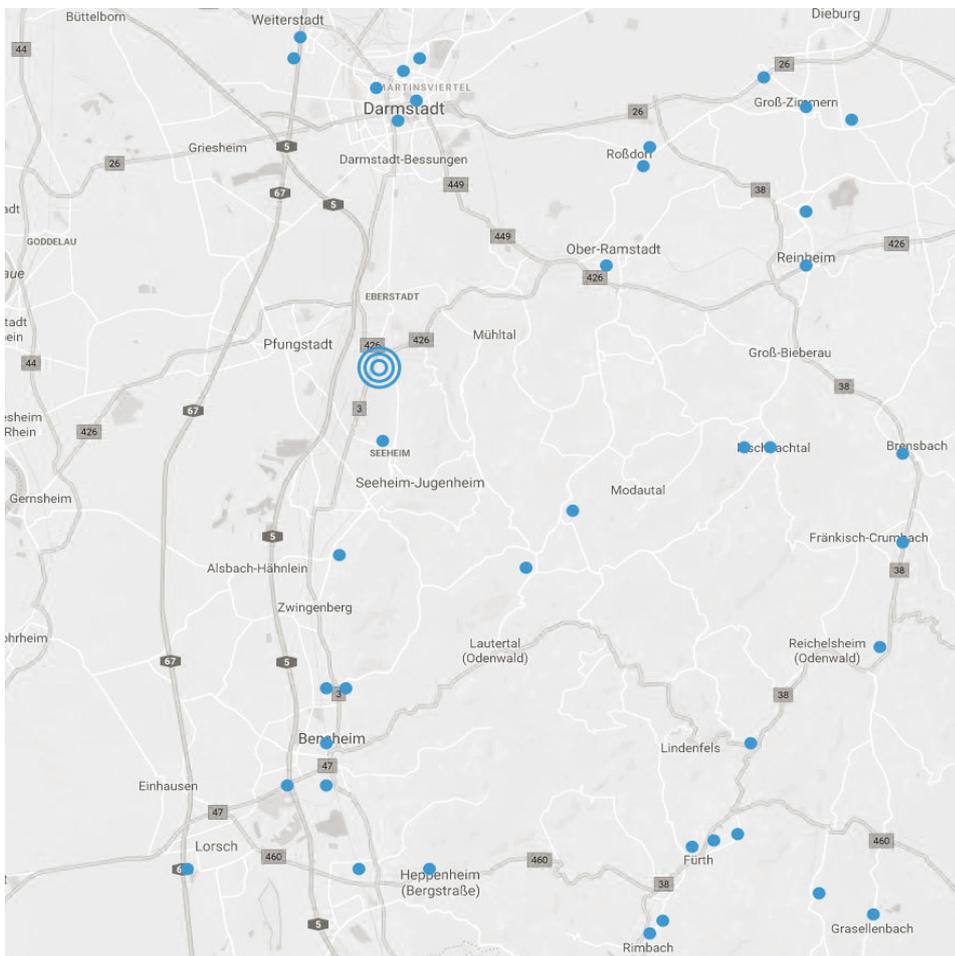


Abb. 197: Ladeinfrastruktur der Umgebung

Mit dem ÖPNV sind die Gebäude im Fritz-Dächert-Weg 52-58 von Darmstadt aus in etwa 30 Minuten über Straßenbahn und Bus erreichbar. Für die Bewohner wäre die Einbindung von Elektromobilität ein attraktives Angebot für mehr Flexibilität im Alltag. Denkbar wäre eine Flotte aus ein bis zwei Smart fortwo ED: 160 km Reichweite, 12,9 kWh je 100 km Verbrauch, 80 g/km CO<sub>2</sub>-Ausstoß (ELEKTROAUTO-NEWS.NET 2018), die über Carsharing von den Bewohnern genutzt werden können. Das Angebot ist vor allem für Studierende und Personen, die nur ab und

---

zu ein Auto benötigen, attraktiv. Im Zuge der Aufstockung müssten ohnehin neue Stellplätze nachgewiesen werden. Die Installation von zwei Ladesäulen wäre vor allem für die Bewohner des Gebäudes eine Bereicherung.

Wie bereits erläutert, ist die Ladeinfrastruktur heute weniger das Problem, sondern vielmehr die Verfügbarkeit von Stellplätzen. Somit hätten die Bewohner einen Stellplatz mit Ladeoption für eine Standzeit, die in den Innenstädten so nicht verfügbar wäre. Gerade für Pendler, wie sie in den Peripherien oft vorhanden sind, kann dies ein entscheidender Gewinn sein. Gleichzeitig wird auch die Erreichbarkeit und der Charakter der Kirchtannensiedlung aufgewertet.

Die Wirtschaftlichkeit von E-Carsharing wurde in Projekten, wie dem Aktiv-Stadthaus bereits nachgewiesen. Für das vorliegende Forschungsvorhaben wird ebenfalls die Ermittlung einer wirtschaftlich darstellbaren Lösung und Umsetzung empfohlen.

---

## 6.5 Nutzerinterface

---

Gerade in hocheffizienten Gebäuden stellt das Nutzerverhalten einen wesentlichen Schlüsselfaktor zum Erreichen der angestrebten Energiebilanz und eines hohen Eigennutzungsgrads der erzeugten Energie dar. Aus den ersten Monitoring-Ergebnissen des AktivPlus e. V. geht hervor, dass der Nutzerstromverbrauch (Haushaltsstrom) im Durchschnitt 37 % der Energiebilanz ausmacht (AKTIVPLUS E.V. 2015). Die Verteilung der Energiebedarfe für die Anlagentechnik (Hilfsenergie) und den Haushalt für die zukunftsorientierten Szenarien in Abb. 198 und Abb. 199 zeigt, dass der Haushaltsstrom mehr als die Hälfte des Strombedarfs verursacht.

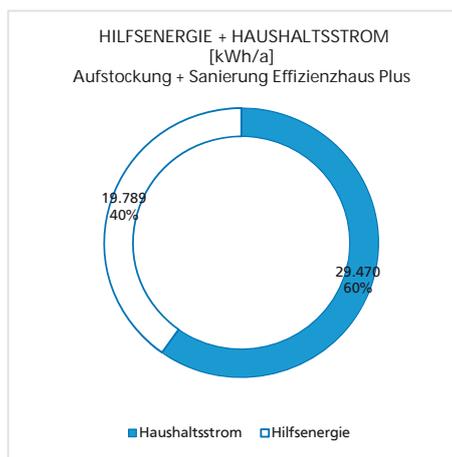
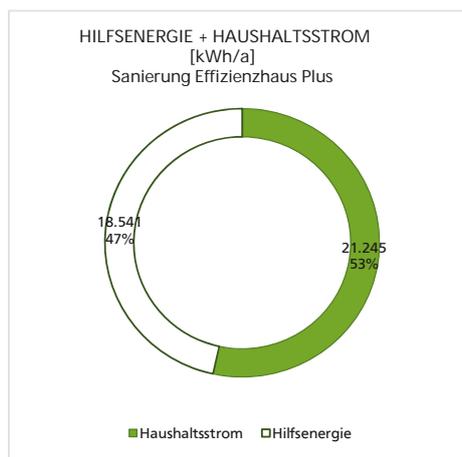


Abb. 198: Anteile Strom für Anlagentechnik und für Haushaltsstrom, Sanierung zum Effizienzhaus Plus

Abb. 199: Anteile Strom für Anlagentechnik und für Haushaltsstrom, Aufstockung und Sanierung zum Effizienzhaus Plus

Gerade in Mehrfamilienhäusern können mit Hilfe eines bewussten Nutzerverhaltens enorme Potenziale ausgeschöpft werden. Gleichzeitig sind die Herausforderungen hier besonders hoch, denn nicht von jedem Bewohner kann ein energiesparendes Verhalten erwartet werden. Zudem profitieren die Mieter nicht unmittelbar von einem höheren Eigennutzungsgrad.

Im Rahmen des im Jahr 2015 umgesetzten Forschungsvorhabens „Nutzerinterface für Plusenergie-Mehrfamilienhäuser“ (HEGGER / KOCH 2016) wurden in den 74 Wohnungen des Aktiv-Stadthauses in Frankfurt Tablets mit einer App installiert, die die Bewohner auf spielerische Art und Weise mit Informationen versorgt und zum Energiesparen motivieren soll (siehe Abb. 200). Die Bewohner erhalten in unterschiedlichen Informationstiefen unter anderem Hinweise zu ihrem Energieverbrauch, zur aktuellen Energieerzeugung oder zum Deckungsgrad der Eigenstromversorgung. Weitere Tools, wie der anonymer Hausvergleich (Ranking), Energiespartipps oder die Möglichkeit hauseigene Elektroautos zu mieten, ergänzen das Nutzerinterface und sollen die Akzeptanz steigern.



Abb. 200: In 74 Wohnungen im Aktiv-Stadthaus (links) wurden Tablets mit der Nutzerinterface-App (rechts) installiert

Quelle: Annekatriin Koch



Die Bildschirme in Abb. 201 zeigen beispielhaft Anzeigen aus dem Nutzerinterface. Der Startbildschirm (links) verschafft einen ersten Überblick. Möchte der Bewohner mehr Informationen, gelangt er auf die nächste Ebene (Mitte, Beispiel Wärme). Von dort aus ist bei einigen Menüpunkten noch eine weitere Ebene mit aufgeschlüsselten Informationen verfügbar (links, Beispiel Wärme). So kann der Bewohner sein Verhalten besser reflektieren als es ihm durch die einmal jährliche Energiekostenabrechnung ermöglicht wird. Durch den Hinweis, wann und wie viel Eigenstrom gerade produziert wird, kann er zudem sein Verhalten auf die Verfügbarkeit von hauseigenen produzierten Strom anpassen.

Das Vorhaben zielt weder auf eine Gebäudeautomation noch auf eine Bevormundung der Bewohner ab. Der Fokus liegt eindeutig in der Motivation und in der Unterstützung der Nutzer mit hilfreichen Informationen rund um das Thema Energie. Das Feedback aus zahlreichen Mieterversammlungen sowie die Ergeb-

Abb. 201: Startbildschirm, Wärme und Wärme im Detail



---

nisse aus dem sozialen und technischen Monitoring sprechen für die Zukunftsfähigkeit von Projekten, die den Nutzer in die Planung integrieren.

Im vorliegenden Fall wird ebenfalls die Installation eines solchen Informationstools empfohlen. Dabei ist der höhere Aufwand im bewohnten Bestand zu berücksichtigen. Wahrscheinlich können nicht alle technischen Messfühler installiert werden, ohne die Bewohner zu beeinträchtigen. Hier kann mit alternativen Angeboten, wie Benutzerhandbüchern in gedruckter Form oder Informationsveranstaltungen und persönlichen Beratungen zum Energiesparen im Haushalt, angesetzt werden.

Der Nutzer ist und bleibt ein wesentlicher Schlüsselfaktor. Gebäude müssen von den Menschen, die in ihnen leben, akzeptiert und geliebt werden, um in Zukunft Bestand zu haben und die Siedlung aufzuwerten.

## 6.6 Energy Plot

Strom wird zunehmend dezentral durch einzelne Gebäude erzeugt. Einzelgebäude können diese Energie nicht effizient genug direkt nutzen. Zum einen stellt die Volatilität noch immer ein Problem dar, zum anderen mangelt es bislang noch an wirtschaftlichen Speichertechnologien. In einem vorangegangenen Kapitel wurde bereits der nächste Schritt vom Effizienzhaus Plus zum Effizienzhaus Plus Quartier angedeutet. Mithilfe eines energetischen Gesamtkonzepts, das intelligent vernetzte Gebäude, Elektromobilität, Energiemanagement- und Speichersysteme integriert, kann die lokal erzeugte Energie effizient genutzt werden. Solche Quartierskonzepte sind dabei nicht ausschließlich für neu zu errichtende Gebäude attraktiv, sondern stellen vor allem ein Potenzial für Gebiete mit denkmalgeschützten Gebäuden, bei denen die Möglichkeiten einer Sanierung eingeschränkt sind, dar.

In diesem Abschnitt soll untersucht werden, inwieweit eine Vernetzung der beiden Untersuchungsgebäude im Fritz-Dächert-Weg 52 bis 58 von Vorteil ist. Exemplarisch wird hier die zusätzliche Versorgung des nach EnEV sanierten Gebäudes durch das aufgestockte und zum Effizienzhaus Plus sanierte Gebäude betrachtet. Es soll festgestellt werden, inwieweit sich der Eigennutzungsanteil des selbst erzeugten Stroms erhöhen lässt. Die Pauschale für den Haushaltsstrom wird dabei nicht berücksichtigt, da für das EnEV-Szenario eine solche Pauschale nicht angesetzt wird.

In Tab. 17 sind die Endenergiebedarfe sowie die -erzeugung der Gebäude der entsprechenden Szenarien dargestellt.

| ENDENERGIE [KWH/A]  | TOTAL  | JAN<br>01 | FEB<br>02 | MÄR<br>03 | APR<br>04 | MAI<br>05 | JUN<br>06 | JUL<br>07 | AUG<br>08 | SEP<br>09 | OKT<br>10 | NOV<br>11 | DEZ<br>12 |
|---|--------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Energiebedarf „Sanierung nach EnEV“                               | 77.444 | 12.803    | 10.865    | 9.175     | 4.827     | 2.531     | 1.837     | 1.493     | 1.494     | 2.691     | 6.209     | 10.356    | 13.163    |
| Energiebedarf „Aufstockung + Sanierung zum Effizienzhaus Plus“    | 19.789 | 3.459     | 2.813     | 2.067     | 1.128     | 488       | 432       | 418       | 423       | 849       | 1.446     | 2.686     | 3.580     |
| Energieerzeugung „Aufstockung + Sanierung zum Effizienzhaus Plus“ | 57.779 | 1.664     | 1.719     | 4.215     | 7.437     | 8.278     | 8.481     | 7.767     | 7.017     | 5.239     | 3.686     | 1.374     | 902       |

Tab. 17: Endenergiebedarfe und Endenergieerzeugung auf dem Grundstück

Sowohl anhand der Werte aus der Tabelle als auch an der grafischen Aufarbeitung in Abb. 202 lässt sich erneut die saisonale Diskrepanz aus Energieerzeugung und Energiebedarf ablesen. In den kühleren Monaten kann der Ertrag aus der PV-Anlage optimal genutzt werden. Mit Ende der Heizperiode übersteigt der Ertrag jedoch zunehmend den sinkenden Bedarf.

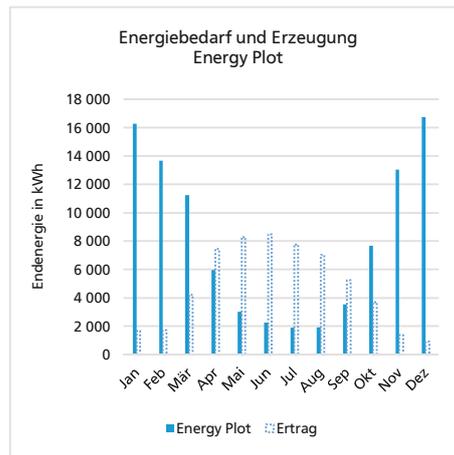
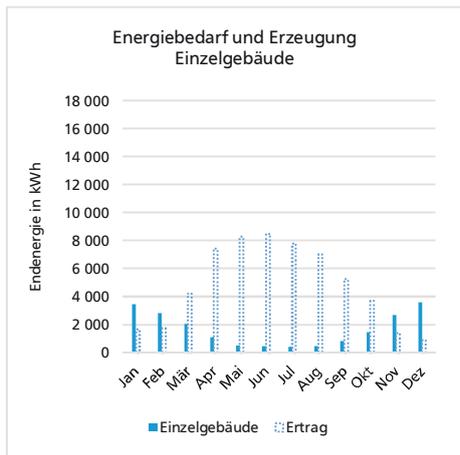


Abb. 202: Energiebedarf und -erzeugung Einzelgebäude

Abb. 203: Energiebedarf und -erzeugung Energy Plot

Der Eigennutzungsgrad gemäß EnEV § 5 des Einzelgebäudes liegt so bei lediglich 22 %.

Wird das aufgestockte und zum Effizienzhaus Plus sanierte Gebäude mit dem nach EnEV sanierten Gebäude vernetzt, kann in den Übergangszeiten und im Sommer mehr der erzeugten Energie direkt verbraucht werden. Der Eigennutzungsgrad wird auf 56 % erhöht. Am Diagramm in Abb. 203 wird deutlich, dass in den Sommermonaten sogar noch weitere Gebäude versorgt werden könnten (vom Energy Plot zum Quartier, Abb. 204).



Abb. 204: Vernetzung zum Energy Plot und Quartier

Bezüglich der dargestellten Ergebnisse kann das Potenzial der intelligenten Vernetzung von Gebäuden auf einem Grundstück (Energy Plot) bis hin zum Quartier nachgewiesen werden. Dies kann als besonderes Synergiepotenzial des Effizienzhaus Plus Standards hervorgehoben werden.

---

Warum wird dieses Potenzial nicht bereits flächendeckend genutzt? Der Trend zum Effizienzhaus Plus ist noch sehr jung<sup>1</sup>. Dementsprechend sind auch die gesetzlichen Regelungen noch nicht angepasst, sodass die Vernetzung zurzeit noch mit einem erheblichen bürokratischen Aufwand verbunden ist. Dies schreckt viele Eigentümer zunächst ab. Doch auch hier treiben Forschung und Entwicklung neue Konzepte für eine unkomplizierte Stromvermarktung voran.

---

<sup>1</sup> Das erste eigene Modellgebäude der Bundesregierung entstand erst 2011 in Berlin.





---

## 7. Schlussbetrachtung

Schlussbetrachtung

---

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der energetischen, ökologischen und ökonomischen Untersuchungen gegenübergestellt und bewertet. Damit soll eine Entscheidungsgrundlage für Investoren, Bauherren und Planer für zukünftige Projekte erstellt werden. Die Gegenüberstellung bildet gleichzeitig die Basis für eine Abschätzung der Umweltauswirkungen bei einer Übertragung des Konzeptes auf Geschosswohnungsbauten der Baualtersklasse 1949 bis 1978 in Deutschland. Darauf aufbauend kann der Entlastungsbeitrag zu den deutschen Klimazielen abgeschätzt werden.

---

## 7.1 Gegenüberstellung und Bewertung der Ergebnisse aus den energetischen, ökologischen und ökonomischen Untersuchungen

---

### 7.1.1. Energetische Qualität

Die Ergebnisse aus den Untersuchungen des unsanierten Bestands und der drei Szenarien werden einander gegenübergestellt.

#### Transmissionswärmeverluste

Abb. 205 zeigt die Werte für die Transmissionswärmeverluste. Bereits mit einer konventionellen Sanierung nach Energieeinsparverordnung ist eine Verbesserung um 63 % realisierbar. Durch die zukunftsorientierte Sanierung zum Effizienzhaus Plus kann der Wert um weitere 31 % reduziert werden, sodass die Transmissionswärmeverluste bei nur noch ein Viertel des ursprünglichen Wertes liegen. Die Verbindung des Effizienzhaus Plus-Standards mit einer Aufstockung sorgt für die höchste Reduktion der Transmissionswärmeverluste und stellt sich hier somit als das vorteilhafteste Szenario heraus. Dies ist vor allem auf die minimalen Wärmeverluste durch die neuen Außenwände und das Dach zurückzuführen.

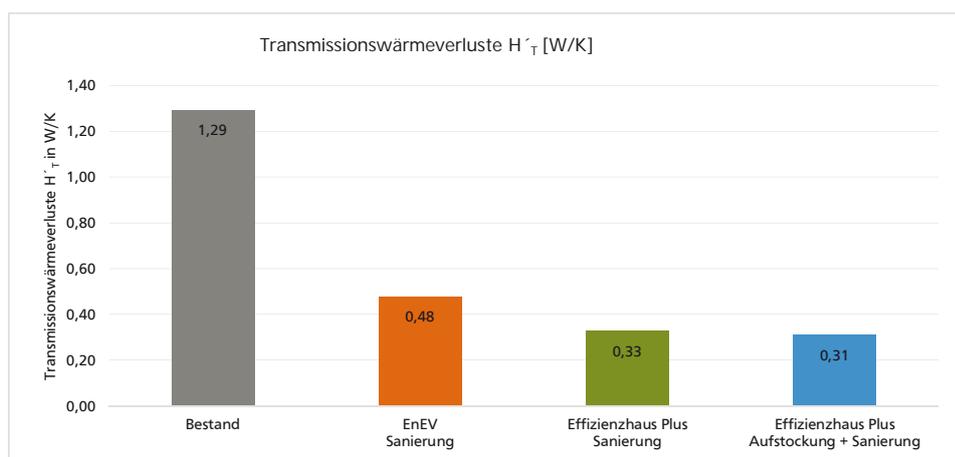


Abb. 205: Gegenüberstellung der Transmissionswärmeverluste

#### Endenergiebedarf

Die Ergebnisse des Endenergiebedarfs in Abb. 206 zeigen erneut, dass bereits im Zuge einer konventionellen Sanierung nach Energieeinsparverordnung be-

deutende Einsparungen möglich sind. Bei der Endenergie handelt es sich um die Energiemenge, die der Energiekostenabrechnung zugrunde liegt. Für die Mieter bedeutet das eine spürbare Senkung der Betriebskosten. Die zukunftsorientierten Szenarien erreichen die geforderten Energiebilanzen von weniger als 0 kWh/(m<sup>2</sup>a).

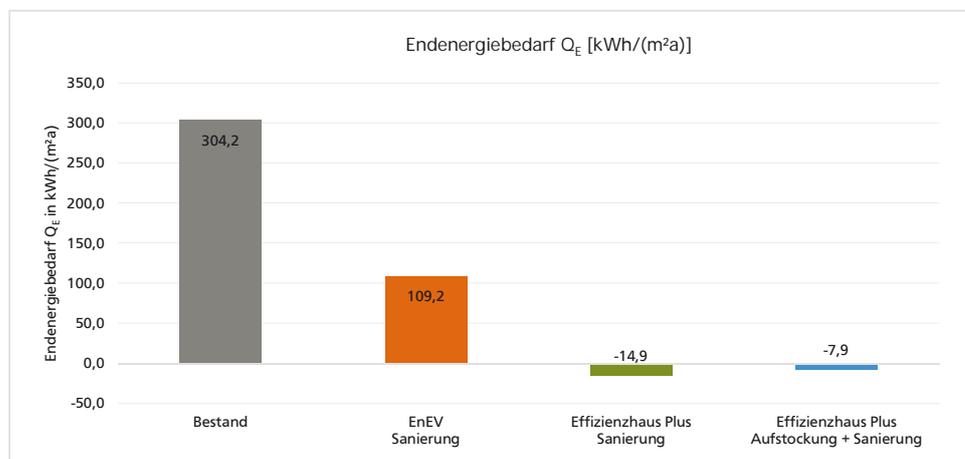


Abb. 206: Gegenüberstellung der Jahres-Endenergiebedarfe

In diesem Bereich ist noch einmal darauf hinzuweisen, dass durch das BMU eine Pauschale für Haushaltsstrom auf die Ergebnisse anzurechnen ist. Sie erhöht den Endenergiebedarf auf mehr als das Doppelte (Abb. 207, Abb. 208). Für den Bestand und die Sanierung nach EnEV ist diese Pauschale nicht gefordert. Dadurch haben sie einen rechnerischen Vorteil.

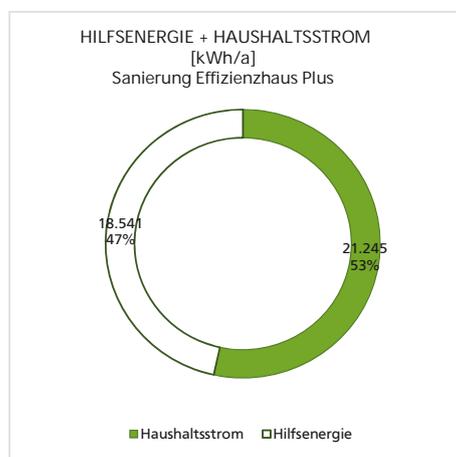


Abb. 207: Anteile Nutzerstrom und Hilfsenergie für das Szenario Sanierung zum Effizienzhaus Plus

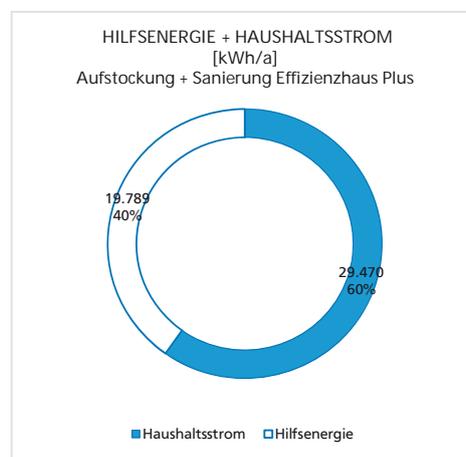


Abb. 208: Anteile Nutzerstrom und Hilfsenergie für das Szenario Aufstockung und Sanierung zum Effizienzhaus Plus

## Primärenergiebedarf

Beim Primärenergiebedarf in Abb. 209 zeigen sich analoge Ergebnisse wie beim Endenergiebedarf.

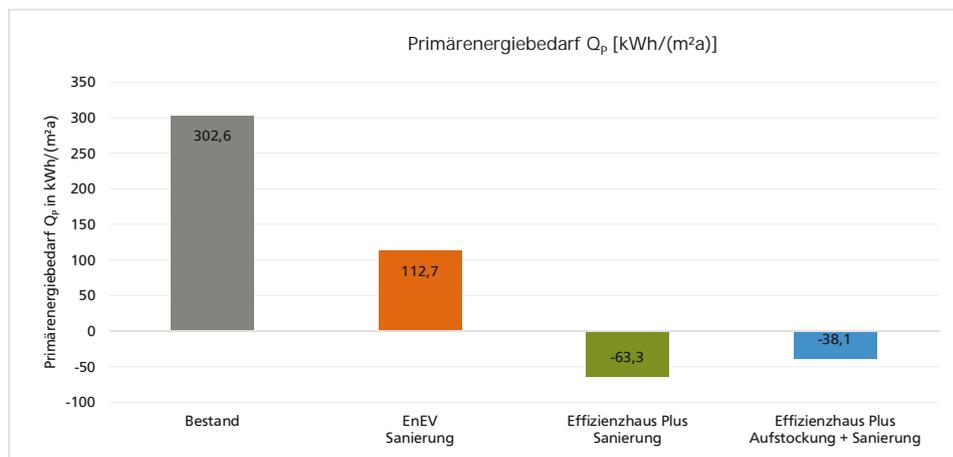


Abb. 209: Gegenüberstellung der Jahres-Primärenergiebedarfe

## Bewertung

Das Ziel der Untersuchungen zur energetischen Qualität ist die transparente Gegenüberstellung der Transmissionswärmeverluste sowie der End- und Primärenergiebilanzen im Zusammenspiel mit der Planung der möglichen Maßnahmen im Bestand.

Bei der Gegenüberstellung der zukunftsorientierten Szenarien mit dem unsanierten Bestand und der Sanierung nach Energieeinsparverordnung konnte ein rechnerischer Nachteil durch die Haushaltsstrompauschale für die zukunftsorientierten Szenarien festgestellt werden, wodurch der Effizienzhaus Plus Standard schwerer zu erreichen ist. Beim Bestand und der Sanierung nach EnEV fließt nur der Hilfsenergiebedarf der Anlagentechnik in die Berechnungen ein. Die Haushaltsstrompauschale führt dazu, dass eine PV-Anlage zur Stromerzeugung auf dem Dach nicht ausreicht. Das Konzept zur Aufstockung sieht großzügigere Dachgauben zugunsten von mehr Wohnfläche und Komfort vor. Dadurch geht energetisch nutzbare Dachfläche verloren. Die Südfassade muss ebenfalls zur Energieerzeugung aktiviert werden. Dies wirkt sich wiederum auch auf die architektonische Gestaltung aus. Die architektonische und energetische Bestandentwicklung stellt sich als iterativer Prozess heraus und beeinflusst ebenfalls die ökonomischen und ökologischen Untersuchungen.

Gleichwohl konnte nachgewiesen werden, dass negative Jahresenergiebilanzen im Zuge einer Bestandsentwicklung realisierbar sind.

Das Netzdiagramm (Abb. 210) zeigt, dass die zukunftsorientierten Szenarien bezüglich der Eigennutzung des regenerativ erzeugten Stroms etwa gleichwertig sind. Bei der Aufstockung kann ein geringfügig höherer Eigennutzungsgrad von 0,54 durch die zusätzliche Wohnfläche erzielt werden.

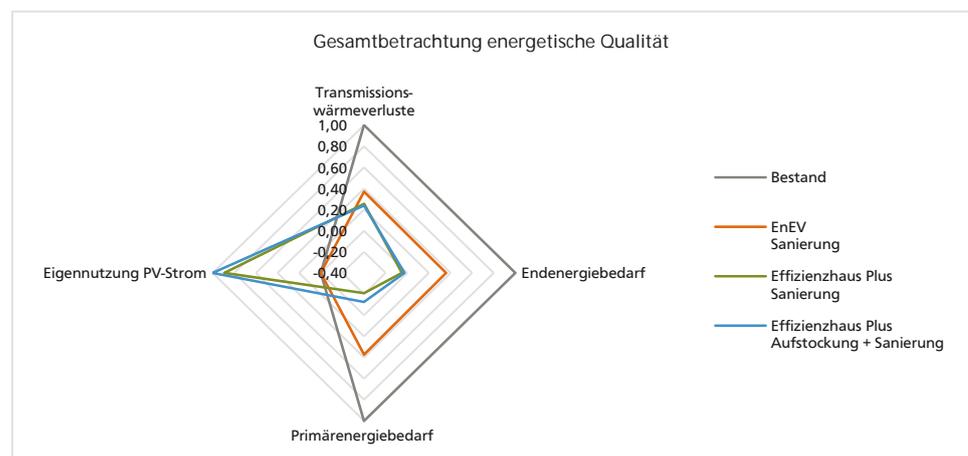


Abb. 210: Gesamtbetrachtung der energetischen Qualität

Hier wird ein großes Synergie-Potenzial des Effizienzhaus Plus Standards sichtbar. Die Gutschrift des erneuerbaren Stroms kann bei einer gemeinsamen Betrachtung der Gebäude auf einem Grundstück als eine Art Quartier dem EnEV-Gebäude zugute kommen (siehe auch „6.6 Energy Plot“). Solche Quartierskonzepte werden immer wichtiger, denn nicht alle Gebäude können und dürfen auf dieses hocheffiziente Niveau entwickelt werden. Besonders denkmalgeschützte Gebäude können von solchen Potenzialen profitieren.

### 7.1.2. Ökologische Qualität

Die Ergebnisse aus den Untersuchungen der drei Szenarien werden einander und dem unsanierten Bestand gegenübergestellt. Damit wird eine transparente Grundlage für Entscheidungen, die sich an der umweltbezogenen Qualität von alternativen Konzepten orientieren, geschaffen. In diesem Kapitel werden stellvertretend die Ergebnisse von Treibhauspotenzial und Gesamt-Primärenergiebedarf dargestellt. Zum einen bilden sie die Ergebnisse der gesamten Betrachtung repräsentativ ab. Zum anderen handelt es sich um die in der Öffentlichkeit am meisten diskutierten Indikatoren.

## Treibhauspotenzial GWP<sub>100</sub>

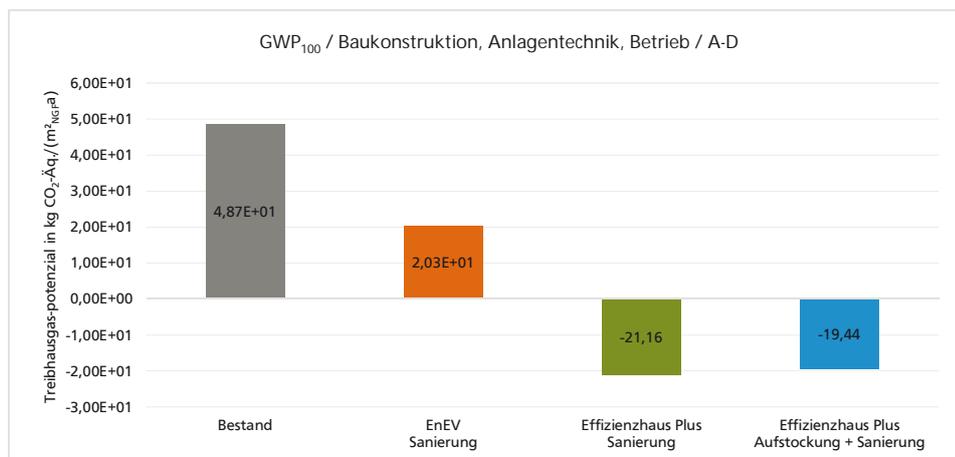


Abb. 211: Gesamtwirkungsabschätzung GWP<sub>100</sub>

Aus der vergleichenden Darstellung in Abb. 211 geht hervor, dass die Höhe des Treibhauspotenzials vorrangig von der Betriebsweise der Gebäude abhängig ist. Der mit einem Gas-Spezialkessel geführte Gebäudebestand verursacht seit 60 Jahren jedes Jahr schädliche CO<sub>2</sub>-Emissionen in Höhe von etwa 50 Tonnen. In Summe sind das über 3.000 Tonnen CO<sub>2</sub> je Gebäude. Mit einer konventionellen Weiterentwicklung nach Energieeinsparverordnung 2016 können die Emissionen bereits um fast die Hälfte reduziert werden.

Bei den Konzepten für das Effizienzhaus Plus kann durch die Gutschrift für den erneuerbar gewonnenen PV-Strom das verursachte Treibhauspotenzial mehr als ausgeglichen werden. Das Szenario der Entwicklung zum Effizienzhaus Plus kommt auf eine Bilanz von jährlich -21 Tonnen CO<sub>2</sub> und ist folglich das vorteilhafteste in dieser Kategorie. Das Szenario, in dem das Gebäude zusätzlich aufgestockt wird, erreicht eine Bilanz von -19 Tonnen CO<sub>2</sub>, da neben der dachintegrierten PV-Anlage auch eine Fassade mit PV-Modulen belegt werden muss.

Die PV-Anlage wird als Hauptverursacher bei der Anlagentechnik identifiziert. Der gesamte Herstellungsprozess von der Gewinnung des Siliziums aus Quarzsand bis zur Herstellung der Solarzelle und dem fertigen PV-Modul ist heute noch sehr aufwendig. Nicht unerheblich sind auch die Umweltwirkungen aus der gläsernen Frontscheibe eines jeden Moduls. Sowohl die Automatisierung als auch der Wirkungsgrad der Module werden stetig verbessert, wodurch auch von einer positiven Entwicklung der umweltbezogenen Qualität ausgegangen werden kann.

Bei der Verteilung des Treibhauspotenzials auf Baukonstruktion und Anlagentechnik in Abb. 212 ist bereits auf den ersten Blick erkennbar, dass die Anlagentechnik bei den zukunftsorientierten Szenarien den Großteil verursacht. Dies ist vor allem auf die PV-Anlage zurückzuführen. Für den Effizienzhaus Plus-Standard ist generell oft mehr technische Ausstattung notwendig als bei einer konventionellen Sanierung nach EnEV 2016. Dort resultiert der Großteil aus den baukonstruktiven Maßnahmen. Hauptverursacher ist hier das Wärmedämmverbundsystem.

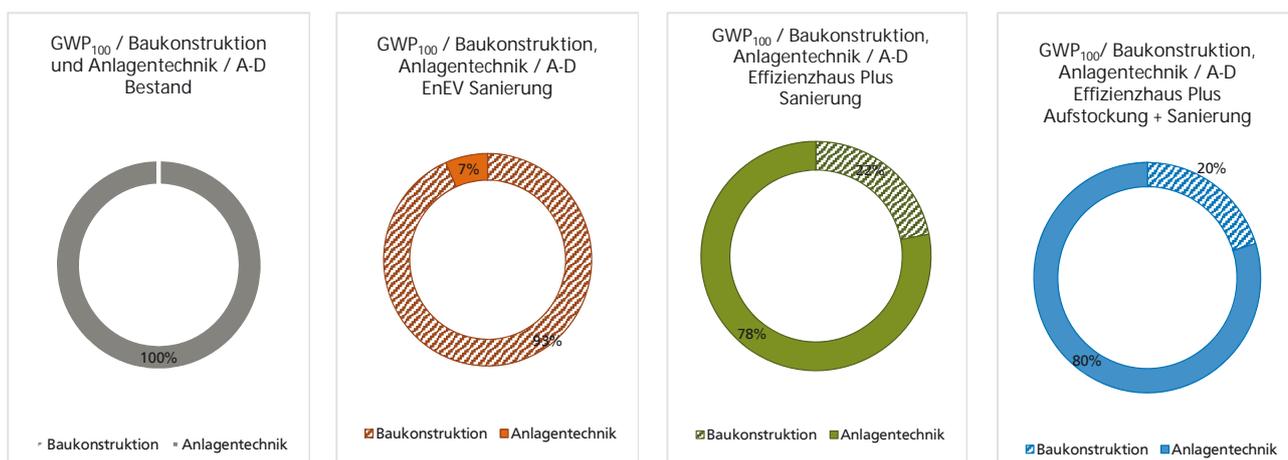


Abb. 212: Verteilung Wirkungsabschätzung GWP<sub>100</sub> Bauteile und Anlagentechnik

In der detaillierten Betrachtung der einzelnen Komponenten und Lebenszyklusstadien in Abb. 213 zeichnet sich der Einfluss der Langlebigkeit von Material und technischer Ausstattung ab. Da beispielsweise die Fenster und die Photovoltaikanlage innerhalb des Betrachtungszeitraums ersetzt werden müssen, werden nicht

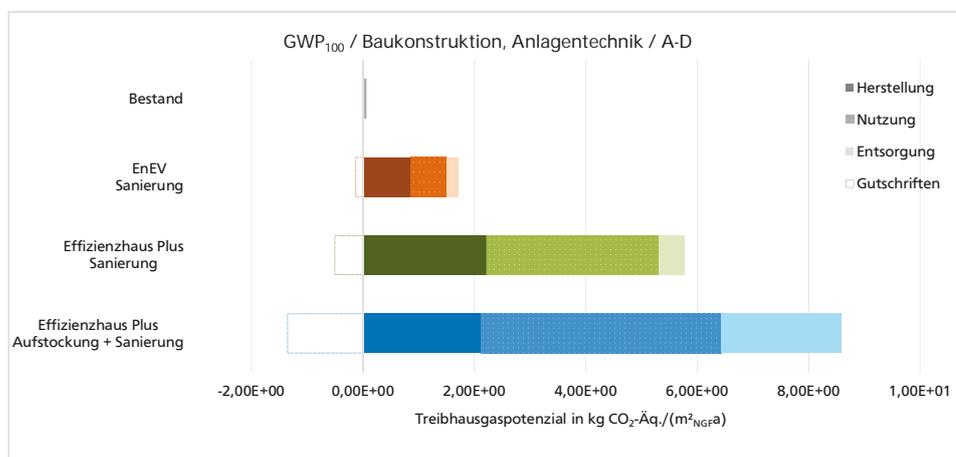


Abb. 213: Gesamtwirkungsabschätzung GWP<sub>100</sub> nach Phasen und Gruppen

nur in der Herstellungsphase, sondern auch in der Nutzungsphase Umweltwirkungen verursacht. Der erhöhte Dämm- und Technikstandard für die zukunftsorientierten Szenarien im Vergleich zum konventionellen EnEV-Standard wird auch hier noch einmal klar herausgearbeitet. Bei dem Szenario der Aufstockung und Weiterentwicklung zum Effizienzhaus Plus wird zusätzlich der Einfluss der Materialwahl nach ökologischen Kriterien deutlich. Die Aufstockung ist in reiner Holzbauweise ausgeführt. Die Gutschriften des nachwachsenden Rohstoffs Holz begünstigt die Bilanz.

### Gesamtprimärenergie PET

Die Gegenüberstellung des Gesamtprimärenergiebedarfs in Abb. 214 zeigt ein weiteres Mal den maßgeblichen Einfluss der Betriebsweise von Gebäuden. Der unsanierte Bestand kommt auf einen Gesamtprimärenergiebedarf von über  $809 \text{ MJ}/(\text{m}^2_{\text{NGF}}\cdot\text{a})$ . Davon liegt der erneuerbare Anteil bei lediglich 0,5 %. Die konventionelle Weiterentwicklung nach Energieeinsparverordnung benötigt mit  $300 \text{ MJ}/(\text{m}^2_{\text{NGF}}\cdot\text{a})$  etwa 60 % weniger Gesamtprimärenergie. Auch hier liegt der erneuerbare Anteil bei nur 3 %. Die zukunftsorientierten Szenarien benötigen lediglich für Baukonstruktion und Anlagentechnik Primärenergie. Diese kann durch die Gutschriften des regenerativ erzeugten PV-Stroms wieder mehr als ausgeglichen werden.

Insgesamt kommt die Weiterentwicklung zum Effizienzhaus Plus somit auf eine Bilanz von  $-303 \text{ MJ}/(\text{m}^2_{\text{NGF}}\cdot\text{a})$ . Die Bilanz der Aufstockung und Weiterentwicklung zum Effizienzhaus Plus kommt auf  $-268 \text{ MJ}/\text{m}^2_{\text{NGF}}\cdot\text{a}$ . Der Großteil ist hier erneuerbare Primärenergie.

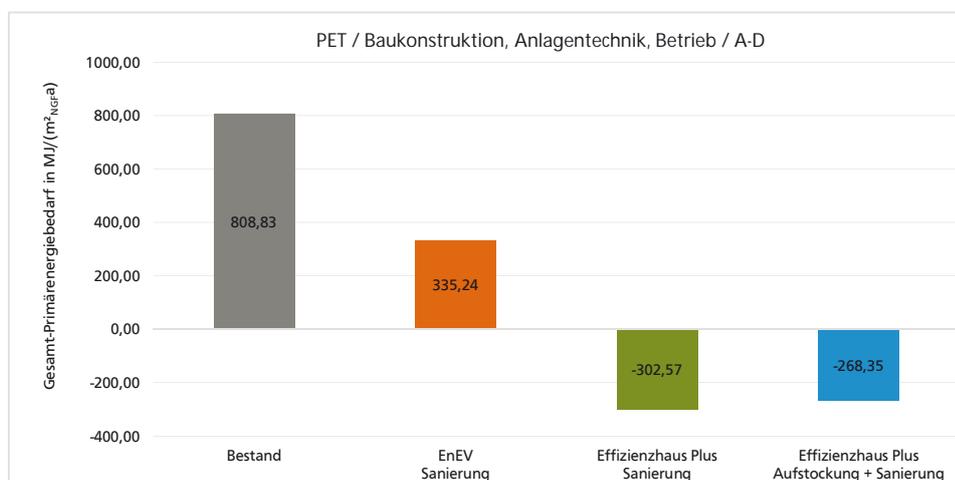


Abb. 214: Gesamtwirkungsabschätzung PET

Die Ringdiagramme in Abb. 215 zeigen vergleichbare Ergebnisse wie beim Treibhauspotenzial. Die Untersuchung der Bauteile und technischen Komponenten in den Lebenszyklusphasen in Abb. 216 verzeichnen ebenfalls analoge Ergebnisse wie beim Treibhauspotenzial.

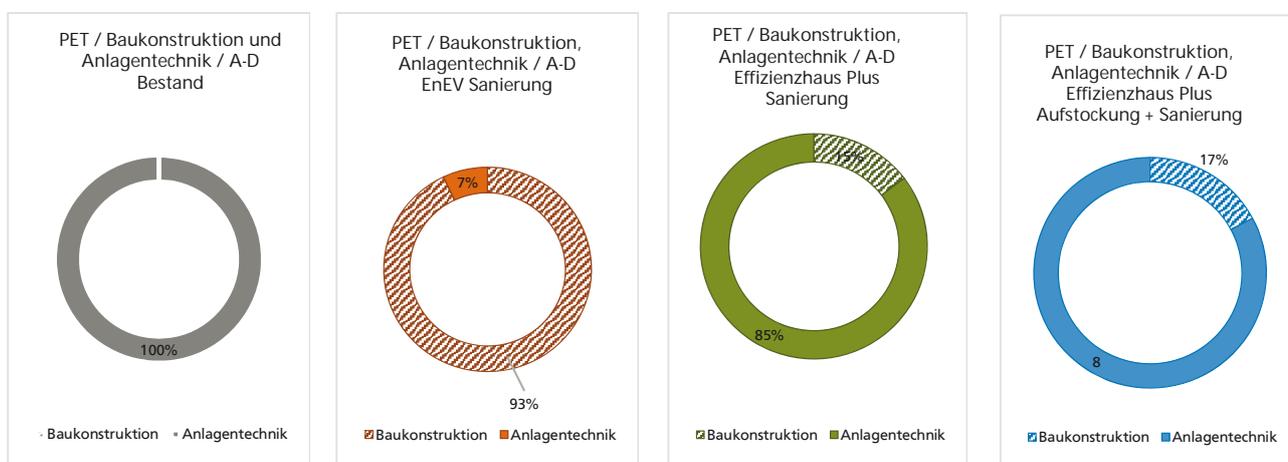


Abb. 215: Verteilung Wirkungsabschätzung PET Bauteile und Anlagentechnik

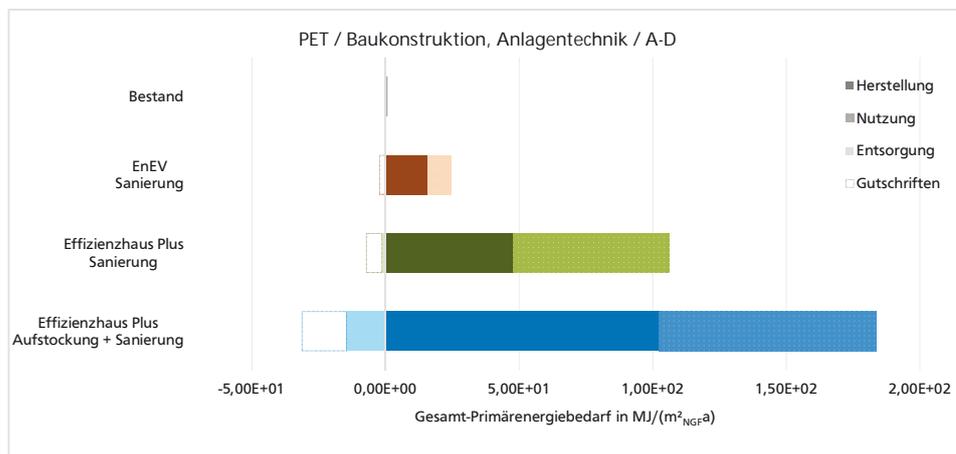


Abb. 216: Gesamtwirkungsabschätzung PET nach Phasen und Gruppen

## Bewertung

Das Ziel der hier erstellten Ökobilanz ist die Abbildung der Umweltrelevanz der verschiedenen Szenarien, um somit eine transparente Aussage zur ökologischen Vorteilhaftigkeit treffen zu können. Es geht also weniger um eine wertende Einschätzung, sondern vielmehr um die Entschlüsselung einzelner Aspekte. So kann

ein Baumaterial mit vergleichsweise höheren Umweltbelastungen in der Herstellung, jedoch gleichzeitig robuster und langlebiger als andere Baumaterialien sein. Die Ökobilanz bietet Transparenz in der Gegenüberstellung von Systemen, wie beispielsweise im Hinblick auf die Fassadenbekleidung. Die angesetzte Nutzungsdauer von 40 Jahren eines Wärmedämmverbundsystems, wie es in Deutschland häufig zur Anwendung kommt, muss in einem Betrachtungszeitraum von 50 Jahren einmal erneuert werden. Eine vorgehängte hinterlüftete Fassade hingegen wird mit 50 Jahren angesetzt. Gründe hierfür liegen vor allem in bauphysikalischen Vorteilen der vorgehängten hinterlüfteten Fassade, da Dämmung und Bekleidung konstruktiv getrennt voneinander sind.

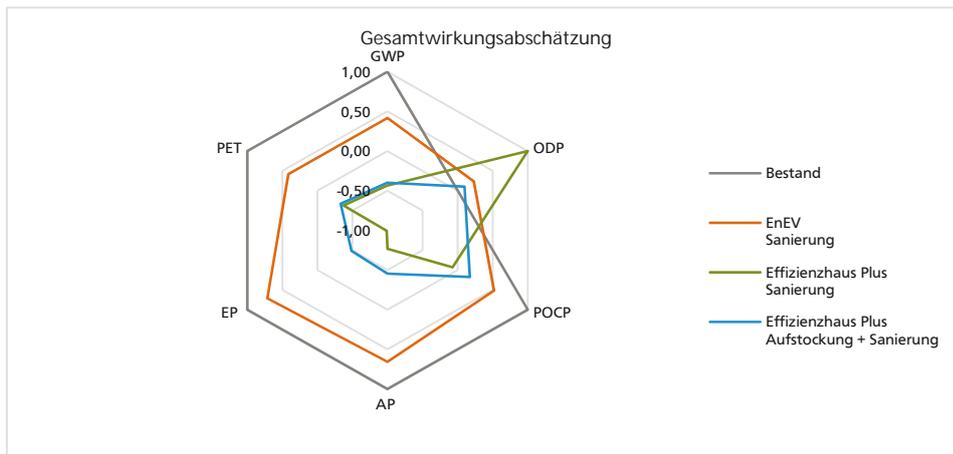


Abb. 217: Gesamtwirkungsabschätzung

In der Gegenüberstellung aller Wirkungsindikatoren zeigt sich eine Tendenz (Abb. 217). Gleichwohl wird offen gelegt, dass die Szenarien in den verschiedenen Wirkungskategorien je nach Abhängigkeit mit mehr oder weniger Belastungen verbunden sind.

So stellt sich der unsanierte Bestand bei Betrachtung des Ozonbildungspotenzials vermeintlich als das vorteilhafteste Szenario dar. Die Ozonbildung wird hauptsächlich durch die technische Ausstattung und weniger durch die Emissionen im Betrieb bestimmt. Dies lässt einen Rückschluss auf die aufwendige Herstellung und Entsorgung von Anlagentechnik, die mit industriellen Prozessen verbunden sind, ziehen. Im aktuellen Forschungsvorhaben wird bewusst auf am Markt vorhandene Materialien und technische Ausrüstung zurückgegriffen. Für zukünftige Projekte werden Lösungen, die weniger von der technischen Ausstattung abhängig sind, empfohlen.

---

Grundsätzlich kann eine Divergenz in den Einflussparametern zwischen dem konventionellen und den zukunftsorientierten Szenarien festgestellt werden. Bei der konventionellen Entwicklung nach Energieeinsparverordnung 2016 sind hauptsächlich Baukonstruktion und Betrieb für Umweltbelastungen verantwortlich. Bei den zukunftsorientierten Szenarien konnte durch geringfügigen Mehraufwand bei der Optimierung der Hülle der Energiebedarf für den Betrieb so weit reduziert werden, dass die Anlagentechnik den Großteil der Umweltbelastungen ausmacht.

Als Hauptverursacher wird in mehreren Kategorien die Photovoltaikanlage identifiziert. Sie ist nicht nur aufwendig in der Herstellung, sie muss zudem zweimal im Betrachtungszeitraum ersetzt werden. Gleichzeitig sorgt sie andererseits für Gutschriften durch den erneuerbar gewonnenen Strom. Allein durch diese Gutschriften können potenzielle Umweltbelastungen in der Bilanz wieder ausgeglichen werden. Das konventionelle Szenario nach EnEV 2016 kann nicht von diesen Gutschriften profitieren. Gerade beim Treibhauspotenzial und dem Gesamt-Primärenergiebedarf in Abb. 214 wird deutlich, dass die Emissionen, die der unsanierte Bestand jährlich verursacht, durch das konventionelle Szenario zwar um fast die Hälfte reduziert werden können. Bei den zukunftsorientierten Szenarien können die Gutschriften durch den erneuerbaren Strom aus der PV-Anlage den bereits minimalen Verbrauch wieder komplett ausgleichen.

Die Untersuchungen im Betrieb zeigen: Jede regenerativ erzeugte Kilowattstunde Strom spart zwei Kilowattstunden fossile Energieerzeugung.

Am Beispiel des Ozonabbaupotenzials hat sich die Vorteilhaftigkeit der Verwendung nachwachsender Rohstoffe gezeigt. Die Aufstockung und Sanierung zum Effizienzhaus Plus zeigt sich hier als ökologischstes Szenario, weil die Gebäudeerweiterung in reiner Holzbauweise ausgeführt wird. Das Szenario ist mit dem höchsten Materialeinsatz verbunden, kann aber durch diese Gutschriften die Bilanz wieder ausgleichen.

Im Netzdiagramm in Abb. 217 zeichnet sich die Sanierung zum Effizienzhaus Plus als vorteilhaftestes Szenario ab. Dies ist vor allem auf die flächenmäßig geringere Notwendigkeit der PV-Anlage zurückzuführen. Im Szenario der Sanierung zum Effizienzhaus Plus in Verbindung mit einer Aufstockung muss mehr Fläche versorgt werden. Dadurch ist mehr PV-Fläche erforderlich. Das architektonische Konzept für die Aufstockung sieht zugunsten der räumlichen Qualität und des Nutzerkomforts mehr Fläche für Dachgauben vor. Dadurch geht Fläche für Photovoltaik verloren. Die Südfassade wird daher ebenfalls zur Energieerzeugung aktiviert.

An dieser Stelle müssen die Randbedingungen und Ansprüche abgewogen werden. Ein augenscheinlich ökologisches Gebäude, in dem die Menschen, die dort

wohnen, sich nicht wohl fühlen, wird auf Dauer nicht zukunftsfähig sein und damit auch nicht ökologisch vorteilhafter sein.

Gleichzeitig wird mit dem Konzept der Aufstockung zusätzlicher Wohnraum geschaffen, ohne dass neue Flächen versiegelt werden müssen. Dieser Vorteil kann in der Ökobilanz nicht abgebildet werden, hebt das Konzept aber in ökologischer Hinsicht besonders hervor.

### 7.1.3. Ökonomische Qualität

Die Ergebnisse aus den einzelnen Untersuchungen der drei Szenarien werden einander und dem unsanierten Bestand gegenübergestellt. Damit wird eine transparente Grundlage für Entscheidungen, die sich an der ökonomischen Qualität von alternativen Konzepten orientieren, geschaffen.

#### Kapitalwert

Für alle Szenarien können unter den festgelegten Randbedingungen positive Kapitalwerte nachgewiesen werden (Abb. 218). Eine Sanierung erweist sich dementsprechend vorteilhafter als eine alternative Geldanlage bei einer Bank.

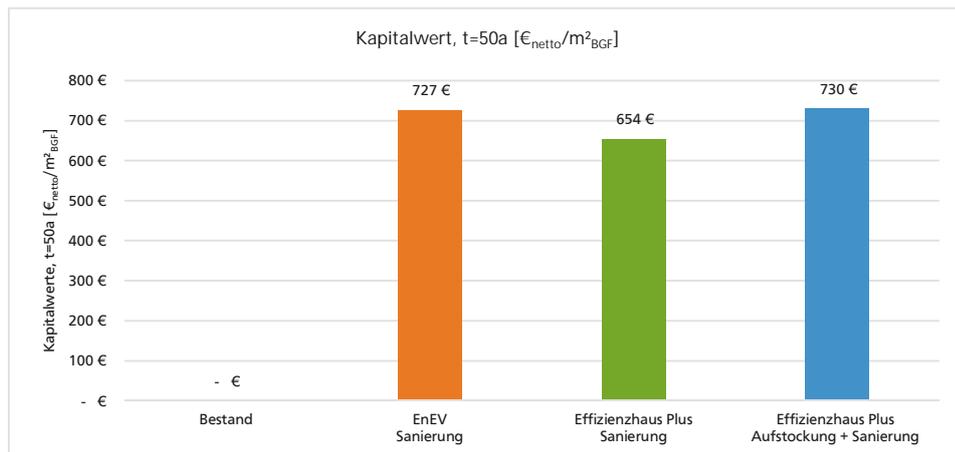


Abb. 218: Kapitalwerte, t=50a

An der Gegenüberstellung wird die notwendige Veränderung des Blickwinkels bei Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen deutlich. Werden Investitionsentscheidungen rein nach der Höhe der Herstellungskosten entschieden, stellen sich konventionelle Strategien gegenüber zukunftsorientierten vorteilhafter dar. Die Aufstockung und Sanierung zum Effizienzhaus Plus erzielt trotz höherem Erstin-

vest einen höheren Kapitalwert. Der höhere Erstinvest fällt bezogen auf mehr Fläche noch weniger ins Gewicht. Der Standard profitiert vor allem durch die auf ein Minimum reduzierten Energiekosten sowie durch die Einspeisevergütung.

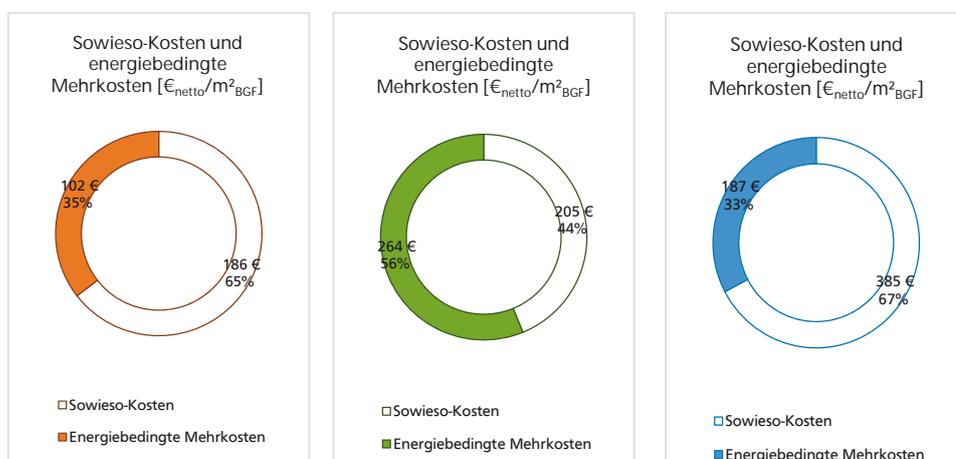


Abb. 219: Sowieso-Kosten und energiebedingte Mehrkosten

In den Ringdiagrammen in Abb. 219 wird die bereits erwähnte Divergenz der Anteile für Sowieso-Kosten und energiebedingte Mehrkosten deutlich. Der Anteil der energiebedingten Mehrkosten des Effizienzhaus Plus-Standards kann in Verbindung mit einer Erweiterung der Wohnfläche reduziert werden.

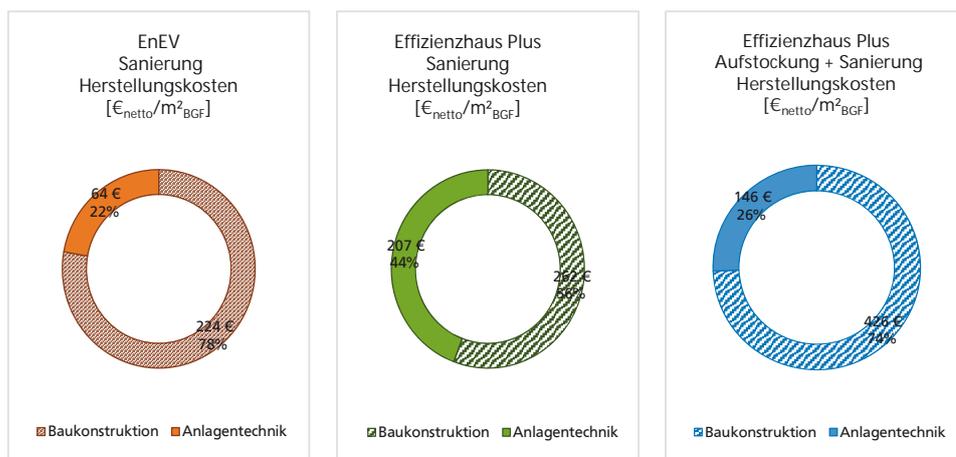


Abb. 220: Herstellungskosten für Baukonstruktion und Anlagentechnik

Auch der kostenintensive Anteil für die Anlagentechnik (vor allem die notwendige PV-Anlage) einer zukunftsorientierten Sanierung kann durch das zusätzliche Angebot an Wohnfläche gesenkt werden. Ähnlich wie bei den Sowieso- und

energiebedingten Mehrkosten sind die Relationen der Sanierung nach EnEV und der Aufstockung und Sanierung zum Effizienzhaus Plus sehr ähnlich (vergleiche Abb. 220).

### Amortisationszeit

Erwartungsgemäß amortisieren sich die energiebedingten Mehrkosten bei einer konventionellen Sanierung schneller als bei den zukunftsorientierten Szenarien. Die zukunftsorientierte Sanierung in Verbindung mit zusätzlicher Wohnfläche erweist sich hier als vorteilhaftere unter den beiden zukunftsorientierten Szenarien. Alles in allem zeigt das Diagramm in Abb. 221, dass alle Szenarien einen kurzen Amortisationszeitpunkt erzielen.

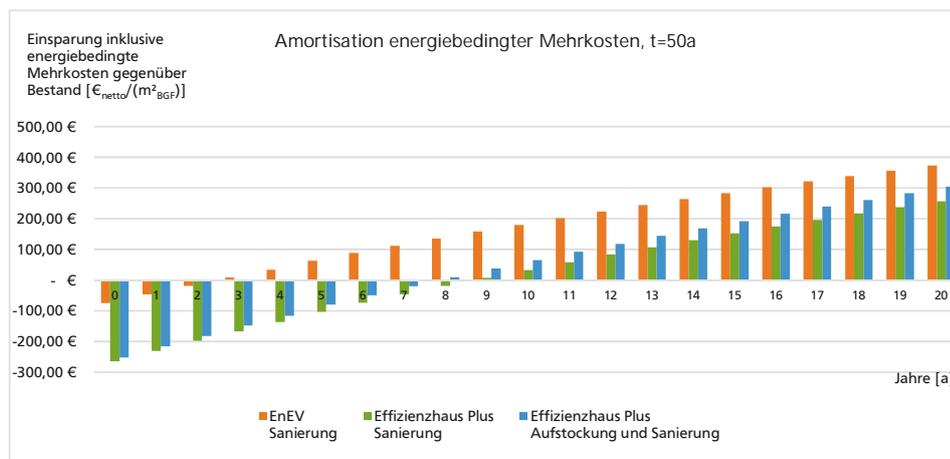
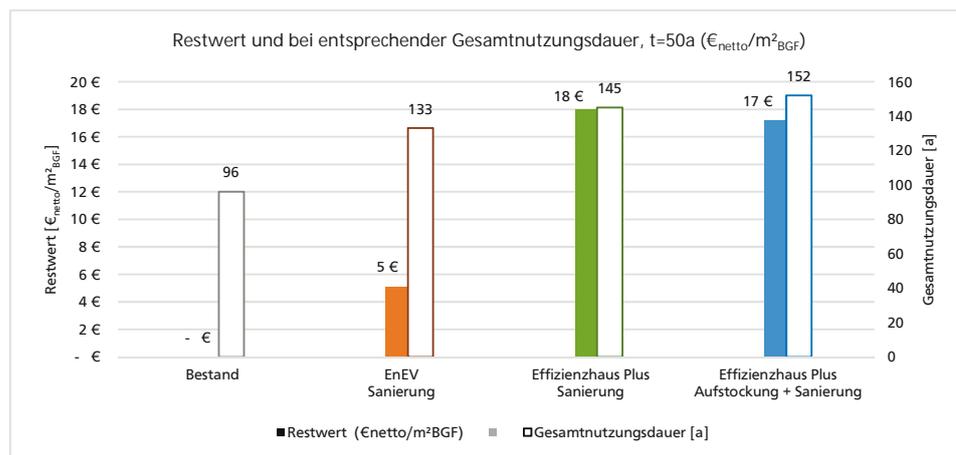


Abb. 221: Amortisation energiebedingter Herstellungskosten

### Restwert

In Abb. 222 sind die Restwerte der Szenarien bei der entsprechenden Gesamtnutzungsdauer dargestellt. Die konventionelle Sanierung schneidet hier am schlechtesten ab. Bei einem möglichen Verkauf nach 50 Jahren kann nur der geringste Restwert angesetzt werden. Der Restwert der Sanierung zum Effizienzhaus Plus beträgt hingegen rund 21.078 € bei einer Gesamtnutzungsdauer von 145 Jahren. Verbunden mit einer Aufstockung kann sogar ein Restwert von 24.939 € und einer Gesamtnutzungsdauer von 152 Jahren angesetzt werden.

Abb. 222: Restwerte bei entsprechender Gesamtnutzungsdauer, t=50a



### Bewertung

Energetische Weiterentwicklungen im Baubestand sind immer mit einem finanziellen Aufwand verbunden. Dafür sollen zukünftige Betriebskosten reduziert werden. Der Vergleich alternativer Szenarien identifiziert die auf die individuellen Bedürfnisse abgestimmte, vorteilhafteste Lösung. In diesem Forschungsvorhaben wird die Wirtschaftlichkeit anhand der dynamischen Kapitalwertmethode im Lebenszyklus bewertet. Als Indikatoren werden der Kapitalwert, die Amortisationszeit und der Restwert festgesetzt. Ähnlich wie bei der ökologischen Lebenszyklusbetrachtung geht es weniger um eine wertende Aussage, sondern um die Entschlüsselung der einzelnen Parameter.

Der unsanierte Bestand verursacht jedes Jahr Energiekosten (Strom und Wärme) in Höhe  $12 \text{ €}_{\text{netto}}/(\text{m}^2_{\text{BGF}} \cdot \text{a})$ . Das ist das Doppelte der Kaltmiete bei einer Wohnfläche von  $607 \text{ m}^2$ . Im Zuge einer konventionellen Sanierung nach Energieeinsparverordnung können diese Kosten um mehr als die Hälfte der ursprünglichen Kosten reduziert werden ( $4,57 \text{ €}_{\text{netto}}/(\text{m}^2_{\text{BGF}} \cdot \text{a})$ ). Bei den zukunftsorientierten Szenarien verbleiben sogar nur noch 17 % der laufenden Betriebskosten ( $2,34 \text{ €}_{\text{netto}}/(\text{m}^2_{\text{BGF}} \cdot \text{a})$ ).

Die energiebedingten Mehrkosten einer Sanierung nach Energieeinsparverordnung liegen hier bei etwa  $75 \text{ €}_{\text{netto}}/\text{m}^2_{\text{BGF}}$ . Für die Weiterentwicklung zum Effizienzhaus Plus muss mit mehr als dreimal höheren energiebedingten Mehrkosten ( $264 \text{ €}_{\text{netto}}/\text{m}^2_{\text{BGF}}$ ) gerechnet werden. In Verbindung mit einer Aufstockung werden die Kosten auf mehr Fläche umgelegt. Die energiebedingten Mehrkosten liegen bei  $187 \text{ €}_{\text{netto}}/\text{m}^2_{\text{BGF}}$ .

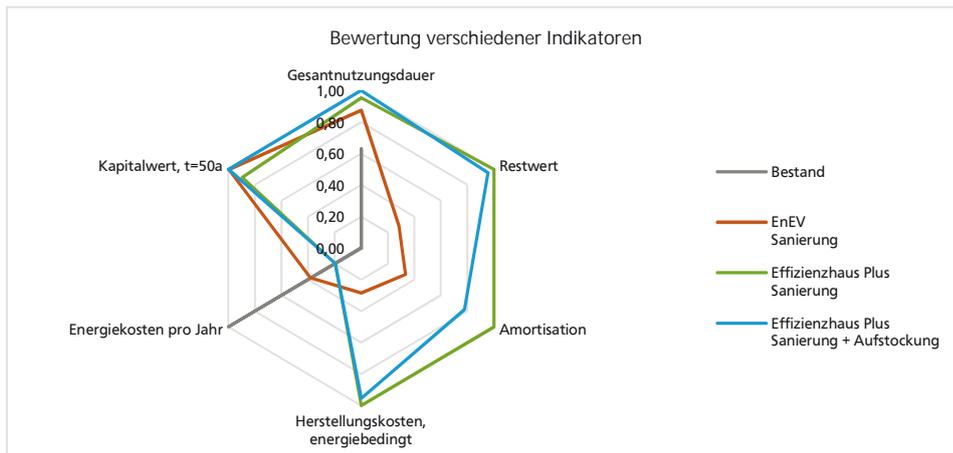


Abb. 223: Gegenüberstellung verschiedener Indikatoren im Netzdiagramm

Alle Strategien amortisieren sich unter den gegebenen Randbedingungen in einem angemessenen Zeitraum von unter 10 Jahren und können als wirtschaftlich bewertet werden.

Das Netzdiagramm in Abb. 223 zeigt, dass sich die Sanierung nach EnEV am schnellsten amortisiert. Jedoch bleiben hier im Vergleich zu den anderen Szenarien die Energiekosten deutlich höher. Daran wird erneut deutlich, dass sich der Blickwinkel bei Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen verändern sollte. Sind die zukunftsorientierten Szenarien erwartungsgemäß mit einem höheren Erstinvest verbunden, zeigen sie ihre Vorteile dann aber in minimalen Betriebskosten. Von einer allein vom Erstinvest abhängige Entscheidung ist demnach abzuraten. Heutzutage sollten Entscheidungen auch nach den Lebenszykluskosten getroffen werden.

Die Verbindung des Effizienzhaus Plus-Standards mit der zusätzlichen Bereitstellung von Wohnraum erweist sich als sinnvoll. Der Anteil der energiebedingten Mehrkosten im Verhältnis zu den Sowieso-Kosten kann sowohl reduziert als auch auf mehr Fläche umgelegt werden. Hinzu kommt, dass die Kosten zum Herrichten des Grundstücks eingespart werden. Dieser Vorteil kann in der Wirtschaftlichkeitsberechnung nicht abgebildet werden, ist jedoch von entscheidender Bedeutung. Hinsichtlich der Aufstockung konnte in den energetischen Untersuchungen festgestellt werden, dass es zum Erreichen des Effizienzhaus Plus Standards nicht ausreicht, das Dach mit PV-Modulen zu belegen. Das architektonische Konzept sieht zugunsten von mehr Wohnfläche und Komfort, großzügigere Gauben vor, wodurch energetisch nutzbare Dachfläche verloren geht. Durch die energetische Aktivierung der Südfassade entstehen Mehrkosten. An dieser Stelle müssen die Randbedingungen und Ansprüche abgewogen werden. Grundsätzlich sind nur Gebäude, in denen sich die Menschen, die dort leben, wohlfühlen zukunftsfähig.

---

Die nicht-monetären Vorteile werden bei den zukunftsorientierten Szenarien als am höchsten eingeschätzt. Für Vermieter und Mieter können beispielsweise der verbesserte Schutz vor Tauwasser und Schimmel sowie eine höhere Behaglichkeit und mehr Komfort genannt werden. Diese Vorteile resultieren unter anderem aus dem verbesserten Wärmeschutz der Gebäudehülle, weil die Temperaturamplitude zwischen Innen- und Außentemperatur geglättet wird. Im Sommer heizen sich die Räume nicht zu stark auf. Im Winter geht weniger Wärme nach draußen verloren. Darüber hinaus sorgt die kontrollierte Wohnlüftung für mehr Komfort, stellt den Mindestluftwechsel sicher und temperiert gleichzeitig die Luft aus der gewonnenen Abwärme. Im Fall der Aufstockung könnte die zunehmende Dichte im Gebäude durch die steigende Zahl der Bewohner eine Herausforderung darstellen. Gleichwohl ist dieser Faktor sehr individuell. Einerseits kann die höhere Belegungsdichte zu Spannungen führen. Andererseits kann sich auch eine sozial sehr verbundene Bewohnerschaft entwickeln. Neben zufriedenen Mietern profitiert der Vermieter von der längeren Nutzungsdauer, der Wertsteigerung und vor allem von der besseren Vermarktbarkeit des Gebäudes als zukunftsorientiertes Vorbild. Damit wird auch das Potenzial zur Aufwertung der Siedlung ausgeschöpft. Der Vermieter erzielt nicht nur mehr Mieteinnahmen. Er spart zusätzlich die Kosten zum Herrichten des Grundstücks, da er bereits vorhandene Flächen nutzt. Gleichzeitig gibt er so einen Impuls zur Entlastung des angespannten Wohnungsmarktes. Durch die Nutzung erneuerbarer Energie wird nicht nur ein Beitrag zur Energiewende geleistet, sondern auch eine Unabhängigkeit von steigenden und von der Importpolitik abhängigen Energiepreisen erreicht.

#### **7.1.4. Fazit**

Die Untersuchungen zeigen, dass die höchste Gesamtqualität der Gebäudehülle erzielbar ist, wenn eine Sanierung in Verbindung mit einer Nachverdichtung, wie hier mit einer Aufstockung, verbunden wird. Wie eingangs bereits erläutert wurde, sind die Herausforderungen beim Bauen im und mit dem Bestand mitunter schwerer umsetzbar als beim Neubau. Der neu zu errichtende Gebäudeteil kann mit den heutigen Materialien und Mitteln der Technik von vornherein in einer besseren Qualität hergestellt werden als zur Zeit des Wiederaufbaus nach dem Zweiten Weltkrieg. Der Anschluss der Aufstockung an die bestehende Substanz muss besonders sorgfältig geplant und ausgeführt werden, um bauphysikalische Schäden zu vermeiden.

Trotz der zusätzlich aufzuschlagenden Pauschalen für den Haushaltsstrom ist der Effizienzhaus Plus-Standard im bewohnten Altbaubestand umsetzbar. Auch wenn das „Plus“ hinsichtlich der Endenergie bei der Sanierung und Aufstockung zum Effizienzhaus Plus im Allgemeinen etwas geringer als bei der Sanierung zum Ef-

---

Effizienzhaus Plus ausfällt, so wird hier der größere Anteil des selbst erzeugten Stroms auch selbst genutzt. Ein hoher Eigennutzungsgrad am hauseigen produzierten Strom ist im Hinblick auf die ökonomischen und ökologischen Aspekte als auch im Sinne der Netzentlastung eher anzustreben als eine möglichst große Energieerzeugung. Hier wird ein weiteres großes Synergiepotenzial des Effizienzhaus Plus-Standards sichtbar. Die Gutschrift des erneuerbaren Stroms kann bei einer gemeinsamen Betrachtung der Gebäude auf einem Grundstück als eine Art Quartier dem EnEV-Gebäude zugute kommen. Solche Quartierskonzepte werden immer wichtiger, denn nicht alle Gebäude können und dürfen auf dieses hocheffiziente Niveau entwickelt werden. Davon können besonders denkmalgeschützte Gebäude profitieren.

Mit zunehmender Wohnfläche muss der Ertrag der PV-Anlage erhöht werden, sodass bei der Nachverdichtung zusätzlich die Fassade energetisch aktiviert werden muss. Dadurch entstehen Mehrkosten, die wiederum auf mehr vermietbare Wohnfläche verteilt werden können und somit nicht ins Gewicht fallen. Die Maßnahmen zur Aufstockung und Sanierung zum Effizienzhaus Plus amortisieren sich zwei Jahre schneller gegenüber dem Szenario, in dem lediglich zum Effizienzhaus Plus saniert wird. Es werden im Vergleich aller Szenarien der höchste Kapital- und Restwert sowie die längste Gesamtnutzungsdauer erzielt.

Der großflächigere Einsatz von Photovoltaik für die Nachverdichtung schlägt sich auch in den ökologischen Untersuchungen nieder. Wird lediglich zum Effizienzhaus Plus saniert, ergeben sich Vorteile im geringen Maß. Allerdings kann ein bedeutender Vorteil weder in einer ökologischen noch in einer ökonomischen Lebenszyklusuntersuchung abgebildet werden: Es müssen keine neuen Flächen versiegelt werden, um zusätzlichen Wohnraum zur Verfügung zu stellen. Gleichwohl können beide zukunftsorientierten Szenarien ihre potenziellen Umweltwirkungen im Gegensatz zum unsanierten Bestand und zu einer konventionellen Sanierung nach EnEV wieder ausgleichen.

Die Sanierung zum Effizienzhaus Plus ist eine in energetischer, ökologischer und ökonomischer Hinsicht vorteilhafte Alternative zu einer konventionellen Sanierung nach Energieeinsparverordnung. In Verbindung mit einer Nachverdichtung können die Vorteile intensiviert werden und zusätzliche Gewinne, wie mehr Wohnfläche, generiert werden.

---

## 7.2 Potenzialanalyse für die Klimaziele in Deutschland

---

### 7.2.1. Nachweis der Übertragbarkeit auf Geschosswohnungsbauten der Baualtersklasse 1949 bis 1978

Das Institut für Wohnen und Umwelt (IWU) hat den Gebäudebestand in Deutschland im Rahmen seiner Forschungstätigkeit nach Baualter und Gebäudegröße in Klassen eingeteilt (LOGA et al. 2015), um einen direkten Zugriff auf typische Flächen und U-Werte zu erhalten bzw. um unmittelbar Aussagen über typische Energiekennwerte treffen zu können. Die Baualtersklassen orientieren sich dabei an historischen Einschnitten, den Zeitpunkten statistischer Erhebungen und den Veränderungen wärmetechnisch relevanter Bauvorschriften. Sie ermöglichen es, allgemein übliche Konstruktionsweisen, typische Bauteilflächen und technische Kennwerte zu erfassen und eine verallgemeinerte deutsche Gebäudetypologie zu erstellen. Die beiden Gebäude im Fritz-Dächert-Weg befinden sich dabei am Übergang der Baualtersklassen MFH\_D (Baualtersklasse 1949-57) und MFH\_E (1958-68). Beide Gebäude sind baugleich. Das erste Gebäude wurde bereits 1956 errichtet. Daher werden die Werte für die Baualtersklasse MFH\_D 1949-57 aufgelistet.

Im Rahmen der Bekanntmachung der Regeln zur Datenaufnahme und Datenverwendung im Wohngebäudebestand hat das Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung im Jahr 2015 die Wärmedurchgangskoeffizienten von nicht nachträglich gedämmten Bauteilen zur vereinfachten Ermittlung energetischer Kennwerte festgelegt (BMWV / BMUB 2015b). Die Einteilung des Gebäudebestands in Baualtersklassen orientiert sich dabei an der Einteilung wie sie bereits zuvor vom IWU vorgenommen wurde, sodass die Kennwerte verglichen werden können.

Demgegenüber werden die vor Ort gemessenen Bauteilkennwerte des Fritz-Dächert-Wegs 52-58 gestellt, um eine Aussage darüber zu treffen, ob es sich bei den beiden Gebäuden um typische Gebäude dieser Zeit handelt und ob die Ergebnisse auf diese Gebäude übertragen werden können.

| BAUTEIL                                    | 1949-1957<br>IWU   | 1949-1957<br>BMW I / BMUB   | FRITZ-DÄCHERT-<br>WEG 52-58  |
|--|--|---|--|
| <b>Flächen/Volumen/Kennzahlen</b>          |  |   |  |
| Beheizte Wohnfläche [m <sup>2</sup> ]      | 574,8  | -   | 604  |
| Mittlere lichte Raumhöhe [m]               | 2,65   | -   | 2,50   |
| Beheiztes Gebäudevolumen [m <sup>3</sup> ] | 1.919,2  | -   | 2.270  |
| Anzahl Vollgeschosse                       | 3  | -   | 3  |
| Anzahl Wohneinheiten                       | 9  | -   | 12   |
| Fenster g-Wert                             | 0,7  | 0,75  | -  |
| Fenster Konstruktion                       | Isolierverglasung in alten Zweikammer Kunststoffrahmen             | Holzfenster, zwei Scheiben / Kunststofffenster, Isolierverglasung | Kunststofffenster, 2-Scheiben-Isolierverglasung von 1987           |
| Heizsystem                                 | Gas-Niedertemperaturkessel 84kW aus den 80er Jahren                | -   | Gas-Spezialheizkessel 64 kW von 1991                               |
| Warmwasserbereitung                        | Warmwasserbereitung über den Heizkessel mit beigestelltem Speicher | -   | Warmwasserbereitung über den Heizkessel mit beigestelltem Speicher |
|  |  |   |  |
| <b>U-Werte</b>                             |  |   |  |
| Oberste Geschossdecke                      | 0,78   | 0,80  | 0,91   |
| Kellerdecke                                | 1,65   | 1,50  | 0,90   |
| Außenwände                                 | 1,44   | 1,40  | 1,25   |
| Fenster                                    | 2,80   | 3,00  | -  |
| Außentüren                                 | -  | 3,50  | -  |
| Dach                                       | 1,11 / 1,41  | 1,40  | 1,58   |

Tab. 18: Gegenüberstellung der vorhandenen Kennwerte mit Kennwerten des IWU und des BMWI/BMUB

Der Tab. 18 ist zu entnehmen, dass die Bauteilkennwerte der Gebäude im Fritz-Dächert-Weg 52 bis 58 nicht wesentlich von den verallgemeinerten Werten des IWU und des BMWI/BMUB abweichen. Sie können daher als repräsentative Beispiele für Geschosswohnungsbauten der Baualtersklasse 1949 bis 1978 bezeichnet werden.

---

Die Fritz-Dächert-Siedlung in Eberstadt mit seinen großzügigen Abstandsflächen entspricht dem Ideal eines städtebaulichen Leitbildes der Nachkriegszeit mit Riegeln. Das erste Wohnungsbaugesetz von 1950 schrieb für den sozialen Wohnungsbau Wohnungsgrößen zwischen 32 und 65 m<sup>2</sup> vor. Die Wohnungsgrößen im Fritz-Dächert-Weg betragen durchschnittlich 52 m<sup>2</sup>.

Hinsichtlich der Konstruktion lassen sich folgende Bauteilausführungen als typisch für die Baualtersklasse 1949 bis 1978 feststellen:

Flachgründungen wurden meist als Streifenfundament aus unbewehrtem Stampfbeton ausgeführt. Teilweise findet man auch gemauerte Fundamente aus Hartbrannt- oder Trümmerziegeln vor. Schäden an der Fundamentierung sind aufgrund der meist geringen Bauhöhe eher selten. Die Bodenplatte wurde oft mit einer Dicke von ca. 10 cm betoniert und mit einem Glattsrich versehen. Eine Abdichtung gegen aufsteigende Feuchtigkeit fehlte in der Regel.

Kellerwände wurden entweder mit Stampfbeton betoniert oder Mauerwerk gemauert. Auch wenn Abdichtungsarbeiten auf Bitumen- oder Asphaltbasis bereits üblich waren, sind diese heutzutage aufgrund geringer Qualität meist undicht, sodass Kellerwände heute oftmals feucht sind. Dies liegt auch an der fehlenden horizontalen Abdichtung gegen aufsteigende Feuchtigkeit. Teilweise wurde auch auf einen Zementputz als vertikale Abdichtung zurückgegriffen.

Die Außenwände der Nachkriegsbauten wurden in der Regel massiv gemauert, jedoch verschwand der Vollziegel nahezu gänzlich und wurde durch Hoch- und Langlochziegel sowie Leichtbetonsteine ersetzt. Der Grund hierfür lag zum einen in der Materialersparnis, jedoch auch im verbesserten Wärmeschutz dieser Steine. Holzwolleleichtbauplatten dienten vielfach als Dämmstoff bei Stürzen, Ringbalken, Heizkörpernischen und an Dachunterseiten. Sie eigneten sich sowohl als Schalungseinlage, als auch als Putzträgerplatte, was ihnen gegenüber den zu dieser Zeit verfügbaren Mineralwolleplatten einen Vorteil verschaffte, da diese nicht als Putzträger geeignet waren. Erst Ende der 50er Jahre fanden sie eine breite Verwendung als Trittschalldämmung unter schwimmenden Estrichen.

Zu den Schwächen dieser Bauweise gehört neben der mangelhaften Wärmedämmung, der geringen Wärmespeicherkapazität, der Anfälligkeit für Durchfeuchtung und schlechter Befestigungsmöglichkeiten aufgrund niedriger Zugfestigkeit ein mangelnder Schallschutz.

Der Abgleich der Werte der Untersuchungsgebäude mit den Kennwerten des IWU und des BMWI/BMUB weist nach, dass es sich bei den Untersuchungsobjekten um zwei repräsentative Geschosswohnungsbauten der Baualtersklasse 1949 bis 1978 handelt. Damit kann eine Übertragbarkeit auf andere Gebäude der entsprechenden Typologie gewährleistet werden.

### 7.2.2. Potenzialanalyse

Deutschland versucht laut Klimakonzept unter anderem bis zum Jahr 2050 80 bis 95 % weniger Treibhausgase als im Jahr 1990 auszustoßen. Der Primärenergiebedarf (nicht erneuerbar) soll bis dahin um 80 % gegenüber 2008 reduziert werden. Für Mehrfamilienhäuser, die rund ein Drittel der beheizten Fläche in Deutschland beanspruchen, bedeutet dies etwa 170 Mio bis 200 Millionen Tonnen weniger CO<sub>2</sub> und über 974 TWh weniger Primärenergie.

Welches Potenzial für die Klimaziele in Deutschland erschließt sich durch eine Aufstockung und Sanierung zum Effizienzhaus Plus? Die Berechnungen gehen von den Randbedingungen in Tab. 19 aus<sup>1</sup>.

| RANDBEDINGUNG                                      | EINHEIT                               | WERT          |
|--|---------------------------------------|---------------|
| Wohnfläche Mehrfamilienhäuser                      | m <sup>2</sup>                        | 1.500.000.000 |
| überschlägige Fläche je Mehrfamilienhaus           | m <sup>2</sup>                        | 469           |
| Referenzwert 1990 Treibhausgasemissionen Gebäude   | Mio t CO <sub>2</sub>                 | 209           |
| Status Quo 2014 Treibhausgasemissionen Gebäude     | Mio t CO <sub>2</sub>                 | 119           |
| Ziel 2050 Treibhausgasemissionen Gebäude           | Mio t CO <sub>2</sub>                 | 10 bis 42     |
| Referenzwert 2008 Primärenergie Gebäude            | TWh                                   | 1.217         |
| Status Quo 2014 Primärenergie Gebäude              | TWh                                   | 1.037         |
| Ziel 2050 Primärenergie Gebäude                    | TWh                                   | 243           |
| Einsparpotenzial Treibhausgasemissionen im Betrieb | t CO <sub>2</sub> /(m <sup>2</sup> a) | 0,124         |
| Einsparpotenzial Primärenergie im Betrieb          | TWh/(m <sup>2</sup> a)                | 4,128E-07     |
| Sanierungsrate                                     | %                                     | 0,9           |
| Startjahr „0“ der Analyse                          | -                                     | 2016          |

Tab. 19: Randbedingungen der Potenzialanalyse

Bei der Potenzialanalyse handelt es sich um eine modellhafte, grobkörnige Studie mit überschlägigen Werten und Vereinfachungen. Verschiedene Baualterklassen und damit verschiedene Einsparpotenziale werden vernachlässigt. Die Vereinfachung wird gerechtfertigt, da die Baualterklasse 1949 bis 1978 in Deutschland am meisten vertreten ist.

<sup>1</sup> Die Werte für die Flächen sowie die Ausgangswerte von Treibhausgasemissionen und nicht erneuerbarer Primärenergie sind dem dena-Klimareport 2016 sowie dem Klimaschutzplan 2050 des BMUB entnommen.

Über einen Zeitraum von 2016 bis 2050 wird angenommen, dass pro Jahr 0,9 % der bestehenden Mehrfamilienhäuser saniert werden. Ausgehend von 3,2 Millionen Mehrfamilienhäusern und einer Wohnfläche von 1,5 Milliarden m<sup>2</sup> werden pauschal 460 m<sup>2</sup> Wohnfläche je Gebäude angesetzt. Die jährlichen Einsparungen, die durch den Effizienzhaus Plus-Standard erzielt werden können, werden von den Ausgangswerten für 2016 abgezogen. Da für 2016 noch keine Werte vorliegen, wird von einer gleichbleibenden Senkung zwischen 2014 bis 2016 ausgegangen. Untersucht wird ausschließlich die Weiterentwicklung von Mehrfamilienhäusern. Ein- und Zweifamilienhäuser sowie Nichtwohngebäude bleiben in der Studie unberücksichtigt.

Abb. 224: Potenzielle Senkung der Treibhausgasemissionen

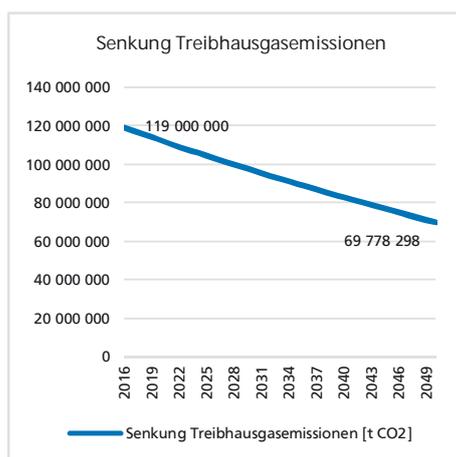
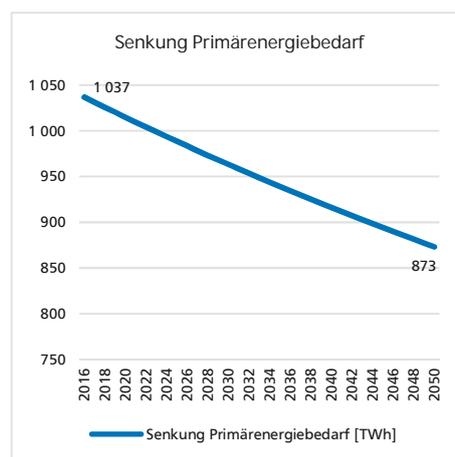


Abb. 225: Potenzielle Senkung des Primärenergiebedarfs



Die Diagramme in Abb. 224 und Abb. 225 zeigen, dass die Treibhausgasemissionen um mehr als 40 % gesenkt werden können. Der Primärenergiebedarf kann um fast 20 % reduziert werden. Im Effizienzhaus Plus-Standard liegt folglich ein bedeutendes Potenzial für die Weiterentwicklung des Baubestands an Geschosswohnungsbauten.

Die Ergebnisse zeigen außerdem, dass die aktuelle Sanierungsquote von weniger als 1 % nicht genügt, um die Klimaziele 2050 zu erreichen. Das notwendige Ziel liegt in der Kombination mit einem Gesamtkonzept zur Weiterentwicklung von Ein- und Zweifamilienhäusern, Mehrfamilienhäusern und Nichtwohngebäuden sowie Förderanreizen und einem verbesserten Wissenstransfer rund um das Thema energieeffizienten Bauens und Wohnens.

So kann der Effizienzhaus Plus-Standard dazu beitragen, den Klimazielen 2050 entgegenzukommen.

### 7.3 Resumee und Perspektive

Ein Ziel des Forschungsvorhabens war die Beantwortung der Frage, ob und mit welchen Strategien der Effizienzhaus Plus-Standard im bewohnten Geschosswohnungsbau wirtschaftlich und ökologisch sinnvoll umsetzbar ist. Im Hinblick auf den angespannten Wohnungsmarkt wurde zudem das Potenzial ausgelotet, welche Synergieeffekte in der Verbindung des Effizienzhaus Plus-Standards mit einer Nachverdichtung in Form einer Aufstockung liegen. Dafür wurden drei Szenarien für zwei identische Geschosswohnungsbauten der Baualtersklasse 1949 bis 1978 auf einem Grundstück in Darmstadt-Eberstadt erarbeitet:

- Sanierung nach Energieeinsparverordnung 2016
- Sanierung zum Effizienzhaus Plus nach BMU
- Aufstockung und Sanierung zum Effizienzhaus Plus nach BMU

Zunächst wurden eine Bestandsaufnahme und eine Analyse der Potenziale und Hemmnisse durchgeführt. Dies bildete die Grundlage für die Entwicklung der Szenarien. Es konnte festgestellt werden, dass sowohl die Gebäudehülle als auch die Anlagentechnik erhebliche Defizite aufweisen. Aufbauend auf der Grundlagenermittlung wurden die Szenarien in Übereinstimmung mit den jeweiligen Anforderungsprofilen erarbeitet. Die Ergebnisse der energetischen, ökologischen und ökonomischen Untersuchungen sind in Tab. 20 zusammengefasst.

| KENNWERT   | BESTAND | SANIERUNG<br>ENEV | SANIERUNG<br>EFFIZIENZHAUS<br>PLUS | AUFSTOCKUNG<br>+ SANIERUNG<br>EFFIZIENZHAUS<br>PLUS |
|--|---------|-------------------|------------------------------------|---|
| Jahres-Primärenergiebedarf $Q_p$ [kWh/(m <sup>2</sup> a)]  | 302,6   | 112,7             | -63,3                              | -38,1   |
| Jahres-Endenergiebedarf $Q_e$ [kWh/(m <sup>2</sup> a)]   | 304,2   | 109,2             | -14,9                              | -7,9  |
| Transmissionswärmeverlust $H'_T$ [W/(m <sup>2</sup> K)]  | 1,25    | 0,48              | 0,33                               | 0,31  |
| Treibhauspotenzial<br>GWP <sub>100</sub> [kg CO <sub>2</sub> -<br>Äq./((m <sup>2</sup> <sub>NGF</sub> a))] | 487     | 203               | -21,16                             | -19,44  |
| Gesamtprimärenergiebedarf [MJ/(m <sup>2</sup> <sub>NGF</sub> a)]   | 808     | 335               | -303                               | -268  |
| Kapitalwert<br>[€ <sub>netto</sub> /m <sup>2</sup> <sub>BGF</sub> ]  | 0       | 727               | 654                                | 730   |
| Amortisationszeit [a]  | -       | 3                 | 9                                  | 8   |
| Restwert [€ <sub>netto</sub> /<br>m <sup>2</sup> <sub>BGF</sub> ] / Gesamtnut-<br>zungsdauer [a]           | 0 / 96  | 5 / 133           | 18 / 145                           | 17 / 152  |

Tab. 20: Gegenüberstellung der Ergebnisse

---

Es konnte unter anderem gezeigt werden, dass bereits eine konventionelle Sanierung nach EnEV zur einer bedeutenden Verringerung der Transmissionswärmeverluste führt. Den Effizienzhaus Plus-Standard mit einer Aufstockung zu verbinden, erweist sich als besonderes Potenzial, da eine optimale Gebäudehülle im Neubau vergleichsweise einfacher und mit den heutigen Mitteln der Technik besser herzustellen ist. Bezüglich der End- und Primärenergiebilanzen konnte festgestellt werden, dass diese durch die vom BMU anzusetzende Pauschale für Haushaltstrom teilweise um mehr als das Doppelte erhöht werden. Diese Pauschale wird bei anderen Standards, wie etwa der EnEV nicht einbezogen, wodurch das Effizienzhaus Plus einen rechnerischen Nachteil im Vergleich in Kauf nehmen muss. Gleichwohl können sowohl bei der Sanierung zum Effizienzhaus Plus als auch bei der Sanierung und Aufstockung zum Effizienzhaus Plus die geforderten negativen Jahres-Endenergie- und Jahres-Primärenergiebedarfe nachgewiesen werden. Während bei der Sanierung zum Effizienzhaus Plus die energetische Aktivierung der Dachflächen genügt, muss bei dem Szenario mit der Aufstockung auch die Fassade mit Photovoltaik-Modulen belegt werden. Dies resultiert unter anderem aus dem höheren Bedarf durch mehr Fläche, wiederum vor allem durch die höhere Haushaltsstrompauschale. Außerdem zielt das architektonische Konzept auf eine großzügigere Gestaltung der Dachgauben zugunsten von mehr Komfort und besser nutzbarem Wohnraum. Damit fällt das „Plus“ geringfügig niedriger als bei dem Szenario, in dem ausschließlich saniert wird, aus. Es ist wiederum auch nicht das Ziel des Standards, viel überschüssige Energie zu erzeugen. Ein möglichst hoher Eigennutzungsgrad, wie er durch die Verbindung mit der Aufstockung erreicht wird, ist vorteilhafter.

Ähnliche Resultate zeigen sich bei der ökologischen Betrachtung der Szenarien. Der unsanierte Bestand verursacht aufgrund der ungünstigen Gesamtkonstellation aus mangelhafter Gebäudehülle und ineffizienter, veralteter Anlagentechnik seit etwa 60 Jahren jedes Jahr schädliche CO<sub>2</sub>-Emissionen in Höhe von 39 Tonnen. Auch wenn durch eine konventionelle Sanierung bereits Verbesserungen erzielt werden können, so verursacht allein der Betrieb noch immer jährlich 19 Tonnen. Das Erreichen der zukunftsorientierten Standards ist aufgrund des höheren Dämmstandards, besserer Fenster und der aufwendigeren Anlagentechnik zunächst mit höheren Umweltwirkungen verbunden. Vor allem die Photovoltaikanlage konnte hier als Hauptverursacher identifiziert werden. Gerade die Photovoltaikanlage sorgt wiederum für Gutschriften durch den erneuerbar gewonnenen Strom, sodass die zukunftsorientierten Szenarien ihre Umweltwirkungen teilweise sogar mehrfach ausgleichen. Auch die Wahl der Konstruktion und der Systeme beeinflusst die ökologische Qualität. Ein vorgehängtes hinterlüftetes System erweist sich sowohl in konstruktiver als auch in bauphysikalischer Hinsicht als vorteilhafter gegenüber einem Wärmedämmverbundsystem. Dies schlägt sich in einer längeren Nutzungsdauer und damit auch in einer positiveren Ökobilanz nieder. Bei der Aufstockung konnte vor allem die Vorteilhaftigkeit des nachwachsenden Rohstoffs Holz die Bilanz begünstigen.

---

Die Untersuchung der ökonomischen Eigenschaften hat bestätigt, dass der Effizienzhaus Plus-Standard mit einer 60 bis 70 % höheren Erstinvestition als bei einer konventionellen EnEV-Sanierung ( $75 \text{ €}_{\text{netto}}/\text{m}^2_{\text{BGF}}$ ) verbunden ist. Analog zur vorangegangenen ökologischen Untersuchung zeigt sich auch hier, dass der Blickwinkel bei der Bewertung von der Herstellung eines Gebäudes oder Standards auf den Lebenszyklus erweitert werden muss. Die zukunftsorientierten Standards benötigen gegenüber dem unsanierten Bestand und dem EnEV-Szenario ein Minimum an Betriebskosten und können sogar Gewinne aus der Einspeisevergütung erzielen. Insgesamt erreichen sie damit höhere Kapital- und Restwerte. Darüber hinaus kann auch die Gesamtnutzungsdauer erheblich verlängert werden. In Verbindung mit der Erweiterung der Wohnfläche kann der Effizienzhaus Plus-Standard noch wirtschaftlicher umgesetzt werden. Ein nicht monetär darstellbarer Vorteil, der auch auf die Ökobilanz zutrifft, ist hier vor allem die Bereitstellung von neuem Wohnraum ohne dafür zusätzliche Flächen versiegeln zu müssen. Hinzu kommen noch die Verbesserung der Chancen bei der Vermietung der Wohnungen und der bei der Vermarktung aufgrund des zu erwartenden Komforts und der Akzeptanz für die zukunftsorientierten Standards. Im Falle einer Umsetzung der Aufstockung kann in einem Monitoring erfasst werden, welchen Einfluss die höhere Dichte in dem Gebäude auf das Wohlbefinden der Bewohner mit sich bringt.

Es hat sich gezeigt, dass der Effizienzhaus Plus Standard bereits mit den heute verfügbaren Baustoffen und Technologien im bewohnten Geschosswohnungsbau wirtschaftlich und ökologisch sinnvoll realisierbar ist.

Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurde zusätzlich untersucht, wie die Effizienz noch weiter erhöht werden kann. Eine der wesentlichen Herausforderungen beim Bauen im und mit dem Bestand bildet der Anspruch, den Eingriff in die Innenräume möglichst gering zu halten sowie die Bewohner und Nachbarn im Allgemeinen so wenig wie möglich durch die Baustellenphase zu belasten. Ein maßgebendes Potenzial wird in der Integration anlagentechnischer Komponenten in der Gebäudehülle gesehen. Vorstellbar ist seriell vorfertigbares Fassadenelement, in dem die Lüftungsleitungen bereits vorinstalliert sind. Ein besonderes Synergiepotenzial kann in der Kombination mit Photovoltaik als Luftkollektorfassade ausgeschöpft werden. Die Hinterströmung wirkt sich zum einen positiv auf die Effizienz der Module aus, zum anderen kann wiederum die dadurch temperierte, hinterströmende Luft genutzt werden, um die Effizienz von zentralen Lüftungsanlagen mit Wärmerückgewinnung oder Wärmepumpen zu steigern.

Wie bereits erwähnt, ist es sinnvoll, möglichst viel des produzierten Stroms direkt selbst zu nutzen (hoher Eigennutzungsgrad). Um der Problematik der Volatilität des PV-Stroms entgegenzukommen, wurde diesbezüglich der Nutzen eines Batteriespeichers auf Lithium-Ionen-Basis ökonomisch und ökologisch überprüft. Es konnte festgestellt werden, dass ein PV-Akku die ökologische und ökonomische

---

Qualität beeinflusst, aber gleichwohl zur einer bedeutenden Verbesserung des Eigennutzungsgrads führt. Wichtig ist es hierbei, den Speicher nach dem Bedarf auszulegen. Eine Überdimensionierung bringt keinen wesentlichen Mehrwert der Energiebilanz und bewirkt eine Verschlechterung der ökologischen und ökonomischen Qualität. Auch Elektroautomobile können als PV-Speicher genutzt werden. Abgesehen von den Vorteilen für Eigentümer und Mieter, ist gerade die sektorübergreifende Kombination mit dem Bereich „Verkehr“ besonders wichtig, um die deutschen Klimaziele zu erreichen.

Energieeffizientes Bauen muss über die Grenzen von Architektur und Technik hinausgehen. Dies zeigt sich auch an der maßgebenden Schlüsselrolle des Verhaltens der Bewohner. Anhand der Haushaltsstrompauschale wird dies auch noch einmal deutlich. Auch wenn die Motivation zum Energiesparen da ist, so hilft die einmal jährlich eintreffende Nebenkostenabrechnung oft nicht wirklich dabei, Einsparpotenziale zu identifizieren. Meist fehlt auch das notwendige Hintergrundwissen, wie Energie im täglichen Haushalt eingespart werden kann. Hier soll ein spielerisches Energie-Informationstool die Bewohner unterstützen und sie mit den notwendigen Informationen versorgen, um sie zu einem energiesparenden Handeln zu motivieren.

Eine weitere Möglichkeit zur Steigerung der Effizienz liegt in der energetischen Kopplung des Effizienzhauses Plus mit dem Nachbargebäude („energy plot“). Dadurch kann nicht nur der Eigennutzungsgrad signifikant erhöht werden. Es erschließt sich zudem ein bedeutendes Synergiepotenzial, das vor allem denkmalgeschützten Gebäuden, bei denen Eingriffe nur beschränkt erlaubt sind, zugute kommt.

Im letzten Abschnitt wurde der Nachweis der Untersuchungsgebäude als repräsentative Geschosswohnungsbauten der Baualtersklasse 1949 bis 19878 erbracht und damit die Übertragbarkeit auf vergleichbare Bauten gewährleistet. Die daraufhin angelegte Potenzialanalyse konnte darlegen, dass der Effizienzhaus Plus-Standard im Geschosswohnungsbau ein wesentlicher Baustein ist, um die deutschen Klimaziele 2050 zu erreichen. Zudem hat sich bestätigt, dass die aktuelle Sanierungsrate unbedingt angekurbelt werden muss.

Alles in allem kann der Effizienzhaus Plus-Standard wirtschaftlich und ökologisch als sinnvoller Standard für den bewohnten Geschosswohnungsbau dargestellt werden. Bedeutende Vorteile und Potenziale konnten in der Verbindung des Standards mit einer Nachverdichtung nachgewiesen werden. Angesichts der fortschreitenden Optimierung und Entwicklung neuer Technologien kann davon ausgegangen werden, dass der Weg zum Effizienzhaus Plus im bewohnten Geschosswohnungsbau weiter geebnet wird.

---

Die Konzeption kann als iterativer Prozess bezeichnet werden. Mögliche Eingriffe wurden stets auf ihre energetischen, ökologischen und ökonomischen Auswirkungen überprüft. Das kontinuierliche Abwägen veranschaulicht, dass Entscheidungen beim Bauen im und mit dem Bestand (sowie beim Neubau) nach den individuellen Vorstellungen und Randbedingungen zu treffen sind. Wichtig ist, transparente Grundlagen für diese Entscheidungen zugänglich zu gestalten und kreative Lösungsansätze für eventuelle Hindernisse zu entwickeln.

Der Mensch ist ein bedeutender Schlüsselparameter in der Architektur. Zukunftsorientierte und nachhaltige Architektur kann nicht ungeachtet von Energie, Ökologie und Ökonomie erfolgen. Auch umgekehrt sind Gebäude mit optimalen energetischen, ökologischen und ökonomischen Bilanzen, aber ohne einen Anspruch auf architektonische Qualität weder zukunftsorientiert noch nachhaltig, da sie von den Menschen nicht akzeptiert und damit nicht bewohnt und gepflegt werden.



---

## 8. Abbildungs- und Tabellenverzeichnis

# Abbildungen und Tabellen

---

*Sofern nicht anders angegeben, handelt es sich um eigene Abbildungen und die Rechte der verwendeten Grafiken und Fotos liegen bei der Technischen Universität Darmstadt, Fachbereich Architektur, Fachgebiet für Tragwerksentwicklung und Bauphysik.*

- Abb. 1: Zwischen 1949 bis 1978 war in Deutschland die intensivste Bautätigkeit, Seite 12
- Abb. 2: Die Untersuchungsgebäude im Fritz-Dächert-Weg 52-58, Seite 13
- Abb. 3: energy+Home 1.0 Quelle: diephotodesigner, TSB-Ingenieure, Seite 16
- Abb. 4: Luftbild Darmstadt und Umgebung, Seite 21
- Abb. 5: Luftbild Darmstadt-Eberstadt, Seite 21
- Abb. 6: Luftbild Fritz-Dächert-Weg 52-58, Seite 21
- Abb. 7: Die Kirchtannensiedlung weist eine heterogene Bebauungsstruktur auf, Seite 22
- Abb. 8: Lageplan mit GRZ, GFZ, Gebäudehöhen, Seite 23
- Tab. 1: Messbedingungen der Thermografie, Seite 24
- Abb. 10: Nordfassade des Fritz-Dächert-Wegs 56, Seite 25
- Abb. 11: Thermografie der Nordfassade des Fritz-Dächert-Wegs 56, Seite 25
- Abb. 12: Westfassade des Fritz-Dächert-Wegs 56-58, Seite 26
- Abb. 13: Thermografie der Westfassade des Fritz-Dächert-Wegs 56-58, Seite 26
- Abb. 14: Ostfassade des Fritz-Dächert-Wegs 58, Seite 26
- Abb. 15: Thermografie der Ostfassade des Fritz-Dächert-Wegs 56, Seite 26
- Abb. 16: Innenraum Nordwestecke EG Fritz-Dächert-Weg 56, Seite 27
- Abb. 17: Thermografie Innenraum Nordwestecke EG Fritz-Dächert-Weg 56, Seite 27
- Tab. 2: Messbedingungen der U-Wert-Messung, Seite 28
- Abb. 18: U-Wert-Messung Außenwand, innen, Seite 28
- Abb. 19: U-Wert-Messung Außenwand, außen, Seite 28
- Abb. 20: U-Wert-Messung Dach, innen, Seite 28
- Abb. 21: U-Wert-Messung Dach, außen, Seite 28
- Tab. 3: Ergebnisse der U-Wert-Messung, Seite 30
- Abb. 22: Energieverbrauch Fritz-Dächert-Weg 52-54, Seite 31
- Abb. 23: Energieverbrauch Fritz-Dächert-Weg 56-58, Seite 31
- Tab. 4: Gebäudedaten Fritz-Dächert-Weg 52-54, Seite 32
- Abb. 24: Das beheizte Gebäudevolumen ist rot schattiert., Seite 33
- Abb. 25: Grundriss KG, Seite 34

- 
- Abb. 26: Grundriss EG, Seite 34
  - Abb. 27: Grundriss 1. OG, Seite 35
  - Abb. 28: Grundriss DG, Seite 35
  - Abb. 29: Schnitt A-A, Seite 36
  - Abb. 31: Südansicht, Seite 36
  - Abb. 30: Schnitt B-B, Seite 36
  - Abb. 32: Nordansicht, Seite 36
  - Abb. 33: Westansicht, Seite 37
  - Abb. 34: Ostansicht, Seite 37
  - Abb. 36: Energieflussdiagramm Fritz-Dächert-Weg 52 bis 54, Seite 42
  - Abb. 37: Energiekonzept Fritz-Dächert-Weg 52-54, Seite 43
  - Abb. 38: Einordnung in Energieeffizienzklasse H, Seite 43
  - Tab. 5: Gebäudedaten Fritz-Dächert-Weg 52-54, Seite 44
  - Abb. 39: Das beheizte Gebäudevolumen ist rot schattiert., Seite 45
  - Abb. 41: Grundriss KG, Seite 46
  - Abb. 42: Grundriss EG, Seite 46
  - Abb. 43: Grundriss 1. OG, Seite 47
  - Abb. 44: Grundriss DG, Seite 47
  - Abb. 45: Schnitt A-A, Seite 48
  - Abb. 47: Südansicht, Seite 48
  - Abb. 46: Schnitt B-B, Seite 48
  - Abb. 48: Nordansicht, Seite 48
  - Abb. 49: Westansicht, Seite 49
  - Abb. 50: Ostansicht, Seite 49
  - Abb. 51: Einordnung in Energieeffizienzklasse H , Seite 50
  - Tab. 6: Gegenüberstellung der vorhandenen U-Werte mit den maximal zulässigen nach EnEV 2016, Seite 59
  - Tab. 7: Gegenüberstellung der vorhandenen Kennwerte mit den maximal zulässigen nach EnEV 2016, Seite 60
  - Tab. 8: Gegenüberstellung der vorhandenen Kennwerte mit den maximal zulässigen für das Effizienzhaus Plus nach BMU, Seite 61
  - Abb. 52: Grafische Gegeüberstellung EnEV-Standard und Effizienzhaus Plus nach BMU, Seite 61
  - Abb. 53: Perspektive Sanierung nach EnEV, Seite 62

- 
- Abb. 54: Materialcollage, Seite 62
  - Abb. 55: Grundriss KG, Seite 63
  - Abb. 56: Grundriss EG, Seite 63
  - Abb. 57: Grundriss 1.OG, Seite 64
  - Abb. 58: Grundriss DG, Seite 64
  - Abb. 59: Schnitt A-A, Seite 65
  - Abb. 61: Südansicht, Seite 65
  - Abb. 60: Schnitt B-B, Seite 65
  - Abb. 62: Nordansicht, Seite 65
  - Abb. 63: Westansicht, Seite 66
  - Abb. 64: Ostansicht, Seite 66
  - Abb. 65: Energiekonzept, Seite 67
  - Abb. 66: Energieflussdiagramm, Seite 67
  - Abb. 67: Verlauf der Luftdichtheitsebene, Seite 70
  - Tab. 9: Gegenüberstellung der Kennwerte von Bestand mit denen nach der Sanierung und mit den maximal zulässigen nach EnEV 2016, Seite 73
  - Abb. 68: Einordnung in Energieeffizienzklasse D , Seite 73
  - Abb. 69: Perspektive Sanierung zum Effizienzhaus Plus, Seite 74
  - Abb. 70: Materialcollage, Seite 74
  - Abb. 71: Grundriss KG, Seite 75
  - Abb. 72: Grundriss EG, Seite 75
  - Abb. 73: Grundriss 1.OG, Seite 76
  - Abb. 74: Grundriss DG, Seite 76
  - Abb. 75: Schnitt A-A, Seite 77
  - Abb. 77: Südansicht, Seite 77
  - Abb. 76: Schnitt B-B, Seite 77
  - Abb. 78: Nordansicht, Seite 77
  - Abb. 79: Westansicht, Seite 78
  - Abb. 80: Ostansicht, Seite 78
  - Abb. 81: Energiekonzept, Seite 79
  - Abb. 82: Energieflussdiagramm, Seite 79
  - Abb. 83: Einhausung im Grundriss, Seite 83
  - Abb. 84: Einhausung in der Perspektive, Seite 83

- 
- Tab. 10: Gegenüberstellung der Kennwerte des Bestands, der Sanierung und der Kennwerte des BMU, Seite 86
  - Abb. 85: Einordnung in Energieeffizienzklasse A+ , Seite 86
  - Abb. 86: Perspektive Aufstockung und Sanierung zum Effizienzhaus Plus, Seite 87
  - Abb. 87: Materialcollage, Seite 87
  - Abb. 88: Piktogramm Ablauf Aufstockung Quelle: Tichelmann & Barillas Ingenieure, Seite 88
  - Abb. 89: Grundriss KG, Seite 89
  - Abb. 90: Grundriss EG, Seite 89
  - Abb. 91: Schnitt A-A, Seite 90
  - Abb. 93: Südansicht, Seite 90
  - Abb. 92: Schnitt B-B, Seite 90
  - Abb. 94: Nordansicht, Seite 90
  - Abb. 95: Westansicht, Seite 91
  - Abb. 96: Ostansicht, Seite 91
  - Abb. 97: Energiekonzept, Seite 92
  - Abb. 98: Energieflussdiagramm, Seite 92
  - Abb. 99: Verlauf der Luftdichtheitsebene, Seite 95
  - Tab. 11: Gegenüberstellung der Kennwerte des Bestands, der Sanierung und der Kennwerte des BMU, Seite 96
  - Abb. 100: Einordnung in Energieeffizienzklasse A+ , Seite 96
  - Abb. 101: Systematik der Lebenszyklusbetrachtung, Quelle: eigene Darstellung in Anlehnung an DIN EN ISO 14040, Seite 101
  - Abb. 102: Berücksichtigte Herstellungs- und Nutzungskosten, Seite 102
  - Abb. 103: Die nach DIN EN 15978 berücksichtigten Module , Seite 103
  - Tab. 12: Wirkungsabschätzung des unsanierten Bestands, Seite 108
  - Abb. 104: Gesamtwirkungsabschätzung  $GWP_{100}$ , Seite 109
  - Abb. 105: Verteilung Wirkungsabschätzung  $GWP_{100}$  Bauteile und Anlagentechnik, Seite 109
  - Abb. 106: Gesamtwirkungsabschätzung  $GWP_{100}$  nach Phasen und Gruppen, Seite 109
  - Tab. 13: Wirkungsabschätzung der Sanierung nach EnEV 2016, Seite 117
  - Abb. 107: Gesamtwirkungsabschätzung  $GWP_{100}$ , Seite 118
  - Abb. 108: Verteilung Wirkungsabschätzung  $GWP_{100}$  Bauteile und Anlagentechnik, Seite 118
  - Abb. 109: Gesamtwirkungsabschätzung  $GWP_{100}$  nach Phasen und Gruppen, Seite 119

- Abb. 110: Gesamtwirkungsabschätzung Ozonabbau, Seite 120
- Abb. 111: Verteilung Wirkungsabschätzung Ozonabbau Bauteile und Anlagentechnik, Seite 120
- Abb. 112: Gesamtwirkungsabschätzung Ozonabbau nach Phasen und Gruppen, Seite 120
- Abb. 113: Gesamtwirkungsabschätzung Gesamtprimärenergie, Seite 121
- Abb. 114: Verteilung Wirkungsabschätzung Gesamtprimärenergie Bauteile und Anlagentechnik, Seite 121
- Abb. 115: Gesamtwirkungsabschätzung Gesamtprimärenergie nach Phasen und Gruppen, Seite 121
- Tab. 14: Wirkungsabschätzung der Sanierung zum Effizienzhaus Plus, Seite 129
- Abb. 116: Gesamtwirkungsabschätzung  $GWP_{100}$ , Seite 130
- Abb. 117: Verteilung  $GWP_{100}$  Baukonstruktion und Anlagentechnik, Seite 130
- Abb. 118: Gesamtwirkungsabschätzung  $GWP_{100}$  nach Phasen und Gruppen, Seite 131
- Abb. 119: Gesamtwirkungsabschätzung EP, Seite 131
- Abb. 120: Verteilung EP Baukonstruktion und Anlagentechnik, Seite 131
- Abb. 121: Gesamtwirkungsabschätzung POCP, Seite 132
- Abb. 122: Gesamtwirkungsabschätzung POCP, Seite 132
- Abb. 123: Verteilung POCP Baukonstruktion und Anlagentechnik, Seite 132
- Abb. 124: Gesamtwirkungsabschätzung POCP nach Phasen und Gruppen, Seite 133
- Abb. 125: Gesamtwirkungsabschätzung ODP, Seite 133
- Abb. 126: Verteilung ODP Baukonstruktion und Anlagentechnik, Seite 133
- Abb. 127: Gesamtwirkungsabschätzung ODP nach Phasen und Gruppen, Seite 134
- Abb. 128: Gesamtwirkungsabschätzung PET, Seite 135
- Abb. 129: Verteilung PET Baukonstruktion und Anlagentechnik, Seite 135
- Abb. 130: Gesamtwirkungsabschätzung PET nach Phasen und Gruppen, Seite 135
- Tab. 15: Wirkungsabschätzung der Aufstockung und Sanierung zum Effizienzhaus Plus, Seite 147
- Abb. 131: Gesamtwirkungsabschätzung  $GWP_{100}$ , Seite 148
- Abb. 132: Verteilung  $GWP_{100}$  Baukonstruktion und Anlagentechnik, Seite 148
- Abb. 133: Verteilung  $GWP_{100}$  nach Phasen und Gruppen, Seite 149
- Abb. 134: Gesamtwirkungsabschätzung EP, Seite 149
- Abb. 135: Verteilung EP Baukonstruktion und Anlagentechnik, Seite 149
- Abb. 136: Verteilung EP nach Phasen und Gruppen, Seite 150

- 
- Abb. 137: Gesamtwirkungsabschätzung POCP, Seite 150
  - Abb. 138: Verteilung POCP Baukonstruktion und Anlagentechnik, Seite 150
  - Abb. 139: Verteilung POCP nach Phasen und Gruppen, Seite 151
  - Abb. 140: Gesamtwirkungsabschätzung ODP, Seite 152
  - Abb. 141: Verteilung ODP Baukonstruktion und Anlagentechnik, Seite 152
  - Abb. 142: Verteilung ODP nach Phasen und Gruppen, Seite 152
  - Abb. 143: Gesamtwirkungsabschätzung AP, Seite 153
  - Abb. 144: Verteilung AP Baukonstruktion und Anlagentechnik, Seite 153
  - Abb. 145: Verteilung AP nach Phasen und Gruppen, Seite 153
  - Abb. 146: Gesamtwirkungsabschätzung PET, Seite 154
  - Abb. 147: Verteilung PET Baukonstruktion und Anlagentechnik, Seite 154
  - Abb. 148: Verteilung PET nach Phasen und Gruppen, Seite 154
  - Abb. 149: Prinzip der Askontierung/Aufzinsung, Seite 159
  - Abb. 150: Prinzip der Diskontierung/Abzinsung, Seite 159
  - Abb. 151: Berücksichtigte Herstellungs- und Nutzungskosten, Seite 161
  - Abb. 152: Kapitalwert, Seite 164
  - Abb. 153: Amortisationszeit, Seite 165
  - Abb. 154: Kapitalwerte der Aus- und Einzahlungen,  $t=50a$ , Seite 170
  - Abb. 155: Sowieso- und energiebedingte Mehrkosten, Seite 170
  - Abb. 156: Herstellungskosten nach Kostengruppen, Seite 170
  - Abb. 157: Die energiebedingten Mehrkosten einer Sanierung nach EnEV ist bereits nach drei Jahren amortisiert., Seite 170
  - Abb. 158: Kapitalwerte der Aus- und Einzahlungen,  $t=50a$ , Seite 174
  - Abb. 159: Sowieso- und energiebedingte Mehrkosten, Seite 174
  - Abb. 160: Herstellungskosten nach Kostengruppen, Seite 174
  - Abb. 161: Die Sanierung zum Effizienzhaus Plus amortisiert sich innerhalb von 9 Jahren., Seite 175
  - Abb. 162: Kapitalwerte der Aus- und Einzahlungen,  $t=50a$ , Seite 179
  - Abb. 163: Sowieso- und energiebedingte Mehrkosten, Seite 179
  - Abb. 164: Herstellungskosten nach Kostengruppen, Seite 179
  - Abb. 165: Die Aufstockung und Sanierung zum Effizienzhaus Plus amortisiert sich innerhalb von 8 Jahren., Seite 180
  - Abb. 166: konventionelle Sanierung mit einzelnen Komponenten , Seite 185

- 
- Abb. 167: Integrale Fassade mit zusammengefassten Elementen, Seite 185
  - Abb. 168: Darstellung der Zu- und Ablufträume im Grundriss, Seite 187
  - Abb. 169: Schema Abluft, Seite 187
  - Abb. 170: Eine mögliche Positionierung der Flachkanäle für den PV-Luftkollektor, Seite 187
  - Abb. 171: Schema Zuluft, Seite 187
  - Abb. 172: zentrales Lüftungskonzept, Seite 189
  - Abb. 173: Möglicher Aufbau einer PV-Luftkollektorfassade, Seite 190
  - Abb. 174: Effizienzsteigerung der Wärmepumpe, Seite 191
  - Abb. 175: Effizienzsteigerung eines zentralen Lüftungsgeräts , Seite 191
  - Abb. 176: Energiebilanz am 15. April, Seite 192
  - Abb. 177: Jahressimulation Stromerzeugung und -bedarf, Seite 193
  - Abb. 178: Eigenverbrauchsanteil, Seite 194
  - Abb. 179: Autarkiegrad / Deckungsanteil, Seite 194
  - Abb. 180: Bilanzmodell Überschuss, Seite 195
  - Abb. 181: Bilanzmodell Unterdeckung, Seite 195
  - Abb. 182: Die Grundlage der thermodynamischen Simulation bildet ein vereinfachtes 3D-Gebäudemodell, Seite 196
  - Abb. 183: Modell der Anlagentechnik, Seite 197
  - Abb. 184: Modell der Lüftungseinstellungen, Seite 197
  - Abb. 185: Verlauf mit 10 kWh PV-Batterie am 15. April, Seite 198
  - Abb. 186: Verlauf mit 20 kWh PV-Batterie am 15. April, Seite 198
  - Abb. 187: Verlauf mit 10 kWh PV-Batterie am 15. Juni, Seite 198
  - Abb. 188: Verlauf mit 20 kWh PV-Batterie am 15. Juni, Seite 198
  - Abb. 189: Verlauf mit 10 kWh PV-Batterie am 15. September, Seite 198
  - Abb. 190: Verlauf mit 20 kWh PV-Batterie am 15. September, Seite 198
  - Abb. 191: Eigenverbrauchsanteil und Autarkiegrad der untersuchten Varianten, Seite 199
  - Tab. 16: Wirkungsindikatoren der PV-Akkus, Seite 200
  - Abb. 192: Treibhauspotenzial mit 10 kWh PV-Batterie, Seite 201
  - Abb. 193: Treibhauspotenzial mit 20 kWh PV-Batterie, Seite 201
  - Abb. 194: Statische Amortisationszeit der PV-Batteriespeicher, Seite 202
  - Abb. 195: Das LivingLab in Wuppertal ist das erste Effizienzhaus Plus Quartier nach BMU, Quelle: © BDF, Seite 204

- 
- Abb. 196: Im Aktiv-Stadthaus gibt es zurzeit drei Ladesäulen und fünf Carsharing-Modelle, Quelle: Annekatriin Koch, Seite 204
  - Abb. 197: Ladeinfrastruktur der Umgebung, Seite 205
  - Abb. 198: Anteile Strom für Anlagentechnik und für Haushaltsstrom, Sanierung zum Effizienzhaus Plus, Seite 207
  - Abb. 199: Anteile Strom für Anlagentechnik und für Haushaltsstrom, Aufstockung und Sanierung zum Effizienzhaus Plus, Seite 207
  - Abb. 200: In 74 Wohnungen im Aktiv-Stadthaus (links) wurden Tablets mit der Nutzerinterface-App (rechts) installiert, Quelle: Annekatriin Koch, Seite 208
  - Abb. 201: Startbildschirm, Wärme und Wärme im Detail, Seite 208
  - Tab. 17: Endenergiebedarfe und Endenergieerzeugung auf dem Grundstück, Seite 210
  - Abb. 202: Energiebedarf und -erzeugung Einzelgebäude, Seite 211
  - Abb. 203: Energiebedarf und -erzeugung Energy Plot, Seite 211
  - Abb. 204: Vernetzung zum Energy Plot und Quartier, Seite 211
  - Abb. 205: Gegenüberstellung der Transmissionswärmeverluste, Seite 217
  - Abb. 206: Gegenüberstellung der Jahres-Endenergiebedarfe, Seite 218
  - Abb. 207: Anteile Nutzerstrom und Hilfsenergie für das Szenario Sanierung zum Effizienzhaus Plus, Seite 218
  - Abb. 208: Anteile Nutzerstrom und Hilfsenergie für das Szenario Aufstockung und Sanierung zum Effizienzhaus Plus, Seite 218
  - Abb. 209: Gegenüberstellung der Jahres-Primärenergiebedarfe, Seite 219
  - Abb. 210: Gesamtbetrachtung der energetischen Qualität, Seite 220
  - Abb. 211: Gesamtwirkungsabschätzung  $GWP_{100}$ , Seite 221
  - Abb. 212: Verteilung Wirkungsabschätzung  $GWP_{100}$  Bauteile und Anlagentechnik, Seite 222
  - Abb. 213: Gesamtwirkungsabschätzung  $GWP_{100}$  nach Phasen und Gruppen, Seite 222
  - Abb. 214: Gesamtwirkungsabschätzung PET, Seite 223
  - Abb. 215: Verteilung Wirkungsabschätzung PET Bauteile und Anlagentechnik, Seite 224
  - Abb. 216: Gesamtwirkungsabschätzung PET nach Phasen und Gruppen, Seite 224
  - Abb. 217: Gesamtwirkungsabschätzung , Seite 225
  - Abb. 218: Kapitalwerte,  $t=50a$ , Seite 227
  - Abb. 219: Sowieso-Kosten und energiebedingte Mehrkosten, Seite 228
  - Abb. 220: Herstellungskosten für Baukonstruktion und Anlagentechnik, Seite 228

- 
- Abb. 221: Amortisation energiebedingter Herstellungskosten, Seite 229
  - Abb. 222: Restwerte bei entsprechender Gesamtnutzungsdauer,  $t=50a$ , Seite 230
  - Abb. 223: Gegenüberstellung verschiedener Indikatoren im Netzdiagramm, Seite 231
  - Tab. 18: Gegenüberstellung der vorhandenen Kennwerte mit Kennwerten des IWU und des BMWI/BMUB, Seite 235
  - Tab. 19: Randbedingungen der Potenzialanalyse, Seite 237
  - Abb. 224: Potenzielle Senkung der Treibhausgasemissionen , Seite 238
  - Abb. 225: Potenzielle Senkung des Primärenergiebedarfs , Seite 238
  - Tab. 20: Gegenüberstellung der Ergebnisse, Seite 239





---

## 9. Literaturverzeichnis

Literatur

---

AGEB 2017a

Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen e.V (2017): Struktur der Stromerzeugung in Deutschland 2017, <https://ag-energiebilanzen.de/21-0-Infografik.html>, 22.06.2018.

AGEB 2017b

Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen e.V (2017): Struktur der Stromerzeugung in Deutschland 2017, <https://ag-energiebilanzen.de/21-0-Infografik.html>, 22.06.2018.

AKTIVPLUS E.V. 2015

AktivPlus e.V. (2015): 1. AktivPlus Pilotphase. Projektband, 2. Aufl., S. 62, Frankfurt.

BBSR 2017

Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (2017): Nutzungsdauern von Bauteilen für Lebenszyklusanalysen nach Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen (BNB), Bonn

BKI 2016

Baukosteninformationszentrum Deutscher Architektenkammern (2016): Altbau Baupreise kompakt. Statistische Baupreise für Positionen mit Kurztexten, Stuttgart.

BMI 2017

Bundesministerium des Innern, für Bau und Heimat (2017): ÖKOBAUDAT 2017-I (27.11.2017) – EN 15804 und BNB-konforme Daten für über 1000 verschiedene Bauprodukte, Berlin

BMUB 2016a

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (2016): Wege zum Effizienzhaus Plus. Grundlagen und Beispiele für energieerzeugende Gebäude.

BMUB 2016b

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (2016): Klimaschutzplan 2050. Klimaschutzpolitische Grundsätze und Ziele der Bundesregierung, Berlin.

BMWI / BMUB 2015a

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie; Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (2015): Bekanntmachung der Regeln für Energieverbrauchswerte im Wohngebäudebestand Vom 7. April 2015, S. 10, Berlin.

---

BMW / BMUB 2015b

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie; Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (2015): Bekanntmachung der Regeln zur Datenaufnahme und Datenverwendung im Wohngebäudebestand Vom 7. April 2015, Berlin.

BUCHERT et al. 2011

Buchert, M. / Jenseit, W. / Merz, C. / Schüler, D. (2001): Ökobilanz zum „Recycling von Lithium-Ionen-Batterien“ (LithoRec). Öko-Institut e.V., Freiburg.

CLEMM et al. 2016

Clemm, C. / Mähltitz, P. / Schlösser, A. / Prof. Dr.-Ing Rotter, S. / Prof. Dr.-Ing. Dr. sc. Techn. Lang, K. (2016): Umweltwirkungen von wiederaufladbaren Lithium-Batterien für den Einsatz in mobilen Endgeräten der Informations- und Kommunikationstechnik (IK). Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau.

CLIMATE DATA 2018

Climate Data / AM Online Projects (2018): Klima & Wetter in Darmstadt, <https://de.climate-data.org/location/2129/>, 06.05.2018

DENA 2012

Deutsche-Energie-Agentur GmbH (2016): Planungshandbuch. Wirtschaftlichkeit, Berlin.

DENA 2016

Deutsche-Energie-Agentur GmbH (2016): dena-Gebäudereport. Statistiken und Analysen zur Energieeffizienz im Gebäudebestand, Berlin.

DVGW 2004

Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e.V (2004): Technische Maßnahmen zur Minderung des Legionellenwachstums in Neuanlagen. DVGW-Arbeitsblatt W551, Bonn

ELEKTROAUTO-NEWS.NET 2018

Elektroauto-news.net (2018): Elektroautos im Vergleich, <https://www.elektroauto-news.net/wiki/elektroauto-vergleich>, Schönau 25.04.2018

ERHORN / BERGMANN 2015

Erhorn, H. / Bergmann, A.: Energieeffizienter Neubau von Wohngebäuden – Begleitforschung und Querauswertung von Modellvorhaben (Phase 2). Fraunhofer Institut für Bauphysik IBP, Stuttgart.

EU 2010

Europäische Union (2010): Richtlinie 2010/31/EU des europäischen Parlaments und des Rates vom 19. Mai 2010 über die Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden, Straßburg.

---

HEGGER / KOCH 2016

Prof. Hegger, M. / Koch, A. (2016): „Nutzerinterface für Plusenergie-Mehrfamilienhäuser. Entwicklung eines Nutzerinterfaces zum Energiemanagement des Nutzers in Plusenergie-Mehrfamilienhäusern“. Technische Universität Darmstadt, Fachbereich Architektur, Fachgebiet Entwerfen und Energieeffizientes Bauen, Darmstadt.

KLEIBER et al. 2017

Kleiber, W. / Fischer, R. / Werling, U. (2017): Verkehrswertermittlung von Grundstücken, S. 887-895, Köln.

LOGA et al. 2015

Loga, T. / Stein, B. / Diefenbach, N. / Born, R. (2015): Deutsche Wohngebäudetypologie. Beispielhafte Maßnahmen zur Verbesserung der Energieeffizienz von typischen Wohngebäuden. Institut für Wohnen und Umwelt, 2. erw. Aufl., Darmstadt.

TICHELMANN 2011

Tichelmann (2011): Die erste Sanierung eines Wohnhauses zu einem Plusenergiehaus mit Elektromobilität, Technische Universität Darmstadt, Fachbereich Architektur, Fachgebiet Tragwerksentwicklung und Bauphysik, Darmstadt.

TICHELMANN 2016

Tichelmann (2016): Deutschland-Studie 2015. Wohnraumpotentiale durch Aufstockungen, Technische Universität Darmstadt, Fachbereich Architektur, Fachgebiet Tragwerksentwicklung und Bauphysik, Darmstadt und ISP Eduard Pestel Institut für Systemforschung e. V., Hannover

SCHMITZ / PAULINI 1999

Schmitz, S. / Paulini, I. (1999): Methode zur Bewertung in Ökobilanzen. Methode des Umweltbundesamtes zur Normierung von Wirkungsindikatoren, Ordnung (Rangbildung) von Wirkungskategorien zur Auswertung nach ISO 14042 und 14043 (Version '99). Umweltbundesamt, Seite 20, Dessau

SIRADOS 2017

SIRADOS– WEKA MEDIA GmbH & Co. KG (2017): Baudaten Hoch-/Tiefbau, Kissing.

VGB POWERTECH 2017

VGB PowerTech (2017): Zahlen und Fakten Stromerzeugung 2017/2018, S. 5, Essen.

WEIßMANN 2017

Weißmann, C. (2017): Effizienter Einsatz erneuerbarer Energieträger in vernetzten Wohnquartieren. Entwicklung eines simulationsbasierten Verfahrens zur energetischen, ökologischen und ökonomischen Bewertung, Doktorarbeit, Technische Universität Darmstadt, Darmstadt.

---

WENIGER et al. 2015

Weniger, J. / Bergner, J. / Tjaden, Tjarko / Quaschnig, V. (2015): Dezentrale Solarspeicher für die Energiewende. Hochschule für Technik und Wirtschaft Berlin, Berlin.