Umweltforschungsplan des
Bundesministeriums für Umwelt,
Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit

Forschungskennzahl 3715 41 111 0
UBA-FB-00 [trägt die UBA-Bibliothek ein]

Energieaufwand für Gebäudekonzepte im gesamten Lebenszyklus

von

Dr. Mahler, Boris
Idler, Simone
Nusser, Tobias

Steinbeis-Transferzentrum für Energie-, Gebäude-und Solartechnik, Stuttgart

Dr. Gantner, Johannes

Fraunhofer Institut für Bauphysik IBP, Stuttgart

Steinbeis-Transferzentrum für Energie-, Gebäude-und Solartechnik, Gropiusplatz 10, 70563 Stuttgart

Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP, Nobelstraße 12, 70569 Stuttgart

Im Auftrag des Umweltbundesamtes

Entwurf Endbericht: Stand 27.02.2019

Kurzbeschreibung

Die vorliegende Studie untersucht den Energieaufwand im gesamten Lebenszyklus von verschiedenen Gebäudetypen und Energiekonzepten für den Wohnungsbau.

Für sechs Typgebäude im Neubau und Bestand wurden insgesamt 400 Varianten mit verschiedenen Kombinationen aus Gebäudehülle und Anlagentechnik untersucht. Diese Varianten wurden in vier hochwertige Gebäudeenergiestandards eingestuft: EnEV-2016, Passivhaus, Nullenergie und Plusenergie. Für alle Variantenkombinationen wurden die CO_2-Emissionen[1] (GWP = Treibhauspotenzial), der nicht erneuerbare kumulierte Energieaufwand (KEAne) und die Jahresgesamtkosten ermittelt. Für jeden Gebäudeenergiestandard wurden üblicherweise umgesetzte Varianten definiert und diese hinsichtlich dem Energieaufwand[2] für die Materialien in der Herstellung, Instandsetzung und Lebensende (EoL) sowie dem Energiebedarf im Betrieb detailliert untersucht. Unter Beachtung des Kosten-/Nutzen-Verhältnisses wurde aus der üblichen Bauweise für jeden Gebäudeenergiestandard eine ökologisch optimierte Variante abgeleitet.

Auf Basis der Untersuchungen und Sensitivitätsanalysen werden Empfehlungen für Planer und Gebäudeeigentümer sowie Schwerpunkte für künftiges politisches Handeln abgeleitet. Diese beinhalten unter anderem ein Ranking von Maßnahmen zur Erreichung der Klimaschutzziele und geeignete Instrumente zur Umsetzung. Lenkungswirkung entfaltet nicht die Vorgabe eines Gebäudeenergiestandards, sondern eine Maßnahmenkombination aus regenerativer Wärmeversorgung, lokaler erneuerbarer Stromerzeugung und eine ressourcenschonende Bauweise.

Abstract

The study evaluates the energy expenditure over the entire life cycle of different building types and energy concepts for housing.

For six types of new and existing buildings a total of 400 versions with different combinations of building envelope and system technologies were examined. These were classified in reference to four building energy standards: EnEV-2016, Passive House, Zero Energy and Plus Energy. For all combinations, the CO_2 emissions (GWP = global warming potential), the non-renewable cumulative energy expenditure (KEAne) and the associated total annual costs were determined. For each building energy standard, commonly used designs have been defined and studied in detail focusing on the energy expenditure for the construction phase, maintenance and end of life (EoL) as well as the further energy requirements during the operation phase. Taking into account the cost/benefit ratio, an ecologically optimized version with a lower energy expenditure was derived for each building energy standard. Based on the investigations and sensitivity analysis, recommendations for planners and building owners as well as priorities for future political action are deduced. These include, among others, a ranking of measures to achieve the climate protection goals and suitable instruments for the implementation. A steering effect does not evolve the specification of a building energy standard, but rather a combination of measures of renewable heat supply, local renewable power generation and a resource saving construction.

[1] Im Bericht wird der Begriff CO_2-Emissionen als Synonym für das CO_2-Äquivalent bzw. das Treibhauspotenzial (GWP 100 = Global Warming Potential) verwendet.

[2] Im Bericht wird der Begriff Energieaufwand als Synonym für die untersuchten Wirkungsindikatoren kumulierter Energieaufwand nicht erneuerbar (KEAne) und die CO_2-Emissionen (GWP 100 = Treibhauspotenzial) verwendet.

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung ... 8

Summary ... 14

Einleitung und Ziele der Studie ... 19

1 Grundlagen ... 21

1.1 Typgebäude ... 21

1.2 Untersuchte Energiekonzepte ... 24

1.3 Untersuchte Gebäudeenergiestandards ... 27

1.3.1 Energiebedarfe ... 29

1.3.2 Energiebilanz ... 29

1.3.3 Faktoren der Wirkungsindikatoren ... 29

1.3.4 Betrachtete Systemgrenzen ... 31

1.4 Ökobilanz ... 33

1.4.1 Methodik und Normkonformität ... 33

1.4.2 Datenbasis und Datenbanken ... 34

1.5 Lebenszykluskostenbetrachtung ... 36

1.5.1 Methodik ... 36

1.5.2 Kapitalgebundene Kosten ... 36

1.5.3 Betriebsgebundene Kosten ... 38

1.5.4 Verbrauchsgebundene Kosten ... 40

1.5.5 Erlöse ... 41

2 Energiekonzepte Neubau ... 42

2.1 Variantenauswahl und Voruntersuchung ... 42

2.2 Neubau Mehrfamilienhaus ... 44

2.2.1 Untersuchte Varianten ... 44

2.2.2 KEAne und GWP ... 45

2.2.3 Analyse der Bauweisen ... 50

2.2.4 Ökooptimierte Varianten ... 52

2.3 Neubau Einfamilienhaus ... 55

2.3.1 Untersuchte Varianten ... 55

2.3.2 KEAne und GWP ... 57

2.3.3 Analyse der Bauweisen ... 61

2.3.4 Ökooptimierte Varianten ... 62

3 Energiekonzepte Bestandssanierung ... 66

3.1 Variantenauswahl ... 66

3.2 Sanierung MFH E ... 66
3.2.1 Untersuchte Varianten ... 66
3.2.2 KEAne und GWP ... 68
3.2.3 Ökooptimierte Varianten ... 72
3.3 Sanierung GMH F ... 75
3.3.1 Untersuchte Varianten ... 75
3.3.2 KEAne und GWP ... 77
3.3.3 Ökooptimierte Varianten ... 81
3.4 Sanierung EFH C ... 84
3.4.1 Untersuchte Varianten ... 84
3.4.2 KEAne und GWP ... 86
3.4.3 Ökooptimierte Varianten ... 90
3.5 Sanierung EFH E ... 93
3.5.1 Untersuchte Varianten ... 93
3.5.2 KEAne und GWP ... 95
3.5.3 Ökooptimierte Varianten ... 99
4 Vergleichende Betrachtung ... 103
4.1 Einzelmaßnahmen ... 103
4.2 Mehrfamilienhauskonzepte ... 105
4.3 Einfamilienhauskonzepte ... 108
5 Sensitivitätsanalysen ... 110
5.1 Einfluss Wärmequelle Wärmepumpe ... 110
5.2 Szenario Mehrfamilienhaus autark ... 113
5.3 Aktuelle Förderprogramme ... 115
5.4 Energiebereitstellung Szenario 2050 ... 118
6 Empfehlungen ... 120
6.1 Empfehlungen für Planer und Gebäudeeigentümer ... 120
6.2 Empfehlungen für künftiges politisches Handeln ... 124
7 Ausblick ... 129
8 Literaturverzeichnis ... 130
Abbildungsverzeichnis ... 133
Tabellenverzeichnis ... 136
Abkürzungsverzeichnis ... 140
Anhang A: Konstruktionsaufbauten Typgebäude ... 142
Anhang B: Investitions- und Jahresgesamtkosten ... 148

Anhang C: Ökobilanz 163
Anhang D: Beispielrechnung Ökobilanz 171
Anhang E: Fachgespräch 176

Zusammenfassung

Die vorliegende Studie untersucht den Energieaufwand im gesamten Lebenszyklus von verschiedenen Gebäudetypen und Energiekonzepten für den Wohnungsbau.

Bei der Ermittlung des Energiebedarfs von Gebäuden lag der Schwerpunkt bislang auf der Nutzungsphase der Gebäude. Bei einer ganzheitlichen energetischen Betrachtung von Gebäuden ist jedoch nicht nur der Energiebedarf im Gebäudebetrieb, sondern auch der Energieaufwand für die Herstellung, Instandhaltung und das Lebensende der Gebäudekonstruktion, der sogenannten „grauen Energie“, von Bedeutung.

Für zwei Typgebäude im Neubau und vier Typgebäude im Bestand wurden insgesamt 400 Varianten mit verschiedenen Kombinationen aus Gebäudehülle und Anlagentechnik untersucht. Diese Varianten wurden in vier hochwertige Gebäudeenergiestandards eingestuft: EnEV-2016, Passivhaus, Nullenergie und im Neubau zusätzlich Plusenergie. Darüber hinaus wurde als Szenario für ein neu gebautes Mehrfamilienhaus ein autarkes Gebäude untersucht. Für die Variantenkombinationen wurden das Treibhauspotenzial bzw. die CO_2-Emissionen (GWP = CO_2-Äquivalent), der nicht erneuerbare kumulierte Energieaufwand (KEAne) und die Jahresgesamtkosten ermittelt.

Für jeden Gebäudeenergiestandard wurde für jedes Typgebäude die am häufigsten umgesetzte Maßnahmenkombination aus Gebäudehülle und Anlagentechnik ermittelt und als „übliche Varianten“ definiert. Diese Varianten wurden detaillierter hinsichtlich des Energieaufwands für die Konstruktion in der Herstellung, Instandsetzung und Lebensende (EoL) sowie des Energiebedarfs im Betrieb untersucht und ökologisch optimierte Varianten abgeleitet. Die erarbeiteten Ergebnisse und Analysen beschränken sich auf die Bilanz einzelner Gebäude und beinhalten keine Aussage bezüglich der Auswirkungen auf das übergeordnete Energiesystem.

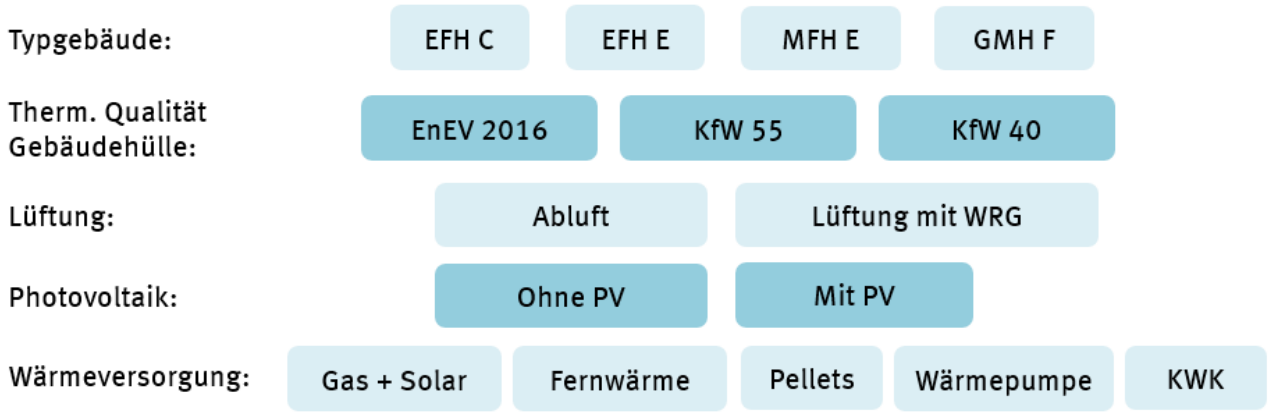
Durch die Untersuchungen sollen folgende Fragen beantwortet werden:

- Mit welchen Maßnahmenkombinationen ist ein klimaneutraler Gebäudebestand zu erreichen?
- Welche Kosten und Energieeinsparungen im Lebenszyklus sind damit verbunden?
- Können bei energetischen Sanierungen die erhöhten Energieaufwendungen für die Herstellung der Baumaterialien durch Einsparung in der Nutzungsphase ausgeglichen werden?
- Inwieweit ist eine verbesserte Gebäudehülle oder ein hoher Aufwand bei der Anlagentechnik zur Verringerung des Energiebedarfs der Nutzungsphase unter Berücksichtigung des kumulierten Energieaufwands und den damit verbundenen Lebenszykluskosten akzeptabel?
- Welche Maßnahmen sind kosteneffizient umzusetzen und tragen in großem Umfang zur Minderung des KEAne und GWP bei?
- Wo sollen künftig die umweltpolitischen Schwerpunkte gesetzt werden und welche Instrumente eignen sich besonders zur Umsetzung?
- Haben die untersuchten Gebäudeenergiestandards eine Lenkungswirkung zur Erreichung der Klimaschutzziele?
- Wie sollte ein künftiges Förderprogramm konzipiert sein?

Die untersuchten Wärmedämmstandards und Anlagentechniken sind am Beispiel der Bestandsvarianten in einer Matrix in Abbildung 1 dargestellt. Es handelt sich dabei um verfügbare, in der täglichen Baupraxis eingesetzte Maßnahmen. Unter Beachtung des Aufwand-/Nutzenverhältnisses soll eine Priorisierung der umzusetzenden Maßnahmen zur Erreichung der Klimaschutzziele sichtbar werden. Sensitivitätsanalysen mit Szenarien zu Energiepreissteigerungen, Veränderung der Energiebereitstellung im Jahr 2050 und der Einfluss derzeitiger Förderprogramme sind in die Betrachtung

eingeflossen. Das Ergebnis sind praktische Empfehlungen für Planer und Gebäudeeigentümer und die Ableitung von Schwerpunkten für künftiges politisches Handeln.

Abbildung 1: Untersuchte Variantenmatrix am Beispiel Bestandssanierung



Quelle: eigene Darstellung (*MFH: PV auf Dach und Fassade)

Im Folgenden sind die Hauptaussagen und geeignete Maßnahmen zur Reduzierung des Energieaufwandes von Wohngebäuden im Lebenszyklus zusammengefasst.

Aufgrund des reduzierten Energiebedarfs und der Nutzung erneuerbarer Energien **liegt bei innovativen Gebäudeenergiestandards der Fokus auch auf dem Energieaufwand für die Gebäudekonstruktion.** Bei typischen Neubauten betragen die „grauen Emissionen“ 10 – 16 kgCO_2-Ä./(m²$_{Wfl.}$·a). Dies entspricht einem Anteil von 25 – 40 % der CO_2-Emissionen für die Konstruktion und den Energiebedarf in der Nutzungsphase. Beim Plusenergiegebäude führt die konsequente lokale Stromerzeugung zur Kompensation der nutzungsbedingten CO_2-Emissionen, so dass bilanziell lediglich Emissionen im Umfang der Konstruktion verbleiben. Durch den Bestanderhalt bei Gebäudesanierungen betragen die „grauen Emissionen“ je nach Gebäudetyp 3 – 8 kgCO_2-Ä./(m²$_{Wfl.}$·a). Dies entspricht einem Anteil von 10 – 25 % der CO_2-Emissionen für die Konstruktion.

Die Lenkungswirkung der bestehenden Gebäudeenergiestandards ist begrenzt. Die Vorgabe eines Gebäudeenergiestandards für die Nutzungsphase ist kein Garant für eine Einsparung an CO_2-Emissionen oder KEAne und führt nicht per se über den gesamten Lebenszyklus zu energieoptimierten Gebäuden. Abhängig von der gewählten Wärmeversorgung und dem Einsatz von Photovoltaikanlagen variiert der Energieaufwand innerhalb der Gebäudeenergiestandards stark. Die Erreichung des Null- oder Plusenergie-Standards ist abhängig von der für Photovoltaik verfügbaren Dachfläche und in der Bestandssanierung daher nicht immer erreichbar.

Tabelle 1: Übersicht der untersuchten Gebäudeenergiestandards

Gebäudeenergiestandard	Anforderung
EnEV 2016 (EnEV 2014 mit Verschärfung ab 01.01.2016)	Einhaltung Jahres-Primärenergiebedarf und der Transmissionswärmetransferkoeffizient HT´ des Referenzgebäudes
Passivhaus Neubau	Heizwärmebedarf ≤ 15 kWh/(m²*a), Nicht erneuerbare Primärenergie PE≤ 95 kWh/(m²*a)
Passivhaus Bestand	Bauteilverfahren EnerPhit mit Grenzwerten für Bauteile
Nullenergie	Jahres-Primärenergiebedarf ≤ 0 (ohne Nutzerstrom)

Gebäudeenergiestandard	Anforderung
Plusenergie (Effizienzhaus-Plus)	Jahres- End- und Primärenergiebedarf < 0 (mit Nutzerstrom)

„Efficiency First“ Um begrenzte Ressourcen zu schonen, ist es notwendig, zuerst den gebäudeseitigen Energiebedarf durch eine effiziente Gebäudehülle und Anlagentechnik und ein energiebewusstes Nutzerverhalten zu minimieren. Im vorliegenden Vorhaben wurden ausschließlich Gebäudekonzepte untersucht, welche eine Mindestdämmung nach EnEV-2016-Neubauniveau einhalten und einen geringen Nutzerstrombedarf (EFH: 2.450 kWh/a; Wohneinheit im MFH: 1.850 kWh/a) sowie eine angemessene Belegungsdichte von durchschnittlich 39 m² Wohnfläche pro Person aufweisen.

Dezentrale Stromerzeugung durch Photovoltaikanlagen mit Eigenstromnutzung trägt kostenneutral zur massiven Senkung des Energieaufwandes bei. Bei einem typischen EnEV-2016-Neubau kann eine PV-Dachanlage 30 – 40 % (15 kgCO_2-Ä./(m²$_{Wfl.}$·a)) der gesamten CO_2-Emssionen einsparen. Voraussetzung für die Nutzung der lokalen Solarenergie ist eine am Gebäude zur Verfügung stehende geeignete (Dach-) Fläche. Im Gebäudebestand ist das Solarpotenzial durch Aufbauten und Dachgauben häufig eingeschränkt. Dennoch empfiehlt es sich hier auch aus ökologischen und wirtschaftlichen Gründen, das vorhandene Potenzial zu nutzen und nachträglich eine Anlage zu installieren. Wird der erzeugte Strom im Gebäude direkt genutzt, wie es bei einer selbst genutzten Immobilie die gängige Praxis ist, sind Photovoltaikanlagen wirtschaftlich. Die direkte Versorgung von Mietwohnungen mit in unmittelbarer Nähe erzeugtem Solarstrom ohne Netzdurchleitung ist in der Vergangenheit häufig aufgrund wirtschaftlicher Rahmenbedingungen gescheitert. Mit dem neuen Mieterstromgesetz (vgl. EEG 2017) fördert die Bundesregierung nun Mieterstrom aus Solaranlagen direkt und schafft den Anreiz für eine breitere Umsetzung neuer Businessmodelle wie das im Aktiv-Stadthaus in Frankfurt durch die ABG Frankfurt HOLDING umgesetzte „Warmmietkonzept“ mit einem Freikontingent an Strom und Wärme für den Mieter (vgl. Hegger 2014).

Wärmepumpen sind ein Wärmeversorgungssystem der Zukunft. Ein zentraler Baustein zur Senkung des Energieaufwands ist die Nutzung regenerativer Energieträger für die Wärmeerzeugung. Durch Wärmepumpensysteme können lokal verfügbare regenerative Energiequellen, wie Erd-, Abwasser- und Umgebungswärme, nutzbar gemacht werden. In Kombination mit einer regenerativen Stromquelle und Niedertemperatursystemen ist die Wärmepumpe eine Schlüsseltechnik der zukünftigen Wärmeversorgung. Aufgrund des derzeitigen Strommix liegen derartige Versorgungsvarianten in Bezug auf CO_2-Emissionen im Neubau und bei der Sanierung von Einfamilienhäusern im Vergleich zu den anderen Techniken und Energieträgern im guten Mittelfeld. In der Bestandssanierung im Mehrfamilienhausbereich erreichen Wärmepumpenlösungen noch nicht die CO_2-Emissionen von KWK Anlagen und liegen im schlechteren Mittelfeld. Wird die künftige Entwicklung der Strombereitstellung mit einem Szenario 2050 von 123 gCO_2-Ä./kWh (heute: 605 gCO_2-Ä./kWh) berücksichtigt, schneiden Gebäudekonzepte mit Wärmepumpensystemen im Vergleich besonders gut ab. Bereits heute zählen Wärmepumpensysteme, vor allem im Einfamilienhausbereich, zu den kostengünstigsten Versorgungsvarianten. Bei der Sanierung von Mehrfamiliengebäuden sind Wärmepumpenlösungen noch verhältnismäßig kostenintensiv. Das Auftreten einer Dunkelflaute ist ein häufiges Argument gegen eine großflächige Wärmepumpenversorgung. Trotz einer großflächigen Verbreitung der Wärmepumpen bis 2050 ändert sich die Stromnachfrage im Gebäudesektor nicht, da parallel elektrische Direktheizungen in schlecht gedämmten Gebäuden ersetzt werden (vgl. BCG/Prognos 2018). Dennoch muss die Versorgungssicherheit einer regenerativen Energieversorgung durch entsprechende Infrastrukturmaßnahmen gewährleistet sein.

Fernwärmesysteme sind weitere Schlüsseltechniken zur Umsetzung der „Wärmewende“ Eine weitere Schlüsseltechnik für die Umsetzung der „Wärmewende“ ist die Bereitstellung von Fernwärme mit hohem regenerativen Anteil oder auf Basis einer Abwärmenutzung und Sekundärbrennstoffen.

Vor allem im verdichteten innerstädtischen Bereich kann Fernwärme aus Sekundärbrennstoffen in Kombination mit KWK, aus industrieller Abwärme oder Abwasserwärme in Kombination mit Wärmepumpensystemen ganzjährig zur Verfügung stehen. Regenerative Energiequellen wie Erd- und Umgebungswärme können über Wärmepumpensysteme in Kombination mit Solarthermie und Photovoltaik und einer Langzeit-Wärmespeicherung für eine Nahwärmeversorgung nutzbar gemacht werden. Erdwärme kann neben einer oberflächennahen Nutzung auch über Tiefengeothermie durch die Nutzung heißer Thermalquellen zur Strom- und Wärmeversorgung erfolgen. Neben konventionellen „warmen“ Fernwärmesystemen mit hohen Vorlauftemperaturen für eine direkte Wärmeversorgung und einer zentralen Wärmeerzeugung gibt es „kalte“ Nahwärmeversorgungen mit Vorlauftemperaturen entsprechend der regenerativen Wärmequellen und dezentralen Wärmepumpen in den Gebäuden.

Effiziente Gebäude sind die Grundlage für eine ressourcenschonende Wärmeversorgung. Auch regenerativen Ressourcen wie Biomasse sind nur begrenzt verfügbar. Daher ist ein effizientes Gebäude mit niedrigem Energiebedarf eine wichtige Voraussetzung zur Realisierung einer ressourcenschonenden Wärmeversorgung. Eine verbesserte Gebäudehülle gemäß KfW Effizienzhaus 55 ist im Einfamilienhausbereich kostenneutral und im Mehrfamilienhausbereich mit geringen Mehrkosten zu realisieren und führt vor allem bei fossilen Energieträgern zu einer maßgeblichen Reduzierung des Energieaufwandes. Können bei Wärmeversorgungskonzepten mit regenerativem Anteil KfW-Fördermittel in Anspruch genommen werden, ist eine Mehrdämmung unter aktuellen Bedingungen sowohl im Ein- als auch im Mehrfamilienhausbereich wirtschaftlich und daher zu empfehlen. Im Hinblick auf die großen Einsparpotenziale durch eine regenerative Wärmeversorgung in Kombination mit Photovoltaikanlagen mit einem guten Kosten-/Nutzen-Verhältnis wird für die Bestandssanierung eine Dämmung auf EnEV-2016-Neubauniveau empfohlen.

Im Einfamilienhausbereich Neubau sind Gebäudekonzepte mit Null- CO_2-Emissionen möglich. Durch alternative Leichtbauweisen in Kombination mit regenerativer Wärmeversorgung und Photovoltaik lassen sich im Einfamilienhausbereich Neubau schon heute Gebäudekonzepte mit CO_2-Emissionen > 0 realisieren. Dies ist jedoch mit einer konventionellen Ziegel- oder Stahlbetonbauweise nicht möglich. Durch eine energetische Sanierung von Einfamilienhäusern können trotz des Bestandserhalts die niedrigen CO_2-Emissionen eines Neubaus nicht erreicht werden. Die Kosten für eine energetische Bestandssanierung sind zudem in ähnlicher Höhe wie für einen kompletten Neubau.

Eine Sanierung von Mehrfamiliengebäuden trägt kosteneffizient und maßgeblich zur Reduzierung des Energieaufwands bei. Der Bestandserhalt durch die Sanierung von Mehrfamiliengebäuden nimmt eine zentrale Rolle im ressourcenschonenden Bauen ein. Aufgrund des guten Kosten-/Nutzen-Verhältnisses hat eine Sanierung von großen Mehrfamiliengebäuden Priorität vor einem Neubau. Durch eine energetische Sanierung lassen sich mit verhältnismäßig geringen Kosten CO_2-Emissionen wie im Neubau von 10 – 15 $kgCO_2$-Ä./($m^2_{Wfl.}$·a) erreichen.

Lüftungsanlagen mit Wärmerückgewinnung sind eine Frage des Komforts und nur bei fossiler Wärmeversorgung energetisch sinnvoll. Die Integration von Lüftungsanlagen mit Wärmerückgewinnung (WRG) führt zu höheren Kosten im Einbau und im Lebenszyklus und ist in erster Linie aus Komfortgründen zu befürworten. Ein hygienischer Mindestluftwechsel kann auch durch kontrollierte Lüftung mit Abluftanlagen erreicht werden. Bei Wärmeversorgungskonzepten mit fossilen Energieträgern führt eine Lüftungsanlage mit WRG zu Einsparungen an CO_2-Emissionen und ist daher auch aus energetischen Gründen sinnvoll. Aufgrund des erhöhten Strombedarfs einer Lüftung mit WRG gegenüber einer reinen Abluftanlage führt diese Maßnahme bei einer regenerativen Wärmeversorgung allerdings zu keiner Einsparung von CO2-Emissionen und nicht erneuerbarer Primärenergie(KEAne). Der erhöhte technische Aufwand durch die Installation einer Lüftungsanlage mit WRG spielt bei der Einsparung an CO_2-Emissionen nur eine untergeordnete Rolle.

Autarke Gebäudeenergiekonzepte sind gesamtwirtschaftlich und ökologisch nicht zielführend. Ein autarkes Gebäude ohne Anschluss an netzgebundene Energie versorgt sich zu jeder Stunde des Jahres selbst mit Energie. Dafür ist ein hoher technischer Aufwand für die regenerative Stromerzeugung, Wasserstoffherstellung und –speicherung notwendig. Die CO_2-Emissionen eines autarken Gebäudes sind vergleichbar mit einer Variante mit Wärmepumpe in Kombination mit einer Photovoltaik-Dachanlage und einer Dämmung nach EnEV-2016 bei gleichzeitig mindestens 80 % höheren Jahresgesamtkosten. Der gebäudeseitige Aufwand für autarke Gebäude ist daher weder aus Kostengründen noch durch Einsparungen an CO_2-Emissionen zu rechtfertigen.

Energiebewusstes Nutzerverhalten

Der durchschnittliche Stromverbrauch eines deutschen 2,3 Personenhaushaltes mit 2.410 kWh pro Jahr (vgl. BMUB 2016) liegt 30 % über dem in der Studie gewählten reduzierten Stromverbrauch mit effizienten Haushaltsgeräten. Eine Ausstattung mit hocheffizienten Haushaltsgeräten (A+ bis A+++), Heizungspumpen und LED-Beleuchtung trägt maßgeblich zur Reduzierung des Nutzerstrombedarfs bei. Das Nutzerverhalten kann durch die Visualisierung der Energieverbräuche sensibilisiert werden. Das im Aktiv-Stadthaus in Frankfurt umgesetzte digitale „Nutzerinterface“ (vgl. Nutzerinterface 2017) informiert den Mieter zeitnah über den eigenen Energie- und Wärmeverbrauch und gibt die Möglichkeit, diesen interaktiv zu steuern.

Themenfelder für künftige umweltpolitische Schwerpunkte und die geeigneten Instrumente mit entsprechender Lenkungswirkung werden im Folgenden dargestellt.

Ressourcenschonendes Bauen im Lebenszyklus forcieren. Um Sanierungsvorhaben und im Neubau Bauweisen mit niedrigem Energieaufwand für die Konstruktion zu forcieren, ist eine Bilanzierung über den gesamten Lebenszyklus (inkl. Herstellphase und EoL) notwendig. Entsprechende bausoftwaretechnische Lösungen zur technischen Umsetzung sind auf dem Markt vorhanden. Eine standardisierte Nachweismethode mit geeignetem vereinfachtem Verfahren muss festgelegt werden. Alternativ zu einer ordnungsrechtlichen Verankerung kann kurzfristig ein neues Förderprogramm zusätzlich zu den bereits bestehenden KfW–Effizienzhäusern aufgelegt werden. In der Schweiz wird die „graue Energie“ durch die zusätzlichen Kriterien im Standard Minergie Eco (MINERGIE 2018) bereits berücksichtigt.

Neuausrichtung der Gebäudebewertung an Klimaschutzzielen ist erforderlich. Auch wenn bei innovativen Gebäudekonzepten im Nullenergie- und Effizienzhaus-Plus-Standard der Anteil „grauer Energie“ überwiegt, darf die Gesamtbilanz der Gebäude nicht vernachlässigt werden. Der Energieaufwand der Nutzungsphase prägt mehrheitlich den Gebäudeenergieaufwand im Lebenszyklus und kann kosteneffizient reduziert werden. Die Einführung eines CO_2-Labels für Gebäude ist ein Instrument mit Lenkungswirkung zur Reduzierung des Gesamtenergieaufwandes. Konkret wird vorgeschlagen, einen festen CO_2-Zielwert für Gebäude festzulegen anstatt eine Bewertung über Referenzgebäude und den Primärenergiebedarf vorzunehmen (vgl. Mahler 2018). Der Ausweis von CO_2-Emissionen ist ein wichtiger Aspekt für die Berichterstattung und das Monitoring der Fortschritte hinsichtlich erreichter Klimaschutzziele im Gebäudebereich (vgl. EPBD Entwurf 2018). Die Bilanzgrenzen für die Gebäudebewertung müssen erweitert werden. Zusätzlich zum Energieaufwand für den Gebäudebetrieb müssen der Nutzerstrom und die „graue Energie“ für die Gebäudekonstruktion bilanziert werden. Auf Basis eines CO_2-Zielwertes für das Jahr 2050 kann ein individueller Klimaschutzplan für Gebäude gefordert werden. Bestandteil des Plans ist die Identifizierung von kosteneffizienten Maßnahmen und ein, aus Kosten- und praktischen Gründen, geeigneter Zeitpunkt zur Umsetzung der Maßnahmen. Die Kostenbewertung der Maßnahmen und die Erstellung von individuellen Sanierungsfahrplänen durch entsprechende finanzielle bzw. steuerliche Anreize hängt von weiteren Aspekten wie beispielsweise der Einführung einer CO_2-Abgabe oder CO_2-Bepreisung ab.

Quartiers-Ansätze entwickeln und Kompensationsmaßnahmen ermöglichen. Quartiersansätze müssen auf energieeffizienten Gebäuden gemäß dem Prinzip „Efficiency First“ basieren und darüber hinaus eine Anrechnung von übergeordneten Maßnahmen ermöglichen. Für die gewünschte Kopplung der Sektoren Strom, Wärme und Mobilität ist dies ein entscheidender Aspekt. Kompensationsmöglichkeiten durch den Bezug von Ökostrom, regenerativ erzeugtem Gas oder CO_2-Senken innerhalb der Bilanzgrenze müssen in begrenztem Rahmen erlaubt und durch glaubwürdige Zertifikate bestätigt werden. In der momentanen ökobilanziellen Gebäudebewertung wird der überschüssig dezentral erzeugte erneuerbare Strom nur teilweise in die Gebäudebilanz einberechnet. Um den Einfluss einer dezentralen Energieerzeugung zu bilanzieren, muss eine einheitliche Gutschrift für den Anteil des ins Netz eingespeisten Stroms erfolgen. Die Möglichkeit einer Doppelbilanzierung des regenerativen Stromanteils muss dabei ausgeschlossen werden. Eine Förderung für CO_2-Einsparungen in Planung und Betrieb ist technikoffen und hat eine größere Lenkungswirkung als die Förderung von Gebäudeenergiestandards oder Einzelmaßnahmen nach dem Gießkannen-Prinzip.

Dekarbonisierung der Energie-Infrastruktur zur Erreichung der Klimaschutzziele. Um die mittel- und langfristig gesteckten Klimaschutzziele im Gebäude zu erreichen, ist eine beschleunigte Dekarbonisierung der Energieversorgung von Gebäuden erforderlich. Der Anteil kohlenstoffarmer und erneuerbarer Energieträger in den Strom-, Gas- und Wärmenetzen muss deutlich erhöht werden. Die dezentrale und zentrale Strombereitstellung aus Sonnen- und Windenergie hat dabei eine Schlüsselrolle. Mit dem Mieterstromgesetz (vgl. EEG 2017) ist eine wichtige Voraussetzung für die Nutzung der Solarenergie geschaffen. Das Mieterstrommodell für die Eigenstromnutzung des erzeugten Solarstroms muss jedoch auf weitere dezentrale Energieerzeuger wie den durch KWK oder Kleinstwindkraftanlagen erzeugten Strom ausgeweitet werden. Der Abbau von Hürden bei der Sektorkopplung zwischen Strom, Wärme und Verkehr ist ein weiterer wichtiger Schritt. Durch das bestehende Umlagen- und Abgabensystem (EEG-Umlage) werden Maßnahmen wie Power to Gas, Stromspeichersysteme und Elektromobilität benachteiligt. Ein weiteres Hemmnis für die Umsetzung derartiger Vorhaben ist der Wegfall der Gewerbesteuerbefreiung für die Wohnungswirtschaft, sobald sie als Energieversorger auftritt. Verbraucherseitig kann eine regenerative Energiebereitstellung durch eine flexible Erzeugungs- und Verbraucherinfrastruktur mit variablen Stromtarifen unterstützt werden. Hierfür eignen sich Nahwärmesysteme mit Wärmepumpen und Elektrofahrzeugflotten mit entsprechendem Nachfrage- und Erzeugungsmanagement. Ein solches Preissystem zielt darauf Lastspitzen zu reduzieren, regenerative Energien besser zu nutzen und die Energiekosten des Verbrauchers zu reduzieren. Eine dekarbonisierte Energie-Infrastruktur setzt auch voraus, dass die Versorgungsnetze einen hohen Anteil erneuerbarer Energien leisten können. Infrastrukturmaßnahmen für ein flexibles Stromsystem sind notwendig um volatile Erzeugung auszugleichen und auch in Zeiten einer Dunkelflaute die Versorgungssicherheit zu gewährleisten. Investitionen in die Energieinfrastruktur durch Netzertüchtigung und Netzausbau sind notwendig. Dies betrifft Übertragungs- und Verteilnetze in Deutschland, aber auch einen überstaatlichen Netzausbau. Der Bereitstellung flexibler Leistung durch Zubau von Gaskraftwerken kommt eine größere Rolle zu und zusätzliche dezentrale und zentrale Speicherkapazitäten sowie Power-to-X-Anwendungen müssen bereitgestellt werden. Um eine Lenkungswirkung hinsichtlich der Reduktion der Treibhauspotenziale zu entfalten, wird die Einführung einer CO_2-Bepreisung von Energieträgern über alle Sektoren gefordert (vgl. Lange 2017/ Mihm 2017/ Bals 2018) anstatt von Einzelförderungen von Gebäudeenergiestandards, Heizungssystemen und Sanierungsmaßnahmen an der Gebäudehülle. Nach dem Verursacherprinzip würden die externen Kosten dort getragen, wo sie verursacht werden, und die Verbraucher entlastet. Gebäudeeigentümer und -nutzer würden aus eigenem Interesse klimafreundlich handeln, weil die Kosten für die Nutzung fossiler Energieträger stark stiegen.

Summary

The study evaluates the energy expenditure over the entire life cycle of different building types and energy concepts for housing.

To determinate the energy requirements of buildings, the focus has been so far on the operation phase of buildings. In a holistic approach to evaluate the energetic performance of buildings, however, not only the energy consumption in the building operation phase, but also the energy expenditure for the production, maintenance and end of life of the building construction, the so-called "grey energy" is of importance.

For six types of new and existing buildings a total of 400 versions with different combinations of building envelope and systems technologies were examined. These were classified in reference to the building energy standards: EnEV-2016, Passive House, Zero Energy Building and plus energy standard (new buildings only). In addition, an autarchic building was investigated as a scenario for the new multi-family house. For the variants, the CO_2 emissions or the global warming potential (GWP = CO_2 equivalent), the non-renewable cumulative energy expenditure (KEAne) and the associated total annual costs were determined.

For each building energy standard and building type, the most frequently implemented combination of construction, building envelope and system technology was determined and defined as "standard variants". These variants were examined in greater detail with regard to the energy expenditure for the construction phase, maintenance and end of life (EoL) as well as the further energy requirements during the operation phase. Taking into account the cost/benefit ratio, an ecologically optimized version with a lower energy expenditure was derived for each building energy standard. The results and analyses are limited to the balance of individual buildings and do not include any statement regarding the impact on the overarching energy system.

The investigations should answer the following questions:

- With which combination of measures a climate-neutral building stock can be achieved?
- Which costs and energy savings are associated with it in the entire life cycle?
- Can energetic refurbishment compensate the increased energy costs for the construction during the operation phase?
- To what extent an improved building envelope or a high degree of technical complexity in system technologies is acceptable in order to reduce the energy needs of the operation phase, taking into account the cumulative energy expenditure and the associated life-cycle costs?
- Which measures are cost-effective to implement and contribute to a large extent to the reduction of KEAne and GWP?
- Where should environmental policy priorities be set in the future and which instruments are especially suitable for implementation?
- Do the examined building energy standards have a steering effect regarding the achievement of the climate protection goals?
- How should a future funding program be designed?

The investigated thermal insulation standards and system technologies are shown using the example of the variants of the building stock in a matrix in Figure 1. These are available and in the common construction practice used measures. Taking into account the cost/benefit ratio, a prioritization of the measures to be implemented to achieve the climate protection goals becomes visible. Sensitivity analyzes with scenarios for energy price increases, changes in the energy supply in 2050 and the influ-

ence of current funding programs have been included in the analysis. The result is practical recommendations for planners and building owners and the derivation of priorities for future political action.

Key messages and appropriate measures for reducing the energy consumption of residential buildings in the life cycle are presented below.

Due to the reduced energy demand and the use of renewable energies, in the case of innovative building energy standards the focus is also on the energy required for buildings construction. For typical new buildings, the "grey energy" is 10 – 16 kgCO_2-E./(m²la·a). This corresponds to a share of 25 – 40 % of CO2 emissions for the construction and energy requirements of the operation phase. In case of a plus energy building, the consequent local generation of electricity leads to the compensation of the CO2 emissions in the operation phase and only emissions to the extent of the construction remain. Due to the preservation of the stock in building renovations, the "grey energy depending on the building type is 3 – 8 kgCO_2-E./(m²la·a). This corresponds to a share of 10 – 25 % of CO2 emissions for the construction and energy requirements of the operation phase.

The steering effect of existing building energy standards is limited. The specification of a building energy standard concerning the operation phase does not guarantee a saving in CO_2 emissions or “KEA” and does not lead to energy-optimized buildings over the entire lifecycle by itself. Depending on the selected heat supply and the implementation of photovoltaic systems, the energy expenditure within the building energy standards varies significantly. The achievement of a zero or plusenergy building depends on the available roof area for photovoltaics and is therefore not always achievable in the refurbishment of existing buildings.

"Efficiency First" In order to save limited resources it is necessary to minimize the energy needs of the building by means of an efficient building envelope and system technology and an energy-conscious user behavior. In the present study, only building concepts with a minimum insulation according to the EnEV-2016-standard for new buildings, a low user electricity demand (2,450 kWh per year for a single family house and 1,850 kWh per year for a residential unit in a multi-family house) and an adequate occupancy density on average of 39 m² living space per person were examined.

Decentralized energy generation by photovoltaic systems with direct energy use contributes to a massive reduction in energy consumption at no costs. In a typical new building in EnEV-2016-standard a photovoltaic roof system can save 30 - 40 % (15 kgCO_2/(m²la·a)) of the total CO_2 emissions. Precondition for the use of local solar energy is a suitable (roof)-area. Typical roof forms and dormers in the building stock often limit the solar potential. Nevertheless, for ecological and economic reasons, it is advisable to use the existing potential and install a system subsequently. If the generated electricity is used directly in the building, as is the common practice in a self-used property, photovoltaic systems are economical. The direct supply of rented flats with solar power generated in the immediate vicinity without network transmission has often failed in the past due to economic conditions. With the new Tenant Electricity Act (see EEG 2017), the federal government is now promoting tenant electricity from solar systems directly and creating an incentive for broader implementation of new business models, such as the " Warmmietkonzept" implemented by ABG Frankfurt HOLDING in the Aktiv-Stadthaus in Frankfurt with a free quota of electricity and heat for the tenant (see Hegger 2014).

Heat pumps are a heat supply system of the future. A key element in reducing energy consumption is the use of renewable energy sources for heat generation. Heat pump systems can be used to harness locally available renewable energy sources such as geothermal, sewage and ambient heat. In combination with a regenerative power source and low-temperature systems, the heat pump is a key technology for future heat supply. Due to the current electricity mix, such supply options are in the good midfield compared to other technologies and energy sources in terms of CO_2 emissions of new

buildings and in case of refurbishment of single-family houses. In the refurbishment of existing multi-family houses, heat pump solutions do not yet reach the CO_2 emissions of CHP plants and are in the worse midfield. However considering the future development of power supply with a scenario in 2050 of 123 gCO_2-E./kWh (today: 605 gCO_2-E./kWh), building concepts with heat pump systems are one of the best. Heat pump systems are already one of the most cost-efficient supply options, especially in the single-family home sector. When renovating multi-family buildings, heat pump solutions are still relatively expensive. The occurrence of a dark slack is a common argument against a large-scale heat pump supply. Despite widespread distribution of heat pumps by 2050, the demand for electricity in the building sector is not changing, as parallel electric direct heating systems are being replaced in poorly insulated buildings (see BCG / Prognos 2018). Nevertheless, the security of a regenerative energy supply must be guaranteed by appropriate infrastructure measures.

District heating systems are another key technology for implementing the "heat change" Another key technology for the implementation of the "heat change" is the provision of district heating with a high regenerative share or based on waste heat and secondary fuels. Especially in densified urban areas, district heating from secondary fuels in combination with cogeneration, from industrial waste heat or wastewater heat in combination with heat pump systems can be available all year round. Regenerative energy sources such as natural and ambient heat can be harnessed by heat pump systems in combination with solar thermal and photovoltaic systems and long-term heat storage for local heating supply. Geothermal energy can be used in addition to near-surface use also via deep geothermal by the use of hot thermal sources for electricity and heat supply. In addition to conventional "warm" district heating systems with high flow temperatures for direct heat supply and central heat generation, there are "cold" local heating supplies with flow temperatures corresponding to the regenerative heat sources and decentralized heat pumps in the buildings.

Efficient buildings are the basis for a resource-saving heat supply. Renewable resources such as biomass are limited. Therefore an efficient building with low energy requirements is an important prerequisite for the realisation of a resource saving heat supply. An improved building envelope in accordance with KfW Effizienzhaus 55 leads to significant reductions in CO_2-emissions especially in case of fossil fuels and can be realized cost neutral in single-family houses and with low additional costs in multi-family houses. If for heat supply concepts with a regenerative share corresponding KfW subsidies can made use of, insulation in both single-family and multi-family dwellings under current conditions is economical and therefore recommended. Regarding the large potential savings caused by a regenerative heat supply combined with photovoltaic systems with a good cost-/utilization ratio, for renovation of existing building an EnEV 2016 insulation level is recommended.

Climate-neutral building concepts are possible for new single-family houses. By using alternative lightweight construction methods in combination with regenerative heat supply and photovoltaics, it is already possible today to realize new single-family houses with CO_2 emissions < 0. However, this is not possible with a conventional brick or reinforced-concrete construction. Despite the conservation of the building stock it is not possible to achieve the low CO_2 emissions of a new building by the energetic refurbishment of an existing single-family house. Moreover the costs for an energetic refurbishment of a single-family house are at a similar level as for a completely new building.

Refurbishments of multi-family buildings contributes cost-effectively and significantly to the reduction of energy consumption. Preservation by refurbishment of multi-family buildings plays a central role in sustainable construction. Due to the good cost/benefit ratio, the refurbishment of large multi-family buildings has priority over a new building. Energetic refurbishment allows to achieve CO_2 emissions of 10 - 15 $kgCO_2$-E./(m^2la·a) comparable to new buildings at relatively low cost.

Ventilation systems with heat recovery are a matter of comfort and only useful in combination with fossil heat supply. The integration of ventilation systems with heat recovery leads to higher installa-

tion and life cycle costs and is justified primarily for comfort reasons. A hygienic minimum air exchange can also be guaranteed by controlled ventilation with only exhaust air systems. In combination with heat supply concepts based on fossil fuels, a ventilation system with heat recovery leads to savings in CO_2 emissions and is therefore reasonable. However, due to the increased electrical energy demand for ventilation with heat recovery compared to an exhaust air system, this measure does not save CO_2 emissions or non-renewable primary energy (KEAne) in combination with regenerative heat supply.

The increased technical complexity of installing a ventilation system with heat recovery only therefore plays a subordinate role in reducing CO_2 emissions.

Autarchic energy concepts for buildings are economically and ecologically not expedient. A self-sufficient building supplies itself with energy at every hour of the year. This requires a high level of technical complexity for the regenerative power generation, hydrogen production and storage. The CO_2 emissions of an autarchic building are comparable to a concept with heat pump in combination with a photovoltaic roof system and an insulation according to EnEV-2016-standard but with simultaneously > 80 % total annual additional costs. The effort for autarchic buildings is therefore justified neither for cost reasons nor through savings in CO_2 emissions.

Energy-conscious user behavior

The average power consumption of a german 2,3 person household with 2,410 kWh per year (see BMUB 2016) is 30 % higher than the reduced power consumption based on efficient household appliances selected in the study. An equipment with highly efficient household appliances, heating pumps and LED lighting contributes significantly to the reduction of user electricity demand. User behavior can be sensitized by visualizing the energy consumption. The digital "user interface" implemented in the "Aktiv-Stadthaus" in Frankfurt (see user interface 2017) informs the tenant promptly about their own energy and heat consumption and gives them the opportunity to control it interactively.

Topics for future environmental priorities and the appropriate instruments with corresponding steering effect are presented below.

Forcing sustainable construction in the life cycle. In order to force refurbishment projects and new constructions with low energy expenditure for the construction, accounting methods over the entire life cycle (including manufacturing phase and EoL) is necessary. Corresponding solutions of software is available on the market. A standardized method with a suitable simplified procedure must be defined. As an alternative to regulatory conditions, a new support program may be launched at short notice in addition to the existing KfW Efficiency Houses. In Switzerland, the "grey energy" is already taken into account by the additional criteria in the “Minergie Eco” standard (MINERGIE 2018).

Realignment of the building assessment to climate protection targets is required. Even if the proportion of "grey energy" predominates in innovative building concepts in zero or plusenergy houses, the overall balance of the buildings must not be neglected. The energy expenditure of the operation phase predominantly determines the energy expenditure of the building in the life cycle and can be reduced cost-efficiently. In order to ensure building efficiency, it is recommended that the current EnEV new building requirements for building thermal insulation be fixed both for new construction projects and for refurbishment projects. The introduction of a CO_2 label for buildings is an instrument with a steering effect to reduce the total energy expenditure. It is proposed to set a fixed CO_2 target for buildings instead of carrying out an assessment on reference buildings and the primary energy demand (see Mahler 2018). The reporting of CO_2 emissions is an important aspect for the reporting and the monitoring of progress towards climate protection goals achieved in the building sector (see EPBD draft 2018).

The balance limits for the building evaluation must be extended. In addition to the energy expenditure for the building operation, the user electricity consumption and the "grey energy" for the building construction must be balanced. Based on a CO_2 target for the year 2050, an individual climate protection plan for buildings can be required. Part of the plan is the identification of cost-effective measures and, for cost and practical reasons, a suitable time to implement the measures. The cost evaluation of the measures and the creation of individual refurbishment schedules with corresponding financial or tax incentives depends on further aspects such as the introduction of a CO_2 tax or CO_2 pricing. Develop neighborhood approaches and enable compensation measures. Neighborhood approaches must be based on energy-efficient buildings in accordance with the "Efficiency First" principle and must allow a crediting of superordinate measures. For the requested linking of the sectors electricity, heat and mobility this is a significant aspect. Compensation options using green electricity, regenerative generated gas or CO_2 sinks within the balance limit should be permitted to a limited extent and must be confirmed by credible certificates. In the current LCA building assessment, the excessively decentralized generated renewable electricity is only partially included in the energetic balance of the building. In order to balance the impact of decentralized energy production, a consistant credit must be given for the amount of electricity fed into the grid. The possibility of a double balancing of the renewable electricity amount must be excluded. Funding for CO_2 savings in design and operation is technology-open and has a greater steering effect than the promotion of building energy standards or individual measures using the watering can principle.

Decarbonisation of the energy infrastructure to achieve the climate protection goals. In order to achieve the medium and long-term climate protection goals in the building, a speed-up decarbonisation of the energy supply of buildings is required. The share of low-carbon and renewable energy sources in the electricity, gas and heating networks must be significantly increased. The decentralized and central supply of electricity from solar and wind energy plays a key role. The Tenants Power Act (see EEG 2017) has created an important condition for the use of solar energy. However, the tenant power model for direct use of the generated solar power must be extended to other technologies such as electricity generated by CHP or micro-wind turbines.

Reducing barriers to sectoral linkages between electricity, heat and transport is another important step. The existing levy and tax system (EEG apportionment) disadvantages measures such as P2G, electricity storage systems and e-mobility. Another obstacle to the implementation of such projects is the omission of the trade tax exemption for the housing economy as soon as it functions as an energy supplier. On the side of the consumer, a renewable energy supply can be supported by a flexible generation and consumer infrastructure with variable electricity tariffs. For this purpose, local heating systems with heat pumps and electric vehicle fleets with appropriate demand and generation management are suitable. Such a pricing system aims to reduce peak loads, make better use of renewable energies and reduce the energy costs of the consumer. A decarbonized energy infrastructure also requires that supply networks can provide a high percentage of renewable energy.

Infrastructure measures for a flexible power system are necessary to compensate for volatile generation and to ensure security of supply even in times of a dark slack. Investments in the energy infrastructure through net upgrading and grid expansion are necessary. This applies to transmission and distribution grids in Germany but also to supranational grid expansion. The provision of flexible power through the addition of gas power plants is becoming more important and additional decentralized and centralized storage capacities and power-to-X applications must be provided. In order to develop a steering effect with regard to the reduction of CO_2-emissions, the introduction of a CO_2 tax through CO_2 pricing of energy sources across all sectors is required (see Lange 2017 / Mihm 2017 / Bals 2018) instead of individual subsidies for building energy standards, heating systems and renovation measures. According to the “polluter pays” principle, the external costs would be borne where they are caused and the consumers would be relieved.

Einleitung und Ziele der Studie

Klimaschutz ist für die gesamte Gesellschaft eine enorme Herausforderung und heute eine der drängendsten Aufgaben für die Politik. Die Bundesregierung hat sich im 2010 beschlossenen Energiekonzept zum Ziel gesetzt, den Treibhausgasausstoß bis 2050 gegenüber 1990 um 80 - 95 % und den Primärenergieverbrauch bis 2050 gegenüber 2008 um 50 % zu senken.

Bei der Erreichung der energie- und klimaschutzpolitischen Ziele in Deutschland nehmen Gebäude eine zentrale Rolle ein, da rund 40 Prozent der nationalen CO_2-Emissionen in diesem Bereich entstehen. Im Rahmen des Energiekonzeptes hat sich die Bundesregierung für den Gebäudebereich folgende Ziele gesetzt:

- Der Primärenergiebedarf des Gebäudebestandes soll bis 2050 um rund 80 % gesenkt werden.
- Der Wärmebedarf der Gebäude soll bis 2020 um 20 % gesenkt werden.
- Die Sanierungsrate des Gebäudebestandes soll auf 2 % pro Jahr verdoppelt werden.

Die Umsetzung dieser Ziele soll zu einem nahezu klimaneutralen Gebäudebestand bis 2050 führen. Klimaneutral bedeutet in diesem Zusammenhang, dass die Gebäude nur noch einen sehr geringen Energiebedarf aufweisen und der verbleibende Energiebedarf überwiegend durch erneuerbare Energien gedeckt wird.

Eine Diskussion besteht, ob und mit welchen Maßnahmenkombinationen ein klimaneutraler Gebäudebestand zu erreichen sei und welche Kosten damit verbunden sind. Bei der Ermittlung des Energiebedarfs von Gebäuden lag der Schwerpunkt bislang auf der Nutzungsphase der Gebäude. Bei einer ganzheitlichen energetischen Betrachtung von Gebäuden ist jedoch nicht nur der Energiebedarf im Gebäudebetrieb, sondern auch der Energieaufwand für die Herstellung, Instandhaltung und das Lebensende der Gebäudekonstruktion, der sogenannten „grauen Energie“, von Bedeutung.

Ziel des Forschungsvorhabens ist die Analyse verschiedener Gebäudetypen und –konzepte im Wohnungsbau hinsichtlich dem Energieaufwand im gesamten Lebenszyklus. Für zwei Typgebäude im Neubau und vier Typgebäude im Bestand wurden insgesamt 400 Varianten mit verschiedenen Kombinationen aus Gebäudehülle und Anlagentechnik untersucht. Diese wurden hinsichtlich der Gebäudeenergiestandards EnEV-Neubau-2016, Passivhaus, Nullenergiegebäude und im Neubau zusätzlich des Plusenergiestandards eingestuft. Darüber hinaus wurde als Szenario für ein Mehrfamilienhaus Neubau ein autarkes Gebäude untersucht. Für die Erreichung der unterschiedlichen Gebäudeenergiestandards wurde für jedes Typgebäude eine übliche Variante definiert. Die übliche Variante ist dabei die für den jeweiligen Standard am häufigsten umgesetzte Maßnahmenkombination aus Gebäudehülle und Anlagentechnik. Ausgehend von den üblichen Varianten der Gebäudeenergiestandards wurden für die Typgebäude ökooptimierte Varianten abgeleitet. Für die Varianten wurden die CO_2-Emissionen (GWP), der nicht erneuerbare kumulierte Energieaufwand (KEAne) und die Jahresgesamtkosten (JGK) ermittelt.

Durch die Untersuchungen sollen folgende Fragen beantwortet werden:

- Ob und mit welchen Maßnahmenkombinationen ein klimaneutraler Gebäudebestand zu erreichen ist und welche Kosten und Energieeinsparungen im Lebenszyklus damit verbunden sind.
- Können bei energetischen Sanierungen die erhöhten Energieaufwendungen für die Herstellung in der Nutzungsphase ausgeglichen werden?
- Inwieweit eine verbesserte Gebäudehülle oder ein hoher technischer Aufwand bei der Anlagentechnik zur Verringerung des Energiebedarfs der Nutzungsphase unter Berücksichtigung

des kumulierten Energieaufwands und dem damit verbundenen Lebenszykluskosten akzeptabel ist.

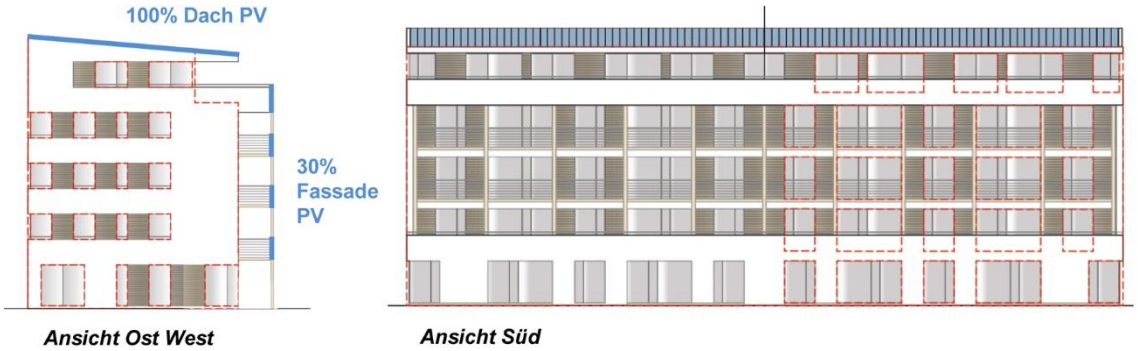
- Welche Maßnahmen sind kosteneffizient umzusetzen und tragen in großem Umfang zur Minderung des KEAne und der CO_2-Emissionen bei?
- Wo sollen künftig die umweltpolitischen Schwerpunkte gesetzt werden und welche Instrumente eignen sich besonders zur Umsetzung?
- Haben die untersuchten Gebäudeenergiestandards eine Lenkungswirkung hinsichtlich der Erreichung der Klimaschutzziele?
- Wie sollte ein künftiges Förderprogramm konzipiert sein?

1 Grundlagen

1.1 Typgebäude

Die Untersuchungen wurden anhand von ausgewählten Typgebäuden im Neubau und Bestand durchgeführt. Stellvertretend für den Neubaubereich wurde ein mittelgroßes Mehrfamilienhaus (MFH) mit 20 Wohneinheiten und ein Reihenendhaus (EFH) ausgewählt (s. Abbildung 2 und Abbildung 3).

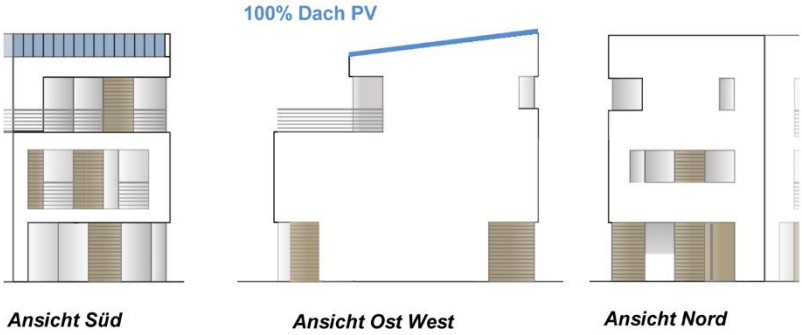
Abbildung 2: Typgebäude Neubau Mehrfamilienhaus



Quelle: Entwurf nach Eble Messerschmidt Partner 2015

Das Mehrfamiliengebäude in üblicher Bauweise wird als Massivbau in Stahlbetonbauweise mit Wärmedämmverbundsystem errichtet.

Abbildung 3: Typgebäude Neubau Einfamilienhaus



Quelle: Entwurf nach Eble Messerschmidt Partner 2015

Das Einfamilienhaus in üblicher Bauweise wird als Massivbau in Kalksandstein mit Wärmedämmverbundsystem und einem Dach in Holzkonstruktion errichtet. Für die ökooptimierte Variante wird bei beiden Typgebäuden eine Holzständerbauweise mit Zellulosefaserdämmung angesetzt. Der Aufbau der Hauptbauteile ist dem Anhang A zu entnehmen. In Tabelle 2 sind die Kenndaten der Typgebäude für den Neubau zusammengefasst.

Tabelle 2: Übersicht Typgebäude Neubau

	Einfamilienhaus	Mehrfamilienhaus
Vollgeschosse / WE	2,5 / 1	4,5 / 20
Wohnfläche [m²]	135	1.731 (86 m²/WE)
AN nach EnEV [m²]	176	2.275
A/V [-]	0,61	0,39
Fensterflächenanteil [%]	18,5	31,9
Dachform	Pultdach 7° Süd	Pultdach 5° Süd
Photovoltaik	6,4 kWp	65,1 kWp (3,3 kWp/WE)

Quelle: Steinbeis-Transferzentrum EGS, Details s. Anhang

Für die Abbildung des Gebäudebestandes wurde auf die Gebäudetypologie und deren Verteilung in Deutschland gemäß IWU (vgl. IWU 2015) zurückgegriffen. Es wurden Typgebäude der Baualtersklassen 1919 - 1978 ausgewählt. Die unmittelbar vor einer Sanierung stehenden Gebäude dieser Baualtersklasse wurden vor der ersten Wärmeschutzverordnung errichtet, als die Anforderungen an den Wärmeschutz gering waren. Die Typgebäude nach Abbildung 4 wurden ausgewählt, da sie für die Baualtersklassen 1919 - 1978 repräsentativ sind und keinen Denkmalschutzanforderungen unterliegen.

Abbildung 4: Typgebäude Sanierung

Quelle: IWU (2015)

Die Konstruktionen der Hauptbauteile und deren Sanierungsvarianten sind im Anhang dargestellt. In Tabelle 3 sind die Kenndaten der Bestandsgebäude zusammengefasst.

Tabelle 3: Übersicht Typgebäude Sanierung im Bestand

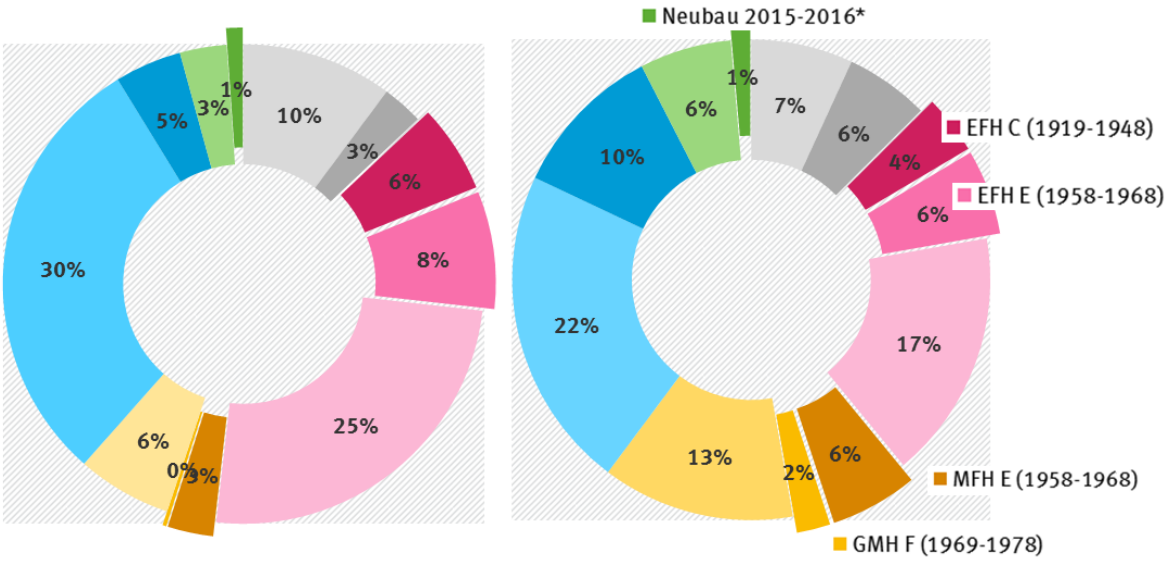
	EFH C	EFH E	MFH E	GMH F
Baualtersklasse	1919-1948	1958-1968	1958-1968	1969-1978
Vollgeschosse / WE	2/2	1/1	4 / 32	8 / 48
Wohnfläche [m²]	275,0 (138 m²/WE)	110,2	2.844,6 (88 m²/WE)	3.020 (63 m²/WE)
AN nach EnEV [m²]	336,8	160,9	3.327	3.137,6
A/V [-]	0,616	0,922	0,432	0,383
Fensterflächenanteil [%]	18,1	15,1	19,9	20,4
Dachform	Walmdach	Satteldach	Flachdach	Flachdach

	EFH C	EFH E	MFH E	GMH F
Photovoltaik	2,8 kWp (30 % Dach S) 1,4 kWp/WE	4,6 kWp (40 % Dach S) 4,6 kWp/WE	65,6 kWp (50 % Dach) 2,1 kWp/WE	43,7 kWp (60 % Dach) 0,9 kWp/WE
Ausrichtung PV Module	60° Süd	45° Süd	10° Ost/West	10° Ost/West

Quelle: IWU (2015), Steinbeis-Transferzentrum EGS

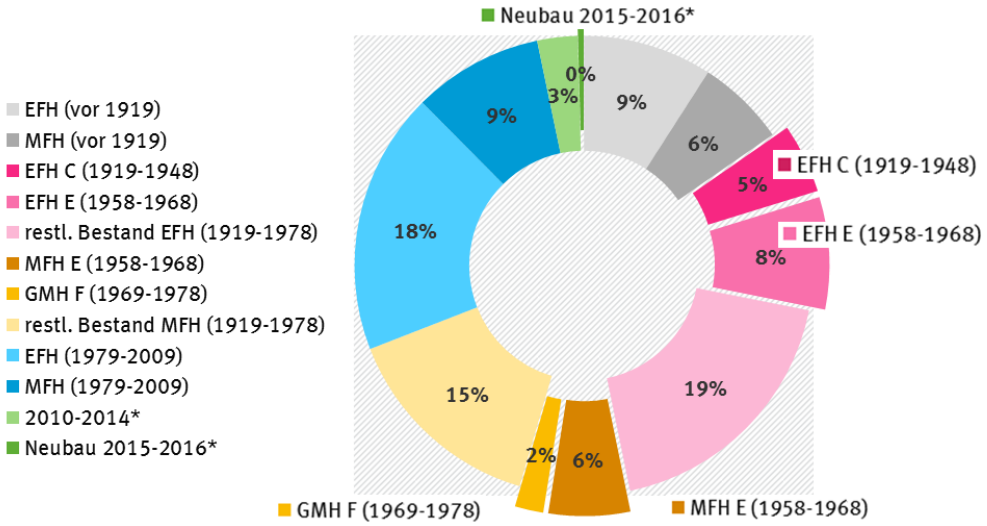
Die ausgewählten Typgebäude repräsentieren etwa 20 % des gesamten Wohngebäudebestandes von knapp 19 Mio. Wohngebäuden und etwa 20 % des anfallenden Heizwärmebedarfes (s. Abbildung 5 und Abbildung 6).

Abbildung 5: Anteil Gebäude (links) und Wohnfläche (rechts)



Quelle: IWU (2015), statistisches Bundesamt (2015)

Abbildung 6: Anteil Heizenergieverbrauch

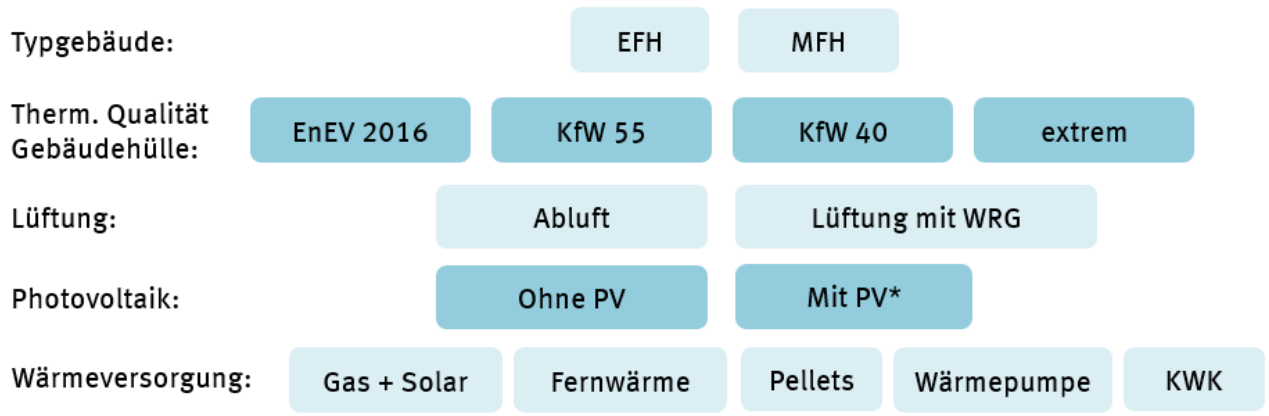


Quelle: IWU (2015), eigene Berechnungen (ab 2010)

1.2 Untersuchte Energiekonzepte

Für die Typgebäude im Neubau wurden insgesamt 160 Varianten mit unterschiedlicher wärmeschutztechnischer Qualität der Gebäudehülle und Anlagentechnik untersucht. Im Mehrfamilienhaus wird zusätzlich zur Photovoltaikanlage auf dem Gebäudedach auch eine Fassadenanlage untersucht. Die Lüftung der Varianten erfolgt entweder über eine reine Abluftanlage oder eine zentrale Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung (WRG). Die Wärmeversorgung wird entweder über einen Gaskessel bzw. –therme in Kombination mit einer Solarthermieanlage für die Warmwasserbereitung, einen Fernwärmeanschluss mit fossilem oder regenerativem Energieträger, Holzpelletkessel, Wärmepumpen oder KWK bereitgestellt. Für die Wärmeversorgung mit Wärmepumpen wurde ein Variantenmix aus Sole/Wasser-Wärmepumpe mit Erdsonden und einer Luft-Wasser-Wärmepumpe mit Luftaußeneinheit gewählt. Im Mehrfamilienhausbereich erfolgt die KWK durch ein BHKW mit Gas-Spitzenlastkessel und im Einfamilienhaus über ein Brennstoffzellenkompaktgerät mit integrierter Gastherme.

Abbildung 7: Übersicht Variantenmatrix Neubau



Quelle: Steinbeis-Transferzentrum EGS (*MFH: PV auf Dach und Fassade)

Die thermische Qualität der wärmeübertragenden Gebäudehülle wird ausgehend vom Transmissionswärmekoeffizient H_T' gemäß Referenzgebäude nach EnEV-Neubau stufenweise verbessert. Im Neubaubereich wird eine Unterschreitung von 30 %, 45 % und in einer Extrembetrachtung von – 60 % untersucht. Die resultierenden U-Werte der Hauptbauteile sind beispielhaft für das MFH in Tabelle 4 gelistet.

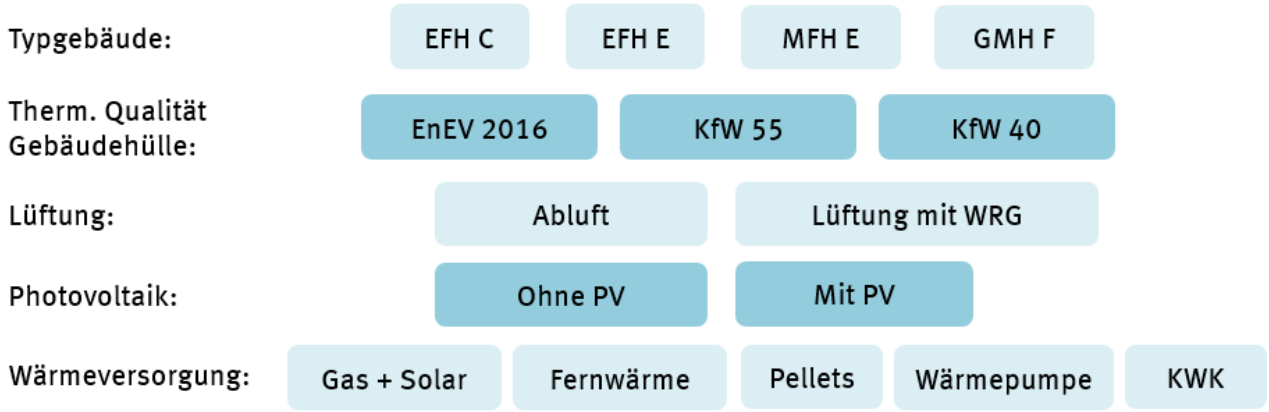
Tabelle 4: U-Werte der Hauptbauteile Neubau Mehrfamilienhaus

Bauteil	EnEV 2016 U-Wert [W/m²K]	KfW 55 U-Wert [W/m²K]	KfW 40 U-Wert [W/m²K]	Extrem U-Wert [W/m²K]
Außenwand	0,25	0,14	0,12	0,08
Fenster	1,30	0,90	0,74	0,60
Dach	0,19	0,13	0,11	0,06
Boden gegen unbeheizten Keller	0,23	0,17	0,13	0,09
Wärmebrückenzuschlag	0,05	0,05	0,03	0,01
H_T`	Referenz-gebäude	-30 %	-45 %	-60 %

Quelle: Steinbeis-Transferzentrum EGS, Details s. Anhang A

Für die energetische Sanierung bestehender Gebäude werden stellvertretend für den Gebäudebestand je zwei Ein- und Mehrfamilienhäuser betrachtet. Für die vier Typgebäude werden insgesamt 240 Varianten mit unterschiedlicher wärmeschutztechnischer Qualität der Gebäudehülle und Anlagentechnik untersucht. Für die nachträgliche Integration der Lüftungsanlagen werden dezentrale Systeme gewählt.

Abbildung 8: Übersicht Variantenmatrix Sanierung im Bestand



Quelle: Steinbeis-Transferzentrum EGS

Im Bestand wird die Gebäudehülle auf EnEV-Neubauniveau saniert und eine stufenweise Verbesserung des Transmissionswärmekoeffizienten H_T' um 30 % und 45 % gemäß den KfW-Effizienzhaus-Standards untersucht. Tabelle 5 zeigt beispielhaft für den Bestand die U-Werte der Hauptbauteile des „MFH E“ und deren Sanierungsvarianten.

Tabelle 5: U-Werte der Hauptbauteile Bestand und Sanierung MFH E

	Bestand U-Wert [W/m²K]	Sanierung EnEV 2016 U-Wert [W/m²K]	Sanierung KfW 55 U-Wert [W/m²K]	Sanierung KfW 40 U-Wert [W/m²K]
Außenwand	1,40	0,22	0,14	0,10
Fenster	3,00	1,10	0,85	0,70
Dach	0,60	0,19	0,14	0,10
Boden gg. Keller (unbeheizt)	1,60	0,33	0,23	0,13
Außentür	3,00	1,50	1,00	0,80
Wärmebrückenzuschlag		0,10	0,05	0,05
HT`		Ref.geb. Neubau	-30 %	-45 %

Quelle: Steinbeis-Transferzentrum EGS, Details s. Anhang

Tabelle 6 beschreibt die Randbedingungen der untersuchten Anlagentechnik mit Angabe der technischen Kenndaten.

Tabelle 6: Randbedingungen der Anlagentechnik zur Wärmeversorgung

Anlagentechnik	Beschreibung
Gas+Solar	EFH: Gasbrennwerttherme, MFH: Gasbrennwertkessel Solarthermieanlage zur Unterstützung Warmwasserbereitung
Fernwärme PE = 0,7	Fernwärme aus Kraft-Wärmekopplung mit fossilem Brennstoff (100 %) mit einem Primärenergiefaktor von f_P = 0,7
Fernwärme PE = 0,35	Fernwärme mit Anteil regenerativen Energien, Primärenergiefaktor gemäß Durchschnitt Fernwärme DE 2015 nach AGFW (100 %) f_P = 0,35
Pellets	Holzpelletkessel (100 %)
Wärmepumpe	Variantenmix aus Luft- und Erdsonden-Wärmepumpe (100 %) MFH Neubau: JAZ = 3,0 - 4,4; EFH Neubau: JAZ = 3,5 - 4,5 GMH F / MFH E: JAZ = 3,0 - 3,4; EFH C: JAZ = 3,2 - 3,5; EFH E: JAZ = 3,3 - 3,5
KWK	MFH: Erdgas-BHKW und Gasspitzenlastkessel (Neubau: 75 % KWK, Sanierung: 70 % KWK, Stromkennzahl: 0,46) EFH: Brennstoffzellenkompaktgerät mit integrierter Gastherme (Neubau: 40 - 65 % KWK, Sanierung: 25 - 55 % KWK[3], Stromkennzahl: 0,67)
PV	siehe Typgebäude Tabelle 2 und Tabelle 3

Quelle: EnEV 2014, AGFW, eigene

[3] Anteil KWK im Einfamilienhaus je nach Wärmebedarf

1.3 Untersuchte Gebäudeenergiestandards

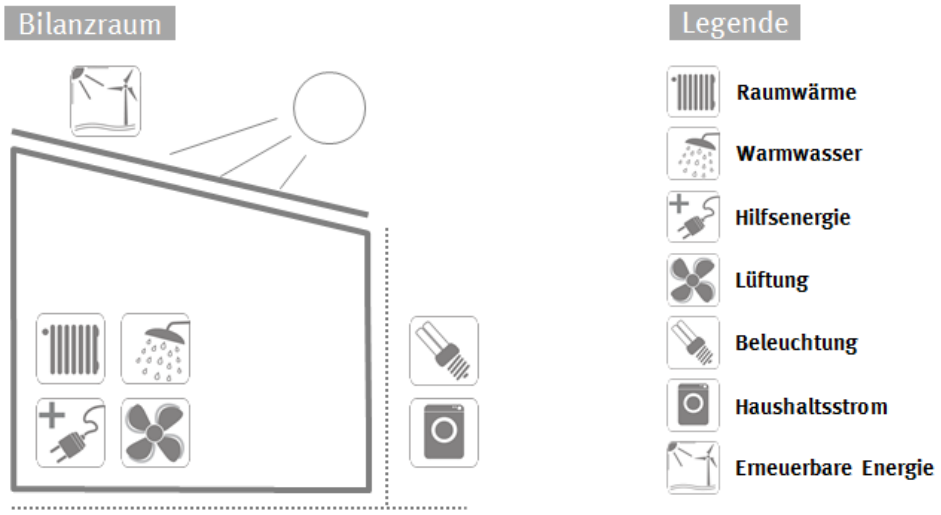
Im Rahmen der Studie werden die Gebäudeenergiestandards EnEV-Neubaugebäude (mit Verschärfung ab 01.01.2016), Passivhaus, Nullenergie und Plusenergie untersucht. Als Szenario wird für den Neubau Mehrfamilienhaus zusätzlich eine autarke Variante abgebildet. Für die Einordung der untersuchten Gebäudeenergiekonzepte hinsichtlich erreichbarer Gebäudeenergiestandards gelten die jeweiligen Anforderungen gemäß Tabelle 7:

Tabelle 7: Bilanzgrenzen und Anforderungen der untersuchten Gebäudeenergiestandards

Gebäudeenergiestandard	Bilanzgrenze	Anforderung
EnEV 2016 (EnEV 2014 mit Verschärfung ab 01.01.2016)	Gebäudeenergiebedarf nach EnEV ohne Nutzerstrombedarf	Einhaltung Jahres-Primärenergiebedarf und der Transmissionswärmetransferkoeffizient HT´ des Referenzgebäudes
Passivhaus Neubau	Gebäudeenergiebedarf nach EnEV inkl. Nutzerstrombedarf	Heizwärmebedarf ≤ 15 kWh/(m²*a), Nicht erneuerbare Primärenergie PE ≤ 95 kWh/(m²*a)
Passivhaus Bestand		Bauteilverfahren EnerPhit: Grenzwerte für Bauteile werden eingehalten
Nullenergie	Gebäudeenergiebedarf nach EnEV ohne Nutzerstrombedarf	Jahres-Primärenergiebedarf ≤ 0
Plusenergie (EffizienzhausPlus)	Gebäudeenergiebedarf nach EnEV inkl. Nutzerstrombedarf	Jahres- End- und Primärenergiebedarf < 0
Autark	Gebäudeenergiebedarf nach EnEV inkl. Nutzerstrombedarf	Gebäude ohne Netzanschluss (Strom und Wärme)

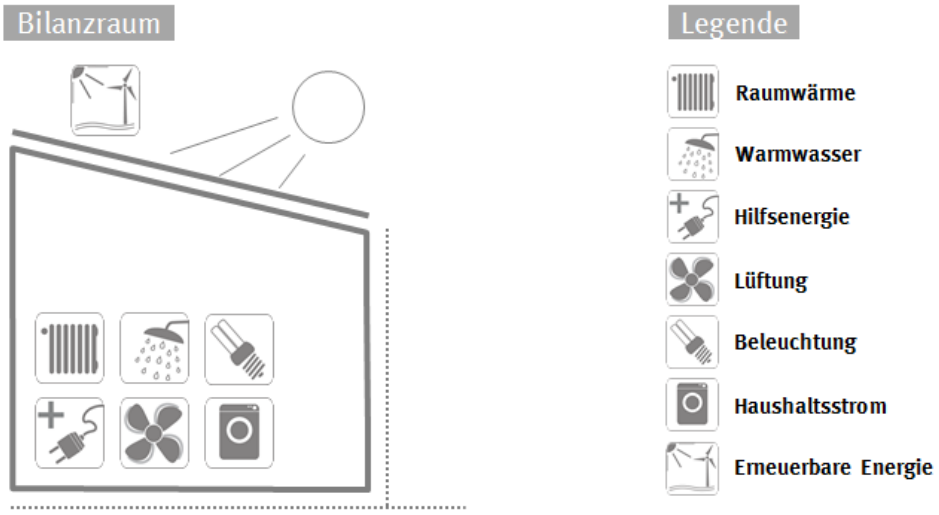
Quelle: EnEV 2014, Passivhausinstitut, BBSR, eigene

Abbildung 9: Bilanzgrenzen Gebäudeenergiestandards EnEV-2016 und Nullenergie



Quelle: Gebäudeenergiestandard EnEV-2016 für Wohngebäude nach EnEV 2014 (mit Verschärfung ab 01.01.2016) und Gebäudeenergiestandard Nullenergie (Gebäudebetrieb), in Anlehnung an den EU-Standard NZEB

Abbildung 10: Bilanzgrenzen Gebäudeenergiestandard Passivhaus, Plusenergie und Autark



Quelle: Gebäudeenergiestandard Effizienzhaus Plus (Gebäudebetrieb und Nutzerstrombedarf) nach BBSR, Passivhaus-Institut

1.3.1 Energiebedarfe

Die Bilanzierung der Energiebedarfe nach EnEV erfolgte nach der Norm DIN V 18599 mit dem Programm Solar Computer, Modul B55 (s. Tabelle 8). Für den Nutzerstrombedarf wurde ein Ansatz auf Basis einer Ausstattung mit hocheffizienten Geräten mit einem jährlichen Strombedarf von 2.450 kWh im Einfamilienhausbereich und 1.850 kWh für eine Wohneinheit im Mehrfamilienhaus gewählt.

Tabelle 8: Wärmebedarfe der Typgebäude Neubau und Sanierung

		Wärmebedarf für Heizung und Warmwasserbereitung [kWh/(m²wfl.*a)]					
Gebäude-hülle	Lüftung	Neubau MFH	San. MFH E	San. GMH F	Neubau EFH	San. EFH C	San. EFH E
Neubau EnEV 2016	Abluft	82	85	71	106	109	171
	mit WRG	59	64	53	81	86	141
KfW 55	Abluft	64	67	56	83	83	126
	mit WRG	43	48	40	58	61	96
KfW 40	Abluft	57	59	51	65	72	106
	mit WRG	36	42	35	42	52	80
extrem	mit WRG	29	-	-	33	-	-

Quelle: Steinbeis-Transferzentrum EGS auf Basis von Berechnungen nach DIN V 18599 (Solar Computer, Modul B55)

1.3.2 Energiebilanz

Die Energiebilanzierung der Gebäudeenergiekonzepte erfolgte zweistufig. Für die Einordung der Konzepte hinsichtlich erreichbarer Gebäudeenergiestandards in der ersten Stufe gelten die jeweiligen Bilanzgrenzen und Anforderungen an End- und Primärenergiebedarf gemäß Kapitel 1.3.

Für die vergleichende Bewertung im gesamten Lebenszyklus hinsichtlich Ökobilanz und Jahresgesamtkosten in der zweiten Stufe wurde für alle untersuchten Variantenkombinationen die gleiche Bilanzgrenze angesetzt, d.h. hier wurde der gesamte Energiebedarf der Gebäude nach EnEV zuzüglich des Nutzerstromansatzes und der dezentralen Stromerzeugung bilanziert. Der Anteil KWK (BHKW und Brennstoffzelle) sowie der Eigenverbrauch durch die stromerzeugenden Anlagen (KWK, Photovoltaik) wurde durch Energiebilanzen auf der Basis stündlicher Last- und Erzeugungsprofile[4] berechnet. Im Ein- und Mehrfamilienhausbereich wurde eine Eigenstromnutzung zur anteiligen Deckung des Nutzerstrombedarfs angesetzt.

1.3.3 Faktoren der Wirkungsindikatoren

Im Rahmen der Ökobilanz werden die Wirkungsindikatoren Treibhauspotenzial bzw. CO_2-Emissionen (GWP) und kumulierter Energieaufwand nicht erneuerbar (KEAne) ausgewiesen. Beide Größen korrelieren tendenziell, da beide Größen stark von der Verbrennung bzw. dem Bedarf an nicht erneuerbaren Energieträgern wie Erdöl oder Gas dominiert werden. Ein Unterschied liegt in der Primärenergiebetrachtung nach EnEV mit den teilweise politisch festgelegten Faktoren für die Energieträger. Die

[4] Warmwasser: Lastprofile nach VDI 4655, Haushaltstrom Lastprofil H0 nach VDEW, Heizwärme nach Sophena, Photovoltaikertrag simuliert mit PVSol

Primärenergiefaktoren für Strombezug und die Fernwärme aus fossiler KWK werden nach EnEV besser bewertet, als dies die Ökobilanzberechnungen für Deutschland zeigen. Zudem gibt der Verdrängungsstrommix vor, dass selbst erzeugter und eingespeister Strom im Netz fossil erzeugten Strom verdrängt. Diesen Unterschied gibt es in der Ökobilanz nicht, da Bezugsstrom und eingespeister Strom gleich bewertet werden. Dies führt dazu, dass Nullenergie-Gebäude mit einem Primärenergiebedarf ≤ 0 mit Primärenergiefaktoren nach EnEV in der ökobilanziellen Betrachtung über den gesamten Lebenszyklus immer noch einen KEAne von 20 bis 100 kWh/($m^2_{Wfl.}$·a) oder CO_2-Emissionen in Höhe von 10 bis 40 kgCO_2-Ä./($m^2_{Wfl.}$·a) aufweisen. Die Bewertung nach EnEV bewirkt zwar, dass stromgeführte und stromerzeugende Anlagentechniken (WP, PV, KWK) gegenüber anderen Techniken nachhaltiger eingestuft und damit vermehrt gefördert und umgesetzt werden, sie spiegelt jedoch nicht die realen Emissionen wieder. In Tabelle 9 sind die Faktoren der Wirkungsindikatoren dargestellt.

Tabelle 9: Faktoren der Wirkungsindikatoren KEAne, GWP und Primärenergie nach EnEV

	KEAne [MJ/kWh]	GWP [kg CO_2 Ä./kWh]	Primärenergie-faktoren nach EnEV [-]
Erdgas	3,958	0,247*	1,1
Fernwärme fossil (KWK)[5]	3,384	0,292	0,7
Fernwärme verbessert[6]	0,957	0,082	0,35
Pellets	0,412	0,035	0,2
Strom	7,183	0,605*	1,8
Verdrängungsstrommix (KWK / PV)	7,183	0,605*	2,8

Quelle: ÖKOBAUDAT 2015; *UBA 2016 (vgl. UBA 2017); DIN V 18599, Teil 1

[5] ÖKOBAUDAT-Datensatz „Nutzung - Fernwärme (20 - 120 kW, entspr. EnEV)“

[6] Vorgehensweise nach BNB und DGNB: Abschätzung über den ÖKOBAUDAT Datensatz „Nutzung - Fernwärme (20-120 kW, entspr. EnEV)“ und Abschätzung des regenerativen Anteils durch den ÖKOBAUDAT Datensatz „Nutzung-Hackschnitzelkessel (‹ 20 kW, entspr. EnEV)“: entspricht fPE = 0,35 (Durchschnitt Fernwärmeversorgung DE 2015 nach AGFW)

1.3.4 Betrachtete Systemgrenzen

Die Bilanzgrenze ist das Gebäude ohne Außenanlagen. Die betrachteten Systemgrenzen für Neubau und Sanierung hinsichtlich Kosten und Ökobilanz sind in Tabelle 10 dargestellt.

In die Jahresgesamtkostenbetrachtung gehen Kapitalkosten in der Herstellung sowie Kosten für Instandsetzung, Wartung und Betrieb ein. Kostenseitig wurden im Neubau die KG 310 bis KG 360 komplett und ein Aufwand für Gerüste in KG 390 erfasst. Die Anlagentechnik wird kostenseitig von der KG 410 bis KG 460 ebenfalls komplett erfasst und in KG 490 ein zusätzlicher Platzbedarf für ein Holzpelletsilo für die entsprechenden Versorgungsvarianten angesetzt. Im Bestand werden die Kosten für eine energetische Sanierung über nachträgliche Dämmung und neue Fenster (KG 320, 330, 350, 360) und Kosten für Demontagearbeiten und Gerüste (KG 390) erfasst. Anlagenseitig werden eine neue Wärmeerzeugung (KG 420), die nachträgliche Integration von Lüftungsanlagen (KG 430) und Photovoltaikanlagen (KG 440) berücksichtigt sowie die Demontage und Entsorgung der bestehenden Wärmeversorgung (KG 490).

Das Gebäude wurde im ökobilanziellen Modell detailliert ohne Sicherheitsaufschlag eingegeben. Im Neubau wurden Herstellung, Instandsetzung, EoL Konstruktionen und Materialien der KG 310 - 360 und der KG 410 – 460 abgebildet. Für die energetische Sanierung wurde die Instandsetzung der ursprünglichen eingebauten Konstruktionen der KG 300 und KG 400 sowie die Herstellung, Instandsetzung, EoL der neueingebrachten Konstruktionen und Materialien der KG 320, 330, 350 und 360 und der KG 420 – 440 berücksichtigt.

Die Eingabe der Komponenten erfolgte detailliert für die vorliegenden Typgebäude. Im ökobilanziellen Modell sind die Wasserleitungen (KG 410) erfasst und die Wärmeversorgung (KG420) gemäß ihrer Leistungsklasse inkl. gedämmte Leitungen, Speicher und Wärmeübergabesysteme abgebildet. Die Lüftungsanlangen sind inkl. Leitungssysteme (KG 430) erfasst. Die Leitungslängen für Wasser und Lüftung wurden überschlägig anhand der Typgebäude berechnet. Außerdem wurden Photovoltaikanlagen (KG 440) sowie Aufzüge im Mehrfamilienhaus (KG 460) bilanziert. Elektroleitungen (KG 440, 450), welche unabhängig vom Energieversorgungkonzept in den Gebäuden installiert werden und erfahrungsgemäß bei Wohngebäuden in der Ökobilanz einen vernachlässigbaren Einfluss haben, wurden vernachlässigt. Das Gebäudemodell wurde detaillierter eingegeben, als es in bestehenden Nachweissystemen gefordert wird. Der gewählte Ansatz ist somit sehr nahe am realen Gebäude.

Energiebedarf und dezentrale Erzeugung über KWK und Photovoltaik in der Nutzungsphase werden sowohl kostenseitig als auch in der Ökobilanz berücksichtigt. Der eigenerzeugte Strom wird zum Teil im Gebäude selbst genutzt und reduziert dadurch Energieaufwand und Kosten für den Strombezug. Der überschüssig erzeugte Strom über KWK oder Photovoltaik wird ins Netz eingespeist und gemäß Kap. 1.5.5 vergütet bzw. in der Ökobilanz mit dem Strommix Deutschland gutgeschrieben.

Tabelle 10: Systemgrenzen Jahresgesamtkosten und Ökobilanzmodell

	Neubau		Sanierung	
	Kosten	Ökobilanz	Kosten	Ökobilanz
Betrachtete Materialien Bauwerk (KG 300)				
310 Baugrube	enthalten	nicht enthalten	nicht enthalten	nicht enthalten
320 Gründung	enthalten	enthalten	enthalten	enthalten
330 Außenwände	enthalten	enthalten	enthalten	enthalten
340 Innenwände	enthalten	enthalten	nicht enthalten	nicht enthalten
350 Decken	enthalten	enthalten	enthalten	enthalten
360 Dächer	enthalten	enthalten	enthalten	enthalten
390 Sonstige Baukonstruktionen	enthalten	nicht enthalten	enthalten	nicht enthalten
Betrachtete Materialien Anlagentechnik (KG 400)				
410 Abwasser, Wasser	enthalten	enthalten	nicht enthalten	nicht enthalten
420 Wärmeversorgung	enthalten	enthalten	enthalten	enthalten
430 Lüftung	enthalten	enthalten	enthalten	enthalten
440 Starkstrom (PV)	enthalten	enthalten	enthalten	enthalten
460 Förderanlagen (MFH)	enthalten	enthalten	nicht enthalten	nicht enthalten
490 Sonst. Maßnahmen	enthalten	enthalten	enthalten	nicht enthalten
Betrachtete Energiebedarfe im Betrieb				
Energiebedarf nach EnEV	enthalten	enthalten	enthalten	enthalten
Nutzerstrombedarf	enthalten	enthalten	enthalten	enthalten
Energieerzeugung dez.	enthalten	enthalten	enthalten	enthalten

Quelle: eigene Darstellung

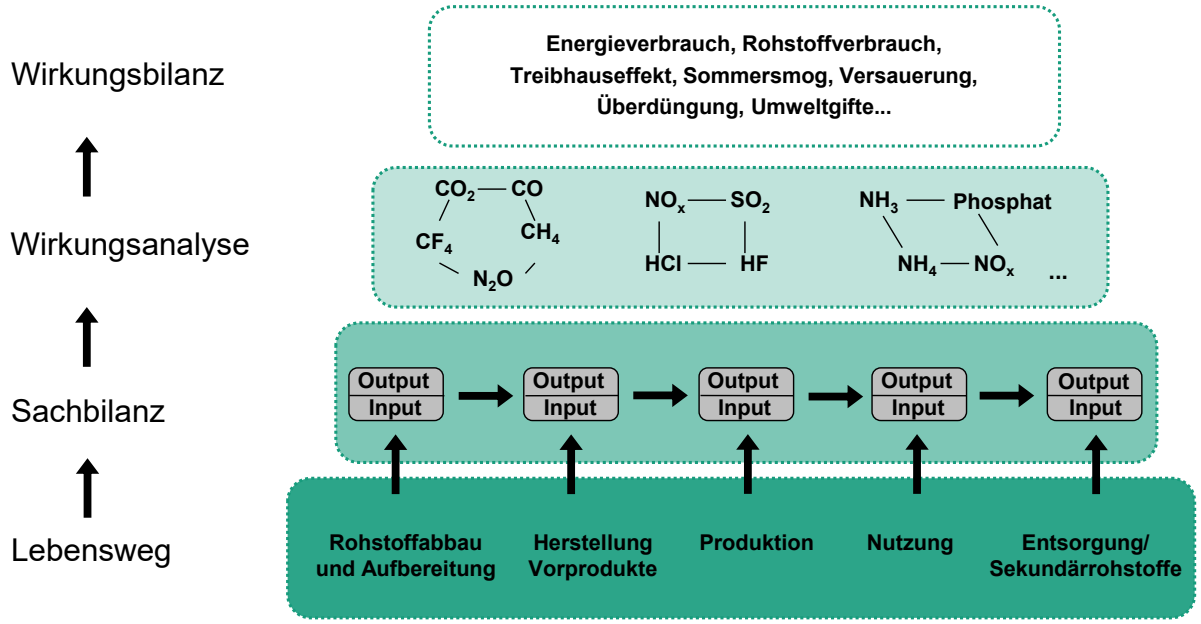
1.4 Ökobilanz

1.4.1 Methodik und Normkonformität

Die Methode der Ökobilanz ist eine anerkannte Methode zur Quantifizierung der Umweltwirkungen von Prozessen, Produkten oder Dienstleistungen. Durch die Standardisierung der Methode nach ISO 14040 und 14044 sind der einheitliche Ansatz und die notwendige Transparenz zur Bewertung der verursachten Umweltwirkungen gewährleistet. Die europäische Norm EN 15978 „Nachhaltigkeit von Bauwerken - Bewertung der umweltbezogenen Qualität von Gebäuden – Berechnungsmethode“ gibt weitere Definitionen und Anleitungen für Ökobilanzen im Gebäudekontext. Basierend auf dem Lebenszyklusgedanken werden mit dieser Methode alle entstehenden Umweltwirkungen über den gesamten Produktlebenszyklus von der Rohstoffbereitstellung über die Herstellung und Nutzung bis zur Verwertung am Lebensende berücksichtigt.

Eine Ökobilanz erfolgt in vier übergeordneten Schritten: Definition von Ziel und Untersuchungsrahmen, Sachbilanz, Wirkungsabschätzung (Wirkungsanalyse/ -bilanz) und Interpretation der Ergebnisse. Entsprechend der definierten Rahmenbedingungen und der funktionellen Einheit der Studie (z.B. die Herstellung eines Bauteils oder der Transport von Handelsgütern) werden in der Sachbilanz alle ein- und ausgehenden Stoff- und Energieströme und entstehenden Emissionen der gesamten Prozesskette erfasst. In der Wirkungsabschätzung werden anschließend alle im Lebenszyklus entstehenden Emissionen den betrachteten Umwelteffekten zugeordnet (Klassifizierung) und anhand ihrer Beiträge in den entsprechenden Wirkungskategorien, wie z.B. dem Treibhauspotential, dargestellt (Charakterisierung) (siehe Abbildung 11).

Abbildung 11: Lebenszyklusanalyse in der Ökobilanz



Quelle: Fraunhofer IBP in Anlehnung nach ISO14040

Mit Hilfe der Ökobilanzergebnisse lassen sich die potentiellen Umweltwirkungen des betrachteten Systems darstellen, mögliche Schwachstellen erkennen und Maßnahmen zur ökologischen Optimierung eines Produktes ableiten.

Die Ergebnisse einer Ökobilanz bilden eine belastbare Grundlage zur Bewertung der produktbezogenen Umweltwirkungen. Auf dieser Basis lassen sich:

- signifikante Umweltwirkungen über den gesamten Produktlebenszyklus identifizieren,

- potentielle Umweltwirkungen zukünftiger Produktenwicklungen entwicklungsbegleitend einschätzen und somit mögliche Schwachstellen und Hot-Spots im Lebenszyklus zukünftiger Produkte ermitteln und vermeiden (Design for Environment),
- Umweltwirkungen von Produkten und Systemen quantitativ vergleichen.

1.4.2 Datenbasis und Datenbanken

Die Definitionen des Ziels und Untersuchungsrahmens wurden entsprechend den Definitionen der DGNB NBV15 und des BNB getroffen. Tabelle 11 fasst die wichtigsten Festlegungen zusammen.

Als Datenbasis wurde die ÖKOBAUDAT verwendet, um einerseits eine möglichst umfangreiche Datenbasis für die Auswahl von Ökobilanzdaten von Baumaterialien und Energieträgern zu haben und andererseits in sich konsistente Ökobilanzdaten zu nutzen. Weiterhin bildet die ÖKOBAUDAT die Datengrundlage für die Nachhaltigkeitsbewertungssysteme BNB und DGNB. Um eine Vergleichbarkeit mit anderen Studien und eingereichten Projekten im Gebäudebereich zu ermöglichen, wurde diese gängige Datenbasis gewählt. Für fehlende Datensätze – wie PV Anlage und Brennstoffzelle bzw. Blockheizkraftwerk – wurden Ökobilanzmodelle in der Ökobilanzsoftware GaBi auf Basis von Literaturdaten und Herstellersteckbriefen erstellt. Die GaBi-Datenbank bildet auch die Datengrundlage der ÖKOBAUDAT, wodurch die Konsistenz der Daten gewährleistet wurde. Bei der Abbildung der Nutzungsphase wurde abweichend von den Festlegungen nach BNB bzw. DGNB der Nutzerstrombedarf gemäß den Angaben aus Kapitel 1.3.1 berücksichtigt, um die Effekte durch die Stromproduktion vor Ort, z.B. durch eine PV Anlage und den damit einhergehenden Eigenbedarf bzw. Einspeisung, abbilden zu können. Der PV Strom wird in Eigennutzung und Einspeisung aufgeteilt; in beiden Fällen wird eine Gutschrift in Höhe des gewählten Strommixes gewährt; Effekte durch Netzbelastungen bleiben außen vor.

Tabelle 11: Definition des Ziels und Untersuchungsrahmens

Aspekt	Definition
Betrachtete Umweltwirkungen	Treibhauspotential (GWP) Kumulierter Energiebedarf nicht erneuerbar (KEAnr)
Datenbasis	ÖKOBAUDAT 2015, zusätzliche IBU EPD Datensätze, Emissionsfaktoren UBA (Quellenangabe?)
Funktionales Äquivalent	gesamtes Gebäude, ohne Außenanlagen
Betrachtete Lebens-zyklusphasen	Herstellung (A1-A3), Instandsetzung (B3), Energiebedarf im Betrieb (B6), EoL (C3, C4) und Potentiale für Wiederverwendung, Rückgewinnung und Recycling (D)
Rechenverfahren	Detailliertes Rechenverfahren (kein Sicherheitsaufschlag)
Betrachtungszeitraum	50 Jahre
Lebensdauern	Nach Leitfaden nachhaltiges Bauen
PV Strom	Aufgeteilt in Eigennutzung und Einspeisung; Gutschrift in Höhe des gewählten Strommixes gewährt; Effekte durch Netzbelastung bleiben außen vor.

Quelle: Fraunhofer IBP

Abweichend zu der Festlegung nach BNB wurden Umweltwirkungen des Moduls D „Gutschriften und Lasten außerhalb der Systemgrenze“ in der Darstellung der Ergebnisse berücksichtigt. Die Thematik

des Berücksichtigens von Gutschriften jenseits der Systemgrenze unterliegt noch stark dem wissenschaftlichen Diskurs. Die eine Seite verweist darauf, dass die EoL Szenarien auf Grund des Betrachtungszeitrahmens von 50 Jahren und damit möglichen Änderungen der Recyclingtechnologien starken Unsicherheiten unterworfen sind. Vor allem bei der thermischen Verwertung von Holz können hierbei starke Veränderungen auftreten. Damit soll ein Vernachlässigen der Gutschriften (Modul D) eine konservative Abschätzung darstellen. Bei einem Vernachlässigen der Gutschriften kann jedoch das Potential, das ein Material oder die Konstruktion am Lebensende mit sich bringt, nicht abgebildet werden. Zwar werden die Aufwendungen des Recyclings in Modul C erfasst, jedoch werden Aspekte wie Trennbarkeit oder Kaskadennutzung dort nicht abgebildet. Für die Verwendung des Moduls D spricht zudem, dass die Datenstruktur und die Datensätze der ÖKOBAUDAT zwingend die Berücksichtigung aller Lebenszyklusphasen erfordert, um Fehlinterpretationen zu vermeiden.

Bei der Erstellung der Ökobilanz wurde zuerst ein Bauteilkatalog aller enthaltenen Materialien je Kostengruppe und Konstruktion für jedes Gebäude erstellt. Auf Basis dieses Bauteilkatalogs wurden im Anschluss die einzelnen Konstruktionen der KG300 und KG400 in der Gebäude-LCA Software auf Basis der ÖKOBAUDAT modelliert, s. hierzu Anhang D. Die ÖKOBAUDAT ist eine Datenbank mit Ökobilanzdaten zu Baumaterialien, Bau-, Transport, Energie- und Entsorgungsprozessen. Die Datenbank umfasst hierbei generische und produktspezifische Datensätze (EPDs) auf Wirkkategorieebene nach EN 15804 mit insgesamt über 1.000 Datensätzen. Trotz dieser Anzahl fehlen oft immer noch wichtige Datensätze, vor allem im Bereich der Anlagentechnik. Auf Grund dessen wurden auf Basis von Herstellersteckbriefen und bestehenden Studien Ökobilanzmodelle für diese fehlenden Komponenten mit der Ökobilanzsoftware GaBi erstellt. Folgende Datensätze wurden hierbei modelliert:

- Verschiedene PV Modultypen
- Brennstoffzelle
- Blockheizkraftwerk
- Elektrolyseur
- Wasserstoffspeicher
- Lithium-Eisenphosphat-Akkumulator

Die Lebensdauern der einzelnen Materialien und Konstruktionen wurden aus dem Leitfaden Nachhaltiges Bauen (vgl. BNB 2017) und der VDI 2067 entnommen. Die Austauschzyklen innerhalb des Betrachtungszeitraumes wurden anhand EN 15978 berechnet.

Ein Restwert der Komponenten (z.B. nach VDI 2067) wurde, wie bei den Nachhaltigkeitsbewertungssystemen BNB bzw. DGNB, nicht vorgenommen um Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu gewährleisten und die Ergebnisse nicht zu verzerren. Durch eine Restwertberücksichtigung würden die Umweltwirkungen über den Betrachtungszeitraum von 50 Jahren hinaus, auf weitere Nutzungszyklen verteilt. Dies würde einer Allokation der Umweltwirkungen auf spätere Zyklen entsprechen, was dem Verursacherprinzip widersprechen würde. Hierbei würden Umweltlasten nicht mehr primär dem ersten Zyklus zugeordnet, sondern auf zukünftige, unsichere Folgezyklen verteilt werden. Beispielsweise würde bei einem Stahlbetonrohbau, der bis zu 100 Jahre halten kann, nur ca. 50 % der Umweltwirkungen dem ersten Zyklus (50 Jahre) zugeordnet. Dies könnte zu einer Fehlinterpretation führen.

Das Lebensende der jeweiligen Materialen wurde als „Standard-EoL“ nach dem ÖKOBAUDAT Datensatz modelliert.

1.5 Lebenszykluskostenbetrachtung

1.5.1 Methodik

Die Lebenszykluskostenbetrachtung erfolgt auf Basis einer dynamischen Wirtschaftlichkeitsberechnung nach der Annuitätenmethode in Anlehnung an VDI 2067 mit einem Zeitraum von 30 Jahren. Es wird ein Zinssatz von 3,5 % zugrunde gelegt.

Die Gesamtkostenberechnung umfasst:

- Kapitalgebundene Kosten: Investitionskosten der Bauteile und Anlagentechnik (Lebensdauer nach BNB (vgl. BNB 2017), VDI 2067 (vgl. VDI 2067 2012) mit entsprechenden Ersatzinvestitionen bzw. Restwertberücksichtigung für Bauteile und Anlagentechnik
- Betriebsgebundene Kosten (Instandsetzung, Wartung und Betrieb)
- Verbrauchsgebundene Kosten (Energiekosten der gesamten Gebäudeenergiebedarfe nach EnEV inkl. Nutzerstrom nach Abzug Eigenstromnutzung, EEG-Umlage)
- Erlöse: Überschüssiger Photovoltaikstrom wird eingespeist und für die ersten 20 Jahre gemäß Erneuerbare-Energien-Gesetz (vgl. EEG 2015) vergütet und die letzten 10 Jahre nach Marktpreis EEX (vgl. Jahresmarktwert Solar 2015). Überschüssiger BHKW-Strom wird nach Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz (vgl. KWK-Gesetz 2012) vergütet.

Die Kostenrechnung erfolgt auf der Preisbasis 2015, alle Kosten- und Preisangaben sind also als reale Kosten/Preise zur Preisbasis 2015 zu verstehen. Die kapitalgebundenen Kosten (Investitionskosten) sowie die laufenden Kosten für Energie, Wartung und Instandhaltung werden mit Umsatzsteuer angegeben.

1.5.2 Kapitalgebundene Kosten

Die kapitalgebundenen Kosten (inkl. MwSt.) umfassen die Investitionskosten der Kostengruppen KG 300 und KG 400 der untersuchten Wohngebäude und wurden für das Vorhaben detailliert ermittelt.

Für jedes Typgebäude im Neubau wurden die entsprechenden Investitionskosten der KG 300 für verschiedene Dämmstandards (EnEV-2016, KfW Effizienzhaus 55, KfW Effizienzhaus 40 und einen extremen Dämmstandard) ermittelt. Die Kostenkennwerte für den Neubau nach Tabelle 12 basieren auf der Baudatenbank SirAdos (vgl. sirAdos 2015). Die Fensterkosten nach Tabelle 13 wurden anhand eigener Marktrecherchen auf Basis von Herstellerangaben ermittelt.

Tabelle 12: Investitionskosten KG 300 Mehr- und Einfamilienhaus Neubau (brutto)

	MFH	EFH
	Spezifische Kosten je cm zusätzlicher Dämmschicht [€/cm*m²Bauteilfläche]	
Außenwand	2,50	2,77
Außenwand gg. Erdreich	4,97	-
Dach	2,9 (Aufdachdämmung)	1,12 (Zwischensparrendämmung)
Dachterrasse	4,11	4,11
Boden gegen Erdreich	3,01	3,21
Boden gegen unbeheizt	3,63	-
Wand gegen unbeheizt	3,63	-

Quelle: sirAdos 2015

Tabelle 13: Investitionskosten Fenster KG 300 Neubau und Sanierung (brutto)

	MFH	EFH
	Spezifische Mehrkosten gegenüber Basisqualität [€/m² Fensterfläche]	
Fenster verbesserter Qualität von Basisqualität U_w = 1,3 W/(m²*K) zu		
a) U_w = 1,0/1,1 W/(m²*K)	+ 24	
b) U_w = 0,85/0,90 W/(m²*K)	+ 30	+ 30
c) U_w = 0,75 W/(m²*K)	+ 53	
d) U_w = 0,70 W/(m²*K)	+ 65	+ 65
e) U_w = 0,65 W/(m²*K)		+ 80
f) U_w = 0,60 W/(m²*K)	+ 100	

Quelle: Herstellerangaben durch Marktumfrage (Stand 2015)

Investitionsmehrkosten für eine Ausführung der Neubauten in Holzbauweise gegenüber Massivbauweisen basieren auf einer Auswertung von Kostenkenndaten der SirAdos-Baudatenbank (vgl. König 2018). Im Einfamilienhaus belaufen sich die Mehrkosten für eine Holzbauweise demnach je nach Dämmstandard auf 3,9 - 4,0 % und für das Mehrfamilienhaus zwischen 4,1 und 4,3 % bezogen auf das Bauwerk (KG 300).

Für die Bestandssanierung wurden die Kosten der KG 300 entsprechend dem Vorgehen im Neubaubereich detailliert ermittelt. Basis bilden hier die Kostenkennwerte energierelevanter Bauteile für die energetische Modernisierung von Altbauten nach IWU (vgl. Hinz 2015).

Tabelle 14: Investitionskosten KG 300 Sanierung im Bestand (brutto)

Bauteil	Kostenfunktion Vollkosten [€ /m² Bauteilfläche]
Wärmeschutz Außenwand (PS & MF)	2,81 €/cm * x cm Dämmstoff + 96,88 €
Fußboden gg. unbeheizt, Dämmung unterseitig ohne Bekleidung	1,25 €/cm * x cm Dämmstoff + 30,75 €
Fußboden gg. unbeheizt, Dämmung oberseitig Dielenboden (Einblasdämmung)	1,62 €/cm * x cm Dämmstoff + 8,96 €
Steildach, Holzkonstruktion Zwischen- & Aufsparrendämmung	2,77 €/cm * x cm Dämmstoff + 151,01 €
Flachdach, Dämmung	4,11 €/cm * x cm Dämmstoff + 104,14 €
Rollläden (EFH, MFH) Aluminium, Gurt	182 [€/Stck.]
Haustür Einfamilienhaus	1.433 [€/Stck.]
Haustür Mehrfamilienhaus	1.222 [€/Stck.]
Demontage und Entsorgung Fenster EFH	29
Demontage und Entsorgung Fenster MFH	21
Gerüste, Kräne, Sicherungen	75,64 €/$m^2_{Wfl.}$ * x $m^2_{Wfl.}$.^-0,32

Quelle: IWU (vgl. Hinz 2015)

Die Investitionskosten für die Anlagentechnik der Kostengruppe 400 umfassen unter anderem Kostenkomponenten, welche für die Wärmeerzeugung (KG 420), die Lüftungsanlagen (KG 430) und die Stromerzeugung durch Photovoltaik (KG 440) anfallen, siehe hierzu auch Bilanzgrenzen Kapitel 1.3.4. Die Investitionskosten für die Lüftungsanlagen im Neubau und die angesetzten Komplettkosten für eine fertig montierte Photovoltaikanlage basieren auf durchschnittlichen Kosten realisierter Planungsprojekte der EGS-plan GmbH. Die Kosten für nachträglich installierte Lüftungsanlagen im Bestand sind den Angaben für Lüftungskonzepte für die Bestandssanierung von Herstellern im Rahmen des Component Award 2016 (vgl. Passivhaus Institut 2016) entnommen.

Tabelle 15: Investitionskosten KG 430 Lüftung und KG 440 PV (netto)

Bauteil	Neubau EFH	Neubau MFH	Sanierung EFH	Sanierung MFH
Abluftanlage (dezentral)	1.500 €	1.500 €/ WE	1.800 €/ WE	1.800 €/ WE
Lüftungsanlage (zentral)	8.000 €	6.500 € /WE	63 €/m²$_{Wfl.}$	4.400 €/ WE
PV-Dachanlage	1.400 €/kWp	1.300 €/kWp	1.400 €/kWp	1.300 €/kWp
PV-Fassadenanlage	-	3.000 €/kWp	-	-

Quelle: EGS-plan GmbH (2015), Passivhaus-Institut (2016)

Die Kosten für die Wärmeversorgung in der Heizzentrale erfassen die Demontage und Entsorgung des Altgeräts in der Bestandssanierung, den Einbau des neuen Wärmeerzeugers inkl. Anbindung und gegebenenfalls einer Abgasanlage und Brennstofflagerung. Außerdem werden Kosten für Wärmespeicher, Warmwasserbereitung, eine entsprechende hydraulische Einbindung sowie für notwendige MSR und Elektrotechnik und eine Inbetriebnahme angesetzt. Die Kosten für die Wärmepumpenvarianten setzen sich aus einem Mittel aus Sole/Wasser-Wärmepumpe mit Erdsonden und einer Luft-Wasser-Wärmepumpe mit Luftaußeneinheit zusammen. Die Investitionskosten wurden für die verschiedenen Versorgungstechnikvarianten detailliert und leistungsabhängig ermittelt und sind den Tabellen in Anhang B zu entnehmen. Im Neubau fallen Kosten für das Heizverteilsystem und die Übergabe durch Fußbodenheizung an. In der Bestandssanierung wird das Heizungsverteilsystem nicht saniert, mit Ausnahme der Dämmung von Verteilleitungen in der Heizzentrale und dem Austausch der Wärmeübergabe in Form von Radiatoren. Für die Wärmepumpenvarianten werden aus Effizienzgründen für die niedrigeren Vorlauftemperaturen 20 % größere Heizflächen angesetzt. Die Kostenermittlung für die Wärmeversorgung basiert auf Herstellerangaben, Planungsprojekten der EGS-plan GmbH (2015), der Baudatenbank SirAdos (vgl. SirAdos 2015) und BMUB 2015 (vgl. Bürger 2015).

Im Neubaubereich werden zusätzlich die Kosten für Abwasser- und Wasseranlagen (KG 410), Starkstromanlagen (KG 440) und Fernmelde- und IT-Anlagen (KG 450) und Förderanlagen (KG 460) erfasst. Die Kostenangaben basieren auf BKI Baukosten für Gebäude im mittleren Standard (vgl. BKI 2015).

1.5.3 Betriebsgebundene Kosten

Die laufendenden jährlichen betriebsgebundenen Kosten enthalten den Aufwand für Instandsetzung, Wartung und Inspektion für die Bauteile der Kostengruppe 300 und die Anlagentechnik der Kostengruppe 400.

KG 300 Technische Lebensdauer, Instandsetzungs- und Wartungsfaktoren

KG 300	Baukonstruktionen	Nutzungs-dauer [a]	Instand-set-zung [%/a]	Wartung u. Inspektion [%/a]
KG 320	Gründung	50	1,0	0,1
KG 330	Außenwände Neubau	50	1,0	0,1
KG 330	Außenwände Sanierung (Dämmung)	35	1,0	0,1
KG 340	Innenwände	50	1,0	0,1
KG 350	Decken	50	1,0	0,1
KG 360	Dächer	45	1,0	0,1
KG 370	Baukonstruktive Einbauten	30	1,0	0,1
KG 390	Sonstige Maßnahmen	30	0,0	0,0

Quelle: Steinbeis-Transferzentrum EGS, DGNB, BNB (BNB 2017)

Tabelle 16: KG 400 Technische Lebensdauer, Instands- und Wartungsfaktoren

KG 400	Technische Anlagen	Nutzungs-dauer [a]	Instand-set-zung [%/a]	Wartung u. Inspektion [%/a]
KG 410	Abwasser, Wasser, Gas	50	0,6	0,7
KG 420	Wärmeverteilung FBH	25	1,0	0,0
KG 420	Wärmeübergabe FBH	25	1,0	0,5
KG 420	Wärmespeicherung	20	1,0	0,5
KG 420	Hydraulische Einbindung	20	1,5	1,5
KG 420	MSR, Elektro- und Inbetriebnahme	20	1,5	1,5
KG 420	Anbindung Wärmeerz. Gas + Solar	30	0,5	0,5
KG 420	Wärmeerz. Gas + Solar	18	1,0	1,0
KG 420	Anbindung Wärmeerzeugung FW	30	1,0	1,0
KG 420	Wärmeerzeugung FW	20	1,5	1,0
KG 420	Anbindung Wärmeerzeuger Pellets	20	2,0	2,0
KG 420	Wärmeerzeugung Pellets	18	1,5	2,0
KG 420	Anbindung Wärmeerzeuger WP	50	0,0	1,0
KG 420	Wärmeerzeugung WP	18	1,5	1,0
KG 420	Anbindung Wärmeerzeuger BZ + Gas	40	1,0	1,0
KG 420	Wärmeerzeugung BZ + Gas	10	1,0	1,0
KG 420	Anbindung Wärmeerzeuger BHKW	40	1,0	1,0
KG 420	Wärmeerzeugung BHKW	20	1,0	1,0
KG 430	Abluftanlage	12	1,0	1,0

KG 400	Technische Anlagen	Nutzungs-dauer [a]	Instand-set-zung [%/a]	Wartung u. Inspektion [%/a]
KG 430	Lüftungsanlage mit WRG	13	1,0	1,0
KG 440	Starkstromanlagen	25	0,6	1,0
KG 440	Photovoltaikanlage	25	0,0	2,0
KG 450	Fernmelde- und IT-Anlagen	25	0,3	0,7
KG 460	Förderanlagen	25	1,1	1,4
KG 490	Sonstige Maßnahmen	50	0,1	0,1

Quelle: Steinbeis-Transferzentrum EGS, DGNB, VDI-Norm 2067

1.5.4 Verbrauchsgebundene Kosten

Unter verbrauchsgebundenen Kosten werden die Energiekosten für die Strom- und Wärmeversorgung erfasst. Tabelle 17 gibt die Energiepreise für die Energieträger mit Quellenangabe an. Der Bezug von Wärmepumpenstrom mit einem zusätzlichen Stromzähler wird im gesamten Mehrfamilienhausbereich und im Einfamilienhausbereich nur bei Varianten ohne Photovoltaikstrom angesetzt.

Tabelle 17: Energiepreise 2015 [brutto]

	[ct/kWh]	Quelle
Erdgas	7,06	Vgl. BMWi 2015
Erdgas BHKW	5,79	Vgl. BMWi 2015
Fernwärme MFH-Tarif	8,93	Vgl. BMWi 2015
Fernwärme EFH-Tarif	12,51	eigene nach EVU[7]
Holzpellets [2-5t]	5,35	Vgl. C.A.R.M.E.N. 2015
Holzpellets [20]	4,67	Vgl. C.A.R.M.E.N. 2015
Strom Haushaltstarif / Heizzentrale	29,16	Vgl. BMWi 2015
Strom Wärmepumpentarif	25,37	eigene nach EVU[8]

Quellen: BMWi, C.A.R.M.E.N, eigene nach EVU

Weitere verbrauchsgebundene Kosten wie die EEG-Umlage für Eigenverbrauch und Direktlieferung von erzeugtem Strom werden unter sonstige Kosten erfasst. Für den Eigenverbrauch von erzeugtem Photovoltaikstrom für Anlagen ab 10 kWp im Mehrfamilienhausbereich und den durch BHKW-Anlagen erzeugten und für den Gebäudebetrieb nach EnEV selbst genutzten Strom fällt eine anteilige EEG-Umlage von 40 % bzw. 2,47 ct/kWh an (vgl. EEG 2017). Für die Direktlieferung des BHKW-Stroms an die Mietparteien, d.h. für den Nutzerstrom im Mehrfamilienhausbereich, wird die volle

[7] Fernwärme EFH-Tarif: eigene Berechnung auf Basis MFH-Tarif und Mehrkosten für geringere Abnahme EFH nach EVU

[8] Strom Wärmepumpentarif: eigene Berechnung auf Basis Strom Haushaltstarif / Heizzentrale und Minderkosten für Wärmepumpenstrom nach EVU

EEG-Umlage von 6,17 ct/kWh fällig (vgl. EEG 2017). Es werden keine externen Kosten für die Beanspruchung von Umweltressourcen oder eine Infrastruktur für das Stromnetz außerhalb des Gebäudes angesetzt. Für die Energiekosten wird zusätzlich eine Sensitivitätsanalyse mit jährlichen Preissteigerungsraten von 2 % für alle Energieträger vorgenommen.

1.5.5 Erlöse

Unter Erlöse wird die Vergütung für den Strom aus Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen nach dem KWKG in der Fassung vom 19.07.2012 (vgl. KWKG 2012) und die Einspeisevergütung für den Strom aus Photovoltaikanlagen nach EEG (vgl. EEG 2017) erfasst.

Die Erlöse von KWK-Anlagen setzen sich aus den folgenden Komponenten zusammen:

- dem Preis für den Grundlaststrom an der Strombörse EEX, Leipzig für das 4.Quartal 2015 von 3,16 ct/kWh
- KWK-Zuschlag von 8 ct/kWh für neu errichtete Anlagen mit Inbetriebnahme 2015 und einer elektrischen Leistung bis 50 kW (vgl. § 4 Absatz 3 Satz 1 KWKG in Verbindung mit § 7 ff. KWKG)
- Entgelte für die dezentrale Einspeisung für eine vermiedene Netznutzung von 0,5 ct/kWh (vgl. StromNEV § 18),
- Entgelte für Steuerrückerstattung für den Erdgasbezug für KWK von 0,55 ct/kWh$_{HS}$ (vgl. EnergieStG § 53a)

Förderungen für den Netzausbau nach KWKG werden nicht berücksichtigt, da nur dezentrale KWK-Anlagen innerhalb von Gebäuden untersucht wurden.

Der eingespeiste Photovoltaikstrom wird in den ersten 20 Jahren nach EEG (vgl. EEG 2017) vergütet. Für die Förderung nach EEG gilt die Einspeisevergütung zum Zeitpunkt der Inbetriebnahme der Anlagen im Dezember 2015 nach Tabelle 18. Nach 20 Jahren kann nur noch der Marktpreis erzielt werden. Dieser wurde mit 3,17 ct/kWh beziffert (vgl. Jahresmarktwert Solar 2015).

Tabelle 18: Einspeisevergütung von PV-Anlagen nach EEG in ct/kWh

	0 – 10 kWp	10 – 40 kWp	40 – 1.000 kWp
Dez 2015	12,31	11,97	10,71

Quelle: EEG 2017

2 Energiekonzepte Neubau

2.1 Variantenauswahl und Voruntersuchung

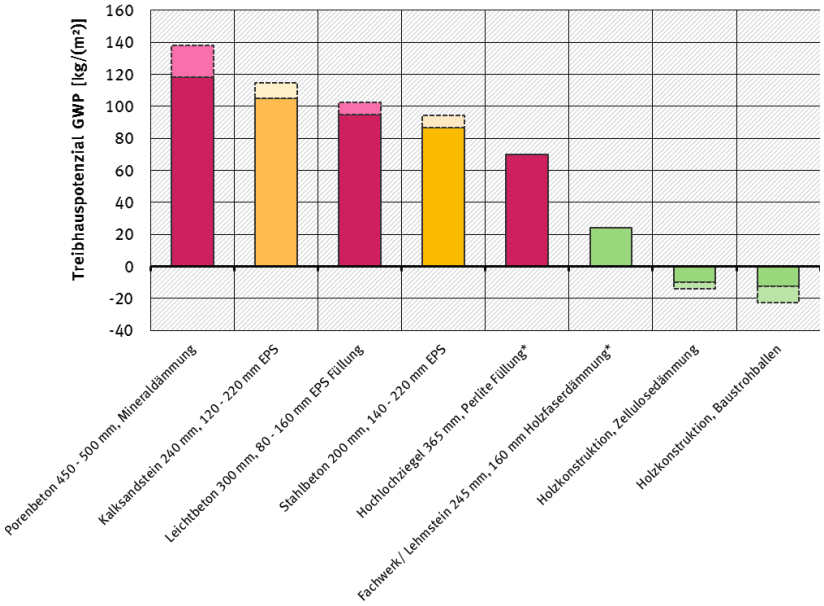
Für die Gebäudeenergiestandards EnEV-2016, Passivhaus, Nullenergie und Plusenergie wird jeweils eine „übliche Variante“ definiert und anschließend daraus eine „ökooptimierte Variante“ mit geringerem KEAne und GWP abgeleitet. Die „übliche Variante“ ist eine sehr häufig umgesetzte Maßnahmenkombination zur Erreichung des jeweiligen Gebäudeenergiestandards. Datengrundlage zur Auswahl der „üblichen Varianten“ bilden Daten des statistischen Bundesamtes, der KfW-Bankengruppe und die Passivhaus-Datenbank (vgl. Statistisches Bundesamt 2015, Diefenbach 2016, Passivhaus-Datenbank 2017).

Etwa 53 % des deutschen Wohnungsneubaus wurden durch die KfW gefördert, d.h. entsprechen den KfW Effizienzhäusern 70, 55 und 40 inklusive der Passivhäuser. Fast 50 % der geförderten Gebäude werden mit Strom durch elektrische Wärmepumpen beheizt. Bei den verbesserten Standards KfW Effizienzhaus 50 und 40 dominiert der Stromanteil mit bis zu 70 %. Erdgas als Energieträger wird bei 33 % der geförderten Gebäude eingesetzt und dominiert vor allem die Versorgung der Gebäude im Effizienzhausstandard KfW 70. Fernwärme als Energieträger nimmt 12 % ein und lediglich 6 % der Neubauten werden mit Biomasse beheizt. Ein Großteil der Passivhausgebäude im Mehrfamilienhausbereich wird über Fernwärme beheizt. Im Einfamilienhausbereich dominiert auch hier die Wärmepumpe. Über die Hälfte der Neubauten sind ohne Solaranlage ausgestattet. Bei etwa 30 % der Gebäude ist eine Solarthermie-Anlage und bei 16 % eine Photovoltaikanlage installiert. Letztere sind bei über der Hälfte der Gebäude nach KfW Effizienzhaus 40-Standard vorhanden. Fast alle Neubauten werden über Fußbodenheizung beheizt. Der größte Anteil an Neubauten wurde als Massivbau ausgeführt und etwa 16 % der Neubauten wurden in Holzbauweise errichtet (vgl. Holzbau Deutschland 2017).

Als übliche Bauweise wird im Mehrfamilienhaus eine Massivbauweise mit Stahlbeton und Wärmedämmverbundsystem (WDVS) definiert (s. detaillierte Beschreibung im Anhang A in Tabelle 53). Im Einfamilienhausbereich wird von einer Massivbauweise aus Kalksandstein mit WDVS ausgegangen (s. detaillierte Beschreibung im Anhang A in Tabelle 56). Ausgehend von den „üblichen Varianten“ in Massivbauweise mit entsprechender Anlagentechnik und Gebäudedämmung werden für die beiden Typgebäude „ökooptimierte Varianten“ abgeleitet.

Grundlage hierfür ist eine Betrachtung des Energieaufwands für verschiedene Außenwandkonstruktionen und Dämmstoffe im Lebenszyklus mit Herstellung und End-of-Life. Aufgrund des vergleichbar geringeren Materialeinsatzes schneidet eine Stahlbetonbauweise im Neubau gegenüber anderen Massivbauweisen mit ca. 95 kgCO_2-Ä./m²Wandfläche für einen Wandaufbau mit Dämmung gemäß KfW Effizienzhaus 55-Standard relativ gut ab. Das mit Abstand höchste Energieeinsparpotenzial liegt jedoch in einer Holzkonstruktion mit nachwachsendem Dämmstoff mit einer Gutschrift von bis zu 20 kgCO_2-Ä./m²Wandfläche. In Abbildung 12 sind die CO_2-Emissionen über den gesamten Lebenszyklus für verschiedene Außenwandkonstruktionen mit Dämmung gemäß EnEV-2016 und KfW Effizienzhaus 55-Standard (zzgl. heller Säulenanteil) dargestellt.

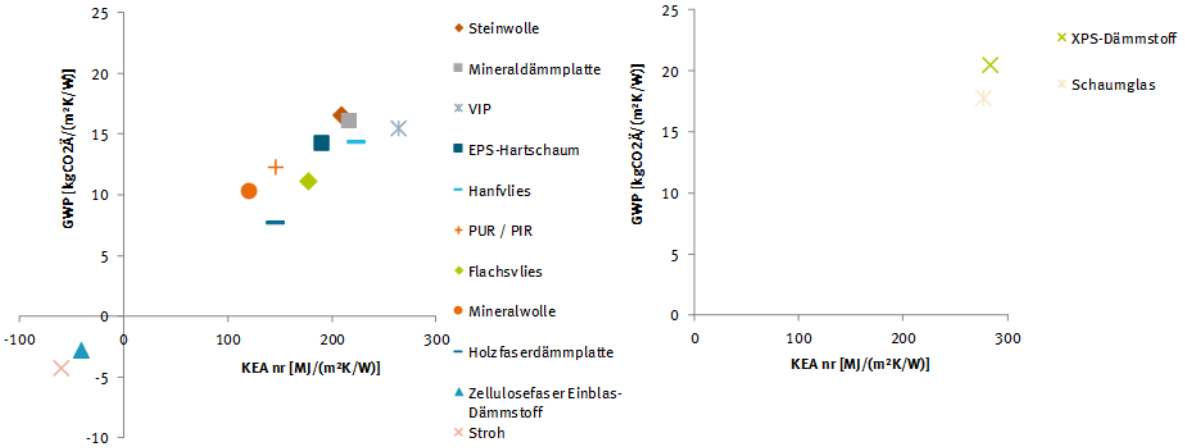
Abbildung 12: CO_2-Emissionen von Außenwandkonstruktionen (Bezug: Außenwandfläche)



Quelle: Eigene Berechnungen Steinbeis-Transferzentrum EGS und Fraunhofer IBP auf Basis ÖKOBAUDAT 2015 (*nur EnEV 2016)

Wie Abbildung 13 zeigt, liegen die am verbreitetsten und für die Massivbauvarianten verwendeten Dämmstoffe EPS, Mineralwolle und PUR im guten Mittelfeld. Lediglich die nachwachsenden Dämmstoffe Zellulose und Stroh schneiden mit großem Abstand besser ab. Schaumglas und XPS-Dämmstoffe, aber auch Vakuum-Isolations-Paneele (VIP) schneiden in Bezug auf den Energieeinsatz pro Dämmeigenschaft schlechter ab.

Abbildung 13: Ökobilanz Ranking Wärmedämmmaterialien links, Perimeter-Dämmmaterialien rechts



Quelle: Eigene Berechnungen Fraunhofer IBP auf Basis ÖKOBAUDAT 2015

Für die „ökooptimierten Varianten“ wird daher neben einer Variation der Anlagentechnik und Dämmung der Gebäudehülle auch stellenweise die Konstruktion der Gebäude verändert und eine Holzbauweise angesetzt, gemäß Anhang A Tabelle 54 und Tabelle 57.

2.2 Neubau Mehrfamilienhaus

2.2.1 Untersuchte Varianten

Die Matrix aller untersuchten Maßnahmenkombinationen aus wärmeschutztechnischer Qualität der Gebäudehülle, Lüftungsart, Wärmeversorgung und Photovoltaikanlagen und die daraus resultierenden erreichbaren Gebäudeenergiestandards für das Typgebäude Neubau Mehrfamilienhaus zeigt Tabelle 19. Die Varianten der grau unterlegten Zellen wurden nicht untersucht.

Fast alle Varianten erreichen den EnEV-2016-Standard. Alle Variantenkombinationen mit einer Dämmung gemäß KfW Effizienzhaus 40 oder besser in Kombination mit einer Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung erreichen den Passivhaus-Standard. Durch eine Photovoltaikanlage auf dem Gebäudedach kann der Nullenergie-Standard erreicht werden. Für ein Plusenergiegebäude gibt es nur die Möglichkeit einer strombasierten Wärmeversorgung mit einer Wärmepumpe in Kombination mit einer Photovoltaikanlage auf Dach und Fassaden sowie mindestens einer Dämmung KfW Effizienzhaus 40 und einer Lüftungsanlage mit WRG. Die jeweils „üblichen Varianten“ zur Realisierung der jeweiligen Gebäudeenergiestandards für den Neubau Mehrfamilienhaus sind durch eine schwarze Umrandung hervorgehoben.

Tabelle 19: Variantenmatrix Energiekonzepte Neubau Mehrfamilienhaus

Therm. Qualität Gebäude-hülle	Lüftungsart	ohne PV						mit PV Dach (100%)						mit PV Dach (100%) + Fassade (30%)					
		Gas + Solar	Fernwärme fPE=0,70	Fernwärme fPE=0,35	Pellets	Wärmepumpe	BHKW+Gas	Gas + Solar	Fernwärme fPE=0,70	Fernwärme fPE=0,35	Pellets	Wärmepumpe	BHKW+Gas	Gas + Solar	Fernwärme fPE=0,70	Fernwärme fPE=0,35	Pellets	Wärmepumpe	BHKW+Gas
EnEV 2016	Abluft		EnEV	EnEV	EnEV	EnEV	EnEV		Null	Null	Null	Null	Null						
KfW 55	Abluft	EnEV	EnEV	EnEV	EnEV	EnEV	EnEV	Null	Null	Null	Null	Null	Null						
KfW 40	Abluft	EnEV	EnEV	EnEV	EnEV	EnEV	EnEV	Null	Null	Null	Null	Null	Null						
EnEV 2016	Lüftung m WRG	EnEV	EnEV	EnEV	EnEV	EnEV	EnEV	Null	Null	Null	Null	Null	Null	Null	Null	Null	Null	Null	Null
KfW 55	Lüftung m WRG	EnEV	EnEV	EnEV	EnEV	EnEV	EnEV	Null	Null	Null	Null	Null	Null	Null	Null	Null	Null	Null	Null
KfW 40	Lüftung m WRG	Passiv	Passiv	Passiv	Passiv	Passiv	Passiv	Null	Null	Null	Null	Null	Null	Null	Null	Null	Null	Plus	Null
extrem	Lüftung m WRG	Passiv	Passiv	Passiv	Passiv	Passiv	Passiv	Null	Null	Null	Null	Null	Null	Null	Null	Null	Null	Plus	Null

Die ausgewählten „üblichen Varianten“ sind durch eine schwarze Umrandung hervorgehoben.
Quelle: Eigene Berechnungen Steinbeis-Transferzentrum EGS auf Basis DIN V 18599

In Tabelle 20 sind die Technikkomponenten und Bauweisen der jeweils „üblichen Variante“ zur Realisierung der Gebäudeenergiestandards für das neu gebaute Mehrfamilienhaus zusammengefasst.

Tabelle 20: „Übliche Varianten“ Neubau MFH

EnEV 2016	Passivhaus	Nullenergie	Plusenergie
Gas + Solarthermie	Fernwärme FP = 0,7	Wärmepumpe	Wärmepumpe
KfW 55 (HT´)	KfW 40 (HT´)	KfW 55 (HT´)	KfW 40 (HT´)
Abluftanlage	Lüftung mit WRG	Abluftanlage	Lüftung mit WRG
ohne PV	ohne PV	PV Dach	PV Dach und Fassade
Massivbauweise	Massivbauweise	Massivbauweise	Massivbauweise

Quelle: Steinbeis-Transferzentrum EGS, Statistisches Bundesamt 2015, Diefenbach 2016, Passivhaus-Datenbank 2017

Die Jahresgesamtkosten werden in Tabelle 21 aufgeführt. Alle Varianten bewegen sich zwischen 0 – 16 % Mehrkosten bezogen auf die kostengünstigste Variante. Alle Varianten mit einer Abluftanlage, mit oder ohne Photovoltaikanlage und Dämmung gemäß EnEV-2016 bis KfW Effizienzhaus 40 liegen mit maximal 4 % Mehrkosten relativ nahe beieinander. Die Integration einer Lüftungsanlage mit

WRG führt im Vergleich zu einer Abluftanlage zu 7 % Mehrkosten und ist demnach ein sichtbarer Kostenfaktor. Eine weitere Kostensteigerung resultiert durch die Fassaden-PV-Anlage (+ 3 %). Eine Verschärfung der Dämmung über ein KfW Effizienzhaus 40 hinaus ist sowohl aus energetischen als auch aus wirtschaftlichen Gründen nicht sinnvoll. Wie aus Tabelle 19 und Tabelle 21 hervorgeht, entsprechen die üblicherweise ausgeführten Energiekonzepte, d.h. die „üblichen Varianten", beim Mehrfamilienhaus in etwa der kostengünstigsten Ausführung zur Erreichung der Gebäudeenergie-standards.

Tabelle 21: Jahresgesamtkosten Neubau MFH (ohne Energiepreissteigerung)

Therm. Qualität Gebäude-hülle	Lüftungsart	ohne PV					mit PV Dach (100%)					mit PV Dach (100%) + Fassade (30%)				
		Gas + Solar	Fernwärme	Pellets	Wärmepumpe	BHKW+Gas	Gas + Solar	Fernwärme	Pellets	Wärmepumpe	BHKW+Gas	Gas + Solar	Fernwärme	Pellets	Wärmepumpe	BHKW+Gas
EnEV 2016	Abluft		101%	101%	102%	100%		101%	101%	102%	101%					
KfW 55	Abluft	101%	101%	102%	103%	101%	101%	101%	102%	102%	102%					
KfW 40	Abluft	103%	103%	104%	104%	103%	103%	103%	104%	104%	104%					
EnEV 2016	Lüftung m WRG	107%	107%	108%	109%	107%	107%	107%	109%	108%	108%	110%	110%	111%	111%	110%
KfW 55	Lüftung m WRG	108%	108%	109%	110%	108%	108%	108%	109%	109%	109%	111%	111%	112%	112%	111%
KfW 40	Lüftung m WRG	110%	110%	111%	111%	110%	110%	110%	111%	111%	111%	113%	112%	114%	114%	113%
extrem	Lüftung m WRG	113%	112%	114%	114%	113%	113%	112%	114%	114%	114%	115%	115%	117%	116%	116%

Die ausgewählten „üblichen Varianten" sind durch eine schwarze Umrandung hervorgehoben.
Quelle: Eigene Berechnungen Steinbeis-Transferzentrum EGS

Durch eine Preissteigerung von 2 %/a auf alle Energieträger sinken die Kosten für Varianten mit Eigenstromerzeugung durch Photovoltaik oder BHKW geringfügig, wie Tabelle 22 zeigt. In der Gesamtbetrachtung sind diese Unterschiede jedoch marginal und die Hauptaussagen ändern sich gegenüber einer Betrachtung ohne Preissteigerung nicht. In den nachfolgenden Auswertungen werden die Jahresgesamtkosten daher ohne eine Energiepreissteigerung dargestellt.

Tabelle 22: Jahresgesamtkosten Neubau MFH (2 % Energiepreissteigerung)

Therm. Qualität Gebäude-hülle	Lüftungsart	ohne PV					mit PV Dach (100%)					mit PV Dach (100%) + Fassade (30%)				
		Gas + Solar	Fernwärme	Pellets	Wärmepumpe	BHKW+Gas	Gas + Solar	Fernwärme	Pellets	Wärmepumpe	BHKW+Gas	Gas + Solar	Fernwärme	Pellets	Wärmepumpe	BHKW+Gas
EnEV 2016	Abluft		102%	101%	102%	100%		101%	101%	101%	101%					
KfW 55	Abluft	101%	102%	102%	103%	100%	100%	101%	102%	101%	101%					
KfW 40	Abluft	103%	103%	104%	104%	102%	102%	103%	103%	103%	103%					
EnEV 2016	Lüftung m WRG	107%	108%	108%	109%	106%	106%	107%	108%	107%	107%	109%	110%	110%	110%	109%
KfW 55	Lüftung m WRG	108%	108%	109%	109%	107%	107%	107%	108%	108%	107%	110%	110%	111%	110%	110%
KfW 40	Lüftung m WRG	110%	109%	111%	111%	109%	109%	109%	110%	109%	109%	111%	111%	113%	112%	112%
extrem	Lüftung m WRG	112%	111%	113%	113%	112%	111%	111%	113%	112%	112%	114%	113%	115%	115%	115%

Die ausgewählten „üblichen Varianten" sind durch eine schwarze Umrandung hervorgehoben.
Quelle: Eigene Berechnungen Steinbeis-Transferzentrum EGS

2.2.2 KEAne und GWP

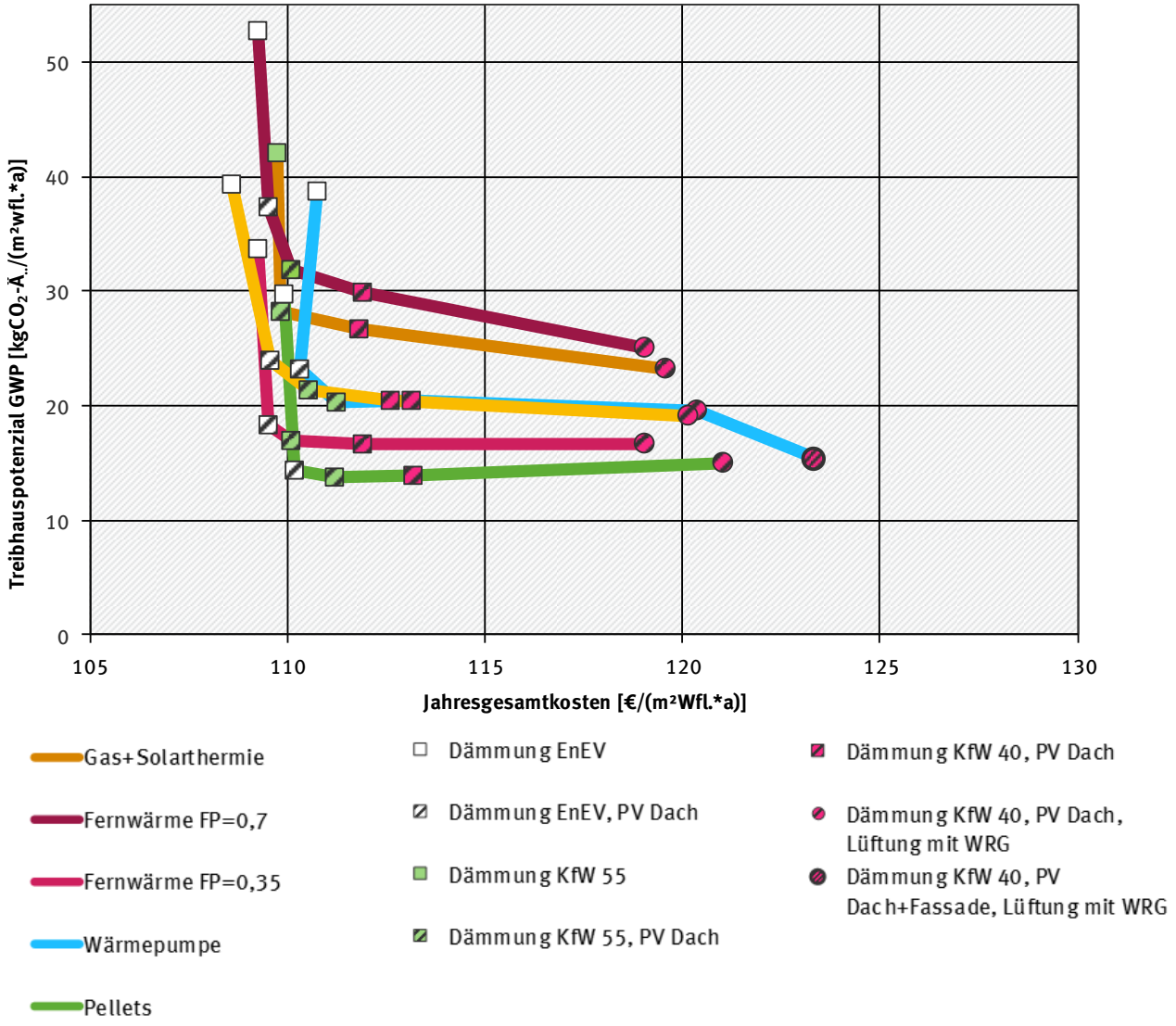
Die größten Unterschiede der Varianten in Bezug auf CO_2-Emissionen sind auf die Nutzungsphase zurückzuführen. Dies wird aus Abbildung 14 ersichtlich. Dort sind die einzelnen Varianten und die damit verbundenen CO_2-Emissionen (GWP) und Jahresgesamtkosten (JGK) abgebildet. Die Symbole und Farben in der Grafik stellen die einzelnen Maßnahmen dar:

- Ausführung der Gebäudehülle: weiß = Dämmung gemäß EnEV 2016-Standard, grün = Dämmung gemäß KfW Effizienzhaus 55, rot = Dämmung gemäß KfW Effizienzhaus 40
- Photovoltaikanlage: Schraffur = mit PV
- Lüftungsart: Quadrat = Abluftanlage, Kreis = Lüftung mit WRG

- Art der Wärmeversorgung durch farbigen Linien

Den größten Einfluss auf die CO_2-Emissionen hat die Art der Wärmeversorgung. Durch eine regenerative Wärmeversorgung mit Holzpellets im Vergleich zu einer fossilen Versorgung durch Fernwärme mit einem Primärenergiefaktor von $f_p = 0{,}7$ können die CO_2-Emissionen um fast 45 % (> 20 kgCO_2-Ä./($m^2_{Wfl.}$·a)) gesenkt werden. Neben den Wärmeversorgungsvarianten mit fossiler Fernwärme weisen die Varianten mit Gaskessel und Solarthermie die höchsten CO_2-Emissionen auf. Variantenkombinationen mit Wärmepumpe und BHKW liegen im Mittelfeld. Eine Fernwärmewärmeversorgung mit einem hohen regenerativen Anteil (Primärenergiefaktor $f_p = 0{,}35$) erreicht fast die CO_2-Emissionen einer Wärmeversorgung mittels Holzpellets. Eine Photovoltaikanlage auf dem Gebäudedach kann die CO_2-Emissionen um weitere 15 kgCO_2-Ä./($m^2_{Wfl.}$·a) reduzieren und führt in Verbindung mit einer Wärmepumpe sogar zu geringeren Jahresgesamtkosten. Die prozentualen Auswirkungen einer Photovoltaikanlage variieren je nach Wärmeversorgung mit einer Einsparung zwischen 30 – 60 %. Eine Verbesserung der Gebäudehülle mit Dämmung gemäß KfW 55–Standard wirkt sich je nach Energieträger mit einer weiteren Einsparung zwischen 5 – 15 % (1 – 5 kgCO_2-Ä./($m^2_{Wfl.}$·a)) aus. Eine zusätzliche Verbesserung der Dämmung gemäß KfW Effizienzhaus 40 oder die Integration einer Lüftung mit Wärmerückgewinnung wirken sich aus energetischer Sicht nur bei fossil dominierter Versorgung positiv aus. Bei einer regenerativen Energieversorgung führen sowohl eine Dämmung gemäß KfW Effizienzhaus 40 als auch die Lüftungsanlage mit WRG sogar zu höheren CO_2-Emissionen.

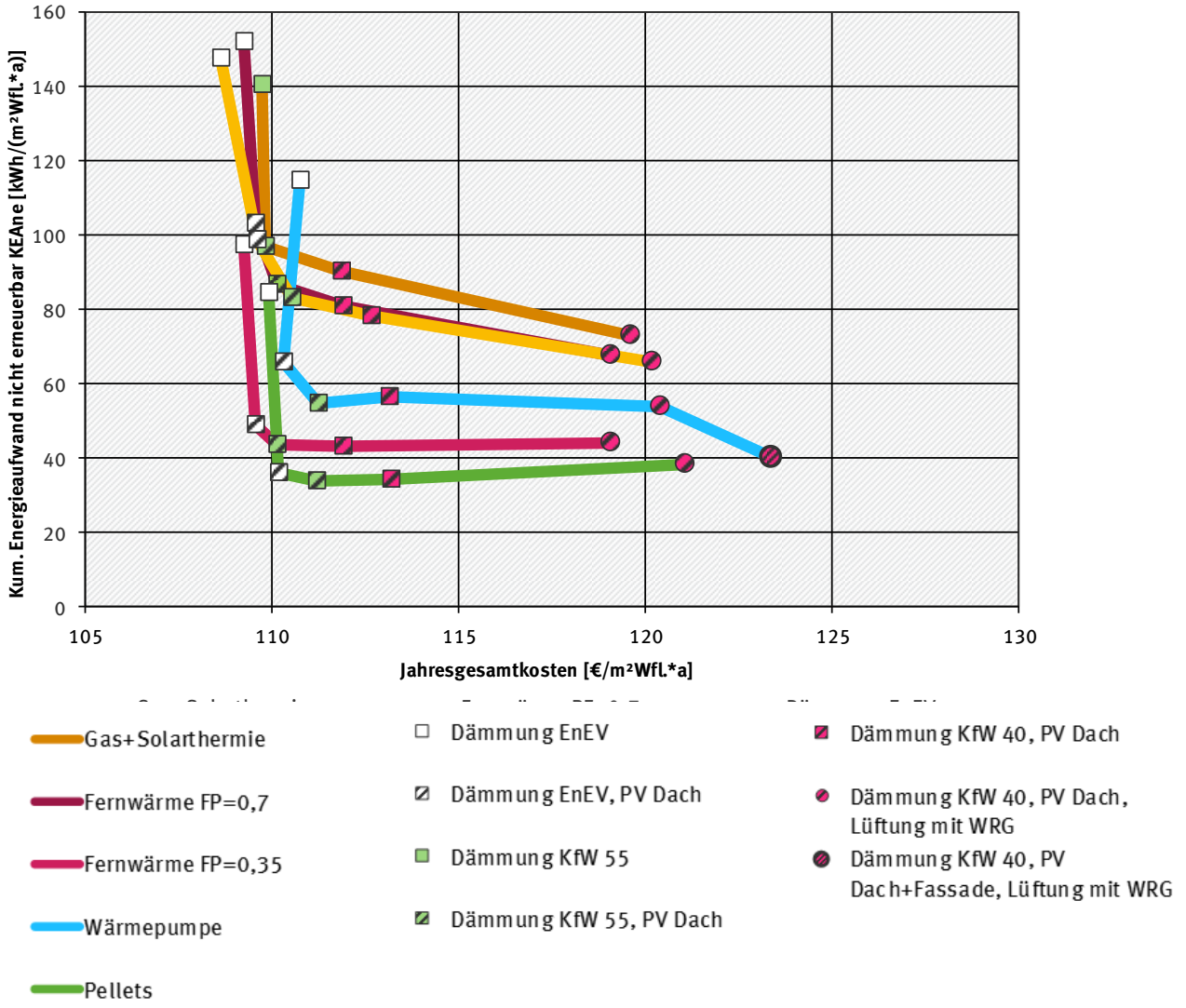
Abbildung 14: GWP/ Jahresgesamtkosten der Energiekonzepte Neubau MFH



Quelle: Eigene Berechnungen

In Abbildung 15 sind der kumulierte Energieaufwand nicht erneuerbar (KEAne) der einzelnen Variantenkombinationen und die damit verbundenen Jahresgesamtkosten dargestellt. Die Ergebnisse hinsichtlich CO_2-Emissionen und KEAne korrelieren tendenziell. Ein Unterschied besteht lediglich in der Einstufung der fossil dominierten Wärmeversorgungsvarianten durch die Bewertung der Energieträger Erdgas und fossiler Fernwärme. Dies liegt in den Datensätzen der ÖKOBAUDAT begründet. Die Bewertung der Energieträger erfolgt auf Basis der in Tabelle 9 aufgeführten Faktoren, welche für den Energieträger Erdgas gegenüber der fossilen Fernwärme einen höheren KEAne und einen niedrigeren GWP-Wert aufweisen.

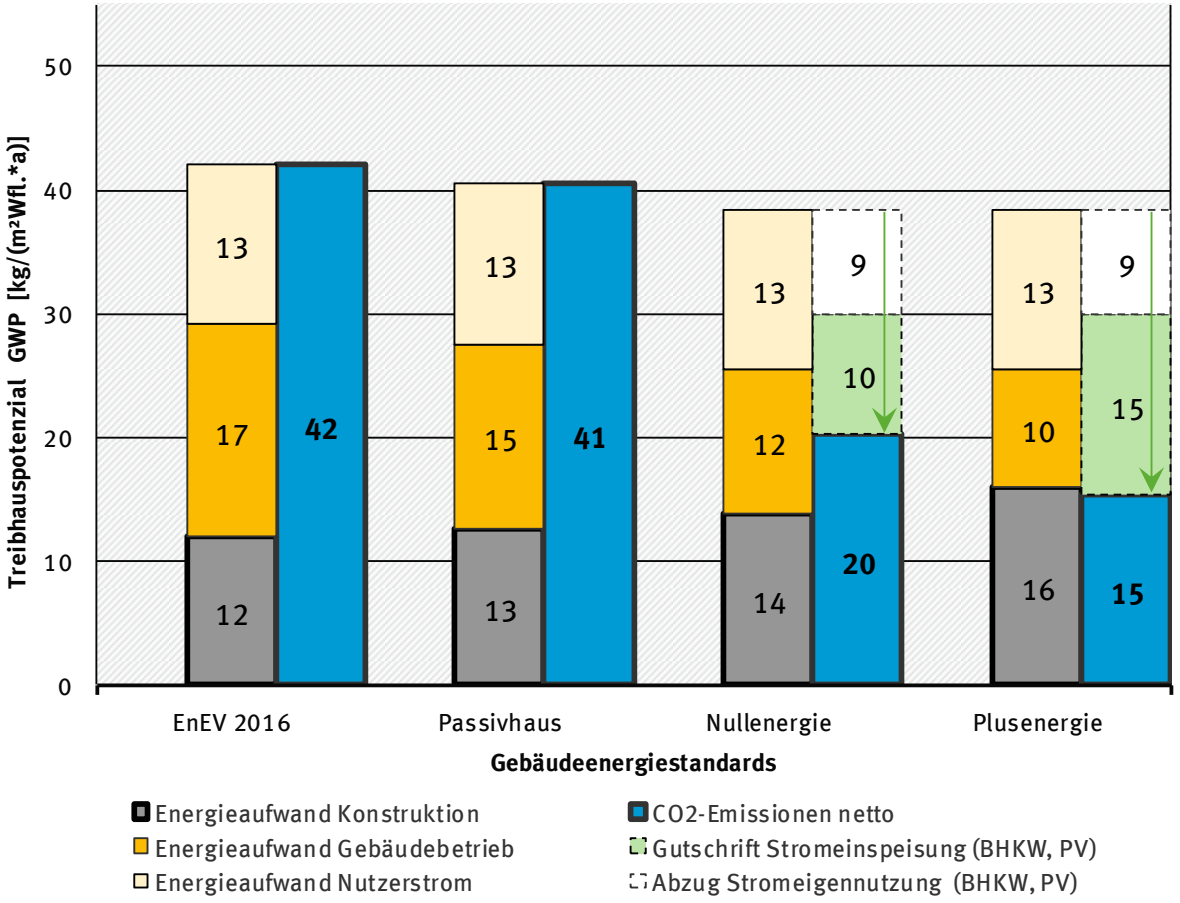
Abbildung 15: KEAne/ Jahresgesamtkosten der Energiekonzepte Neubau MFH



Quelle: Eigene Berechnungen

Für die „üblichen Varianten“ werden in Abbildung 16 die Aufteilung der CO_2-Emissionen im Lebenszyklus dargestellt. Auf der linken Säulenseite sind jeweils die CO_2-Emissionen für Konstruktion, Gebäudebetrieb und Nutzerstrom, rechts die Emissionsreduzierungen durch Stromeigennutzung und –gutschriften bzw. die verbleibenden netto-Emissionen dargestellt. Auf die Gebäudekonstruktion mit Herstellung, Instandsetzung und EoL (graue Säule) entfallen insgesamt 12 – 16 kgCO_2-Ä./(m²$_{Wfl.}$·a). Der Anteil der CO_2-Emissionen für die Konstruktion in Bezug auf die Gesamtemissionen (linke Säule) beträgt für Gebäude im EnEV-2016 und Passivhaus-Standard rund 30 %. Durch den Einsatz von PV-Anlagen steigt der Konstruktionsanteil bei üblichen Null- und Plusenergiegebäuden auf rund 35 – 40 %. Beim Plusenergiegebäude führt die konsequente lokale Stromerzeugung zur Kompensation der nutzungsbedingten CO_2-Emissionen, so dass bilanziell lediglich Emissionen im Umfang der Konstruktion verbleiben.

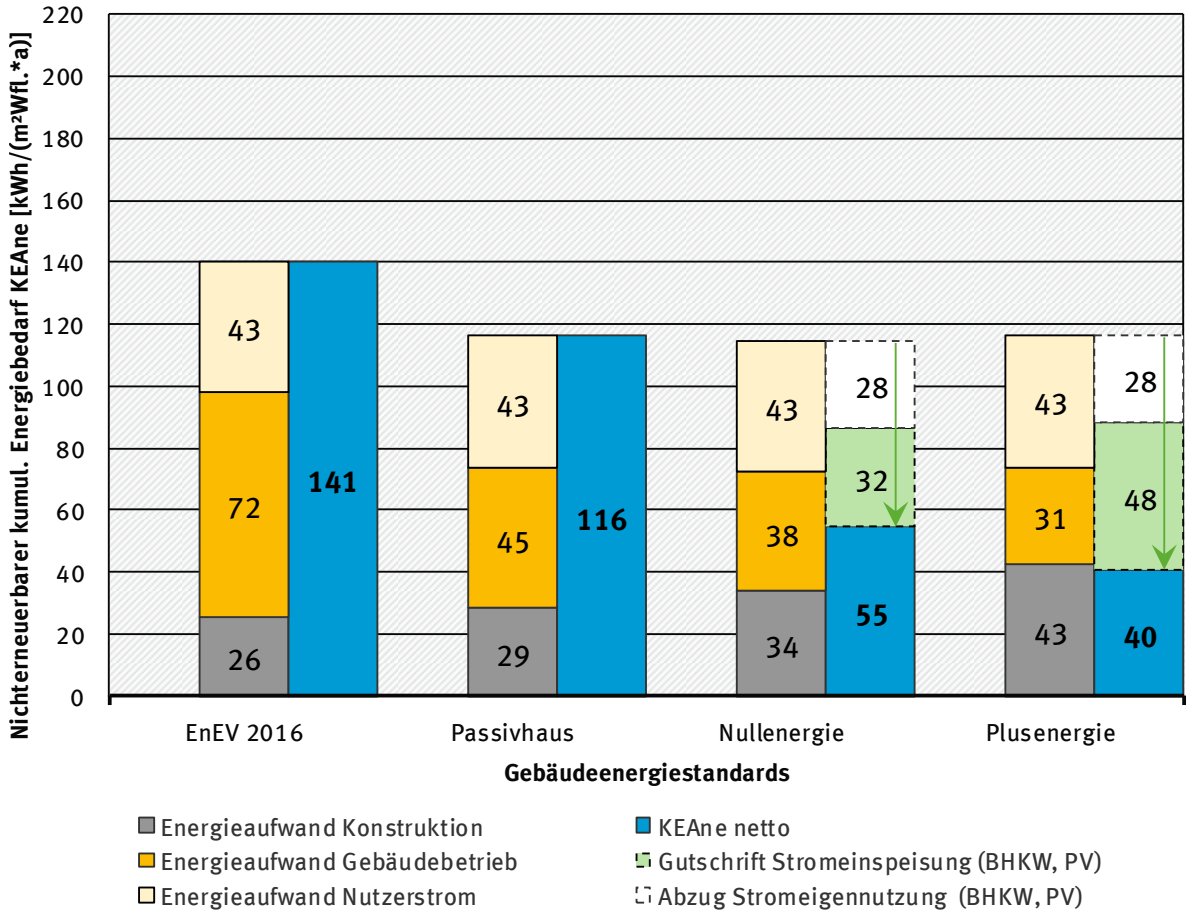
Abbildung 16: GWP der „üblichen Varianten“ Neubau MFH



Quelle: Eigene Berechnungen

In Abbildung 17 wird der KEAne im Lebenszyklus der „üblichen Varianten“ ausgewiesen. Auf die Gebäudekonstruktion entfallen insgesamt 26 – 43 kWh/(m²Wfl.·a). Dies entspricht einem Anteil für die Konstruktion bei Gebäuden im EnEV-2016 und Passivhaus-Standard von rund 20 – 25 %. Bei üblichen Null- und Plusenergiegebäuden steigt der Konstruktionsanteil auf rund 35 - 40 % ein. Beim Plusenergiegebäude führt auch hier die konsequente lokale Stromerzeugung zur Kompensation des nutzungsbedingten KEAne, so dass bilanziell lediglich ein Energieaufwand im Umfang der Konstruktion verbleibt.

Abbildung 17: KEAne der „üblichen Varianten“ Neubau MFH

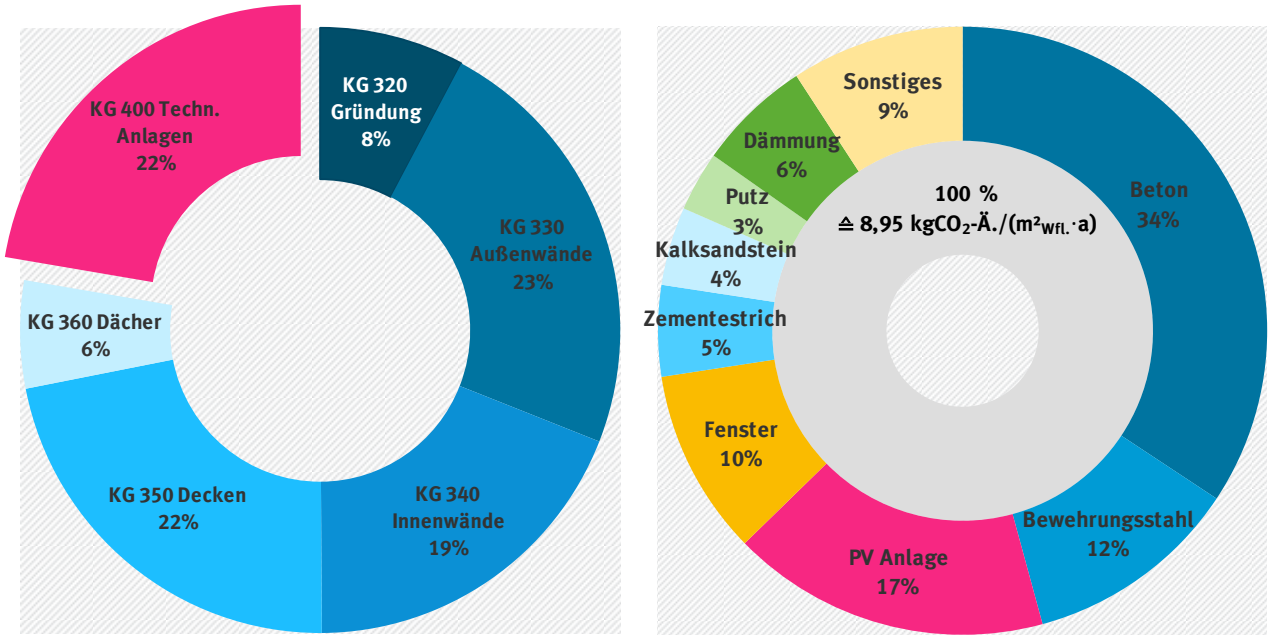


Quelle: Eigene Berechnungen

2.2.3 Analyse der Bauweisen

Betrachtet man die Herstellungsphase, entfallen etwa 80 % der CO_2-Emissionen auf die KG 300, wie aus Abbildung 18 am Beispiel des Plusenergiegebäudes hervorgeht. Materialseitig dominieren mit 46 % der Stahlbeton für die Gebäudekonstruktion gefolgt von Photovoltaikanlagen auf Dach und Fassade mit 17 %. Die Kunststofffenster haben einen Anteil von 10 % und die Dämmung der Gebäudehülle mit EPS-Dämmstoff und Mineralwolle entsprechen noch 6 % des Energieaufwands. Die abgebildete Anlagentechnik ohne Photovoltaik, bestehend aus Wärmepumpen mit Wärmequelle Erdsonden mit Pufferspeicher, Wasserleitungen, Fußbodenheizung und zentraler Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung, hat einen geringen Anteil von rund 5 %. Nicht abgebildet wurden anlagenseitig die Elektroverteilleitungen, da diese bei allen Varianten gleich sind und erfahrungsgemäß einen vernachlässigbaren Anteil am Energieaufwand der Herstellphase haben.

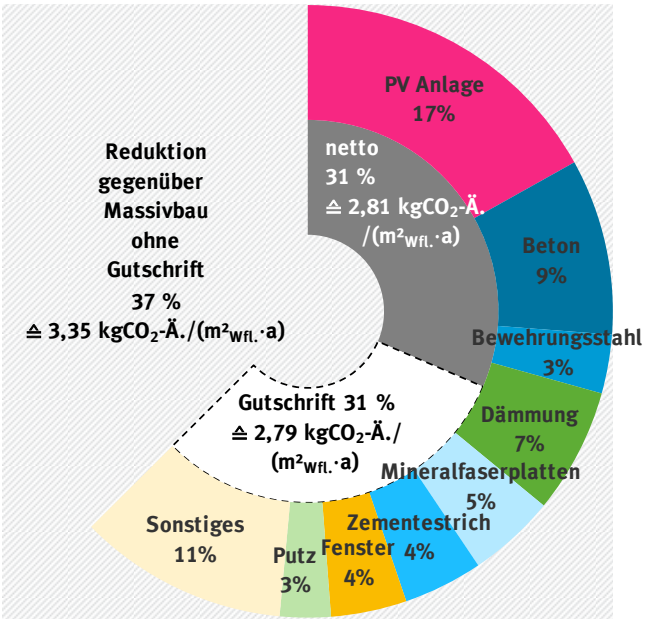
Abbildung 18: Anteile GWP an Herstellungsphase am Bsp. der „üblichen Variante“ Neubau Mehrfamilienhaus Plusenergie (Massivbauweise)



Quelle: Eigene Berechnungen Fraunhofer IBP auf Basis der ÖKOBAUDAT 2015

Möglichkeiten zur Reduktion des Energieaufwands in der Herstellungsphase sind Leichtbauweisen mit geringerem Einsatz von Beton und Zementklinker-reduzierten Betonen. Für die „ökooptimierte Variante“ wird eine Leichtbauweise in Holzständerbauweise mit Dämmung aus dem nachwachsenden Rohstoff Zellulose gewählt, da diese Bauweise die geringsten CO_2-Emissionen aufweist. Die Ausführung der Gebäudegründung bleibt massiv in Stahlbeton ausgeführt. Die alternative Holzbauweise führt inklusive der Gutschriften zu einer Reduktion von insgesamt 70 % der CO_2-Emissionen in der Herstellungsphase gegenüber einer Ausführung in Massivbauweise, wie aus Abbildung 19 ersichtlich wird. Der Anteil für Stahlbeton reduziert sich auf 12 % da nur noch die Gründung massiv ausgeführt wird und der Anteil für Holzfenster auf 4 %. Der ausgewiesene Anteil Dämmung von 7 % ist auf die druckfeste Dachdämmung und die Ausführung der Gebäudedecken zurückzuführen.

Abbildung 19: Anteile GWP an Herstellungsphase am Bsp. Neubau Mehrfamilienhaus Plusenergie in Holzbauweise



Quelle: Eigene Berechnungen Fraunhofer IBP auf Basis der ÖKOBAUDAT 2015

2.2.4 Ökooptimierte Varianten

Auf Basis der vorangegangenen Untersuchungen werden ausgehend von den „üblichen Varianten“ aus den verschiedenen Variantenkombinationen „ökooptimierte Varianten“ abgeleitet. Das Nullenergie- und das Plusenergiegebäude werden in der „ökooptimierten Variante“ in Holzbauweise ausgeführt. Für die Gebäude im EnEV-2016 und Passivhausstandard stellen die Wahl der Wärmeerzeugung und die Installation einer Photovoltaikanlage bereits kosteneffiziente Optimierungsmaßnahmen dar. Daher werden diese Gebäude noch in Massivbauweise ausgeführt. Die „ökooptimierten Varianten“ für die jeweiligen Gebäudeenergiestandards sind in Tabelle 23 aufgeführt.

Tabelle 23: „Ökooptimierte Varianten“ Neubau MFH

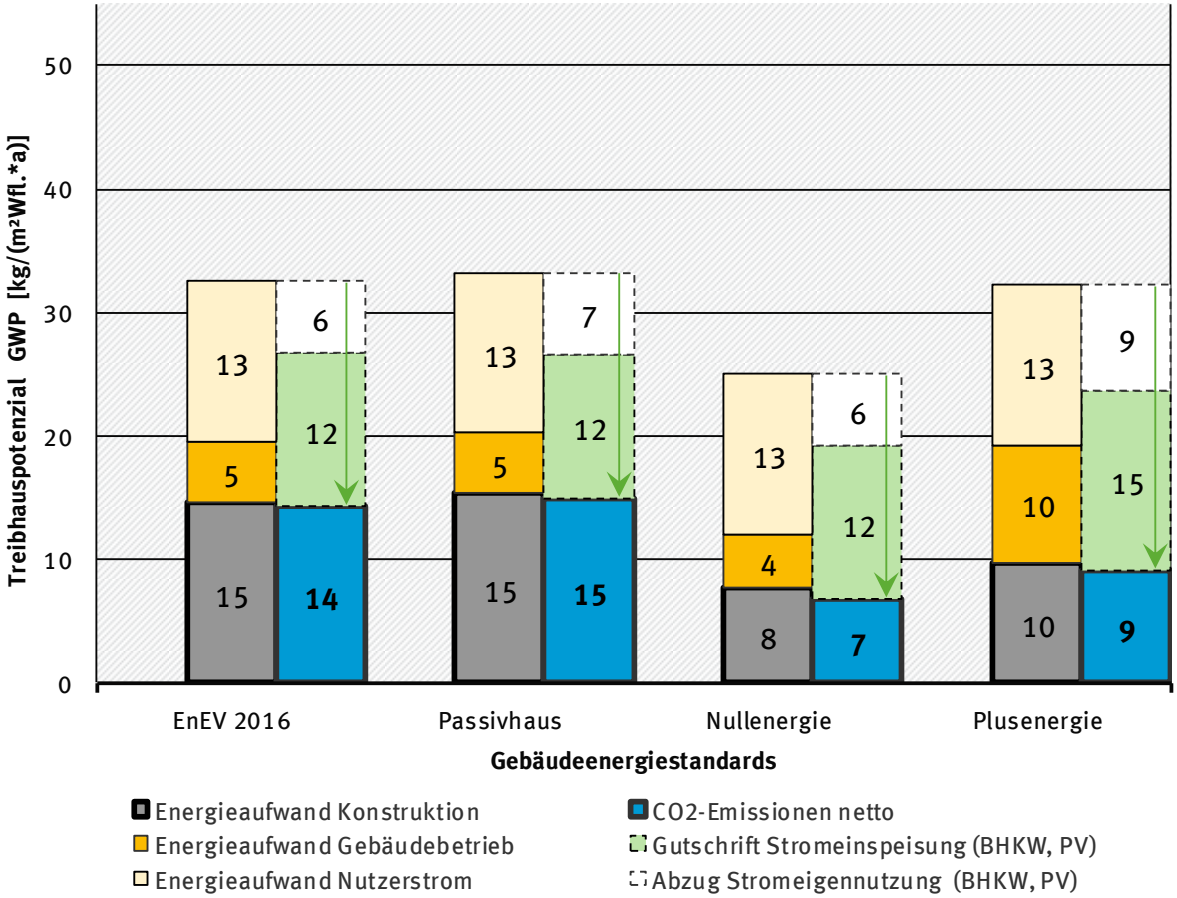
EnEV 2016	Passivhaus	Nullenergie	Plusenergie
Pellets	Pellets	Pellets	Wärmepumpe
EnEV 2016 (HT´)	KfW 40 (HT´)	KfW 55 (HT´)	KfW 40 (HT´)
Abluftanlage	Lüftung mit WRG	Abluftanlage	Lüftung mit WRG
PV Dach	PV Dach	PV Dach	PV Dach
Massivbauweise	Massivbauweise	Holzbauweise	Holzbauweise

Quelle: Steinbeis-Transferzentrum EGS

Analog zu den „üblichen Varianten“ werden für die „ökooptimierten Varianten“ in Abbildung 20 die Aufteilung der CO_2-Emissionen im Lebenszyklus dargestellt. Durch die Integration einer PV-Anlage erhöht sich bei den ökooptimierten Gebäuden im EnEV-2016 und Passivhaus-Standard der Anteil Konstruktion auf rund 15 $kgCO_2$-Ä./($m^2_{wfl.}$·a). Durch die Ausführung in Holzbauweise sinkt bei den ökooptimierten Gebäuden im Nullenergie- und Plusenergie-Standard der Anteil Konstruktion auf 8 – 10 $kgCO_2$-Ä./($m^2_{wfl.}$·a). Über alle Gebäudeenergiestandards hinweg führt die konsequente lokale

Stromerzeugung zur Kompensation der nutzungsbedingten CO_2-Emissionen, so dass bilanziell lediglich Emissionen im Umfang der Konstruktion verbleiben.

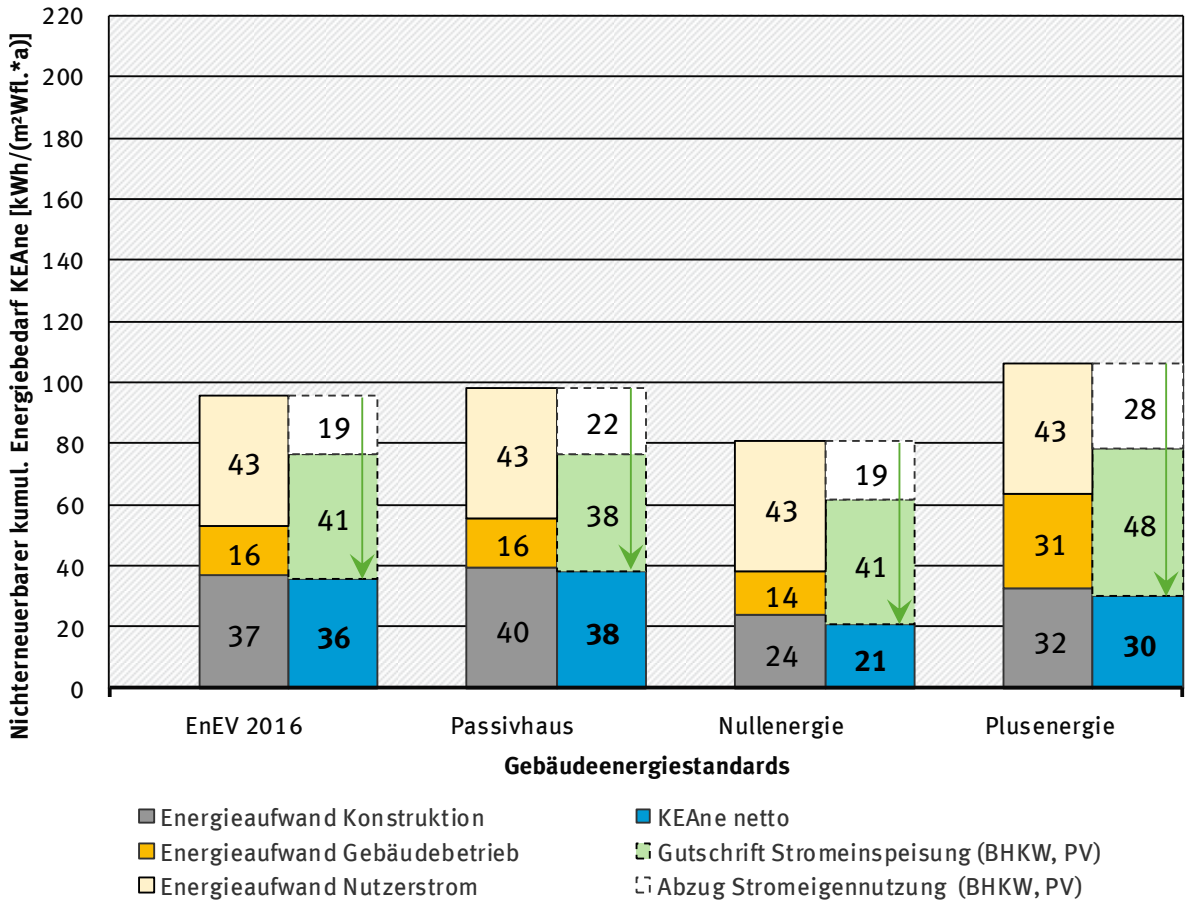
Abbildung 20: GWP der „ökooptimierten Varianten“ Neubau MFH



Quelle: Eigene Berechnungen

In Abbildung 21 wird der KEAne im Lebenszyklus der „ökooptimierten Varianten“ ausgewiesen. Durch die Integration einer Photovoltaikanlage erhöht sich bei den ökooptimierten Gebäuden im EnEV-2016 und Passivhaus-Standard der Anteil Konstruktion auf 37 – 40 kWh/($m^2_{Wfl.}$·a). Durch die Ausführung in Holzbauweise sinkt bei den ökooptimierten Gebäuden im Null- und Plusenergie-Standard der Konstruktionsanteil auf 24 – 32 kWh/($m^2_{Wfl.}$·a). Auch hier entspricht der verbleibende KEAne aller „ökooptimierten Varianten“ dem Anteil der Konstruktion.

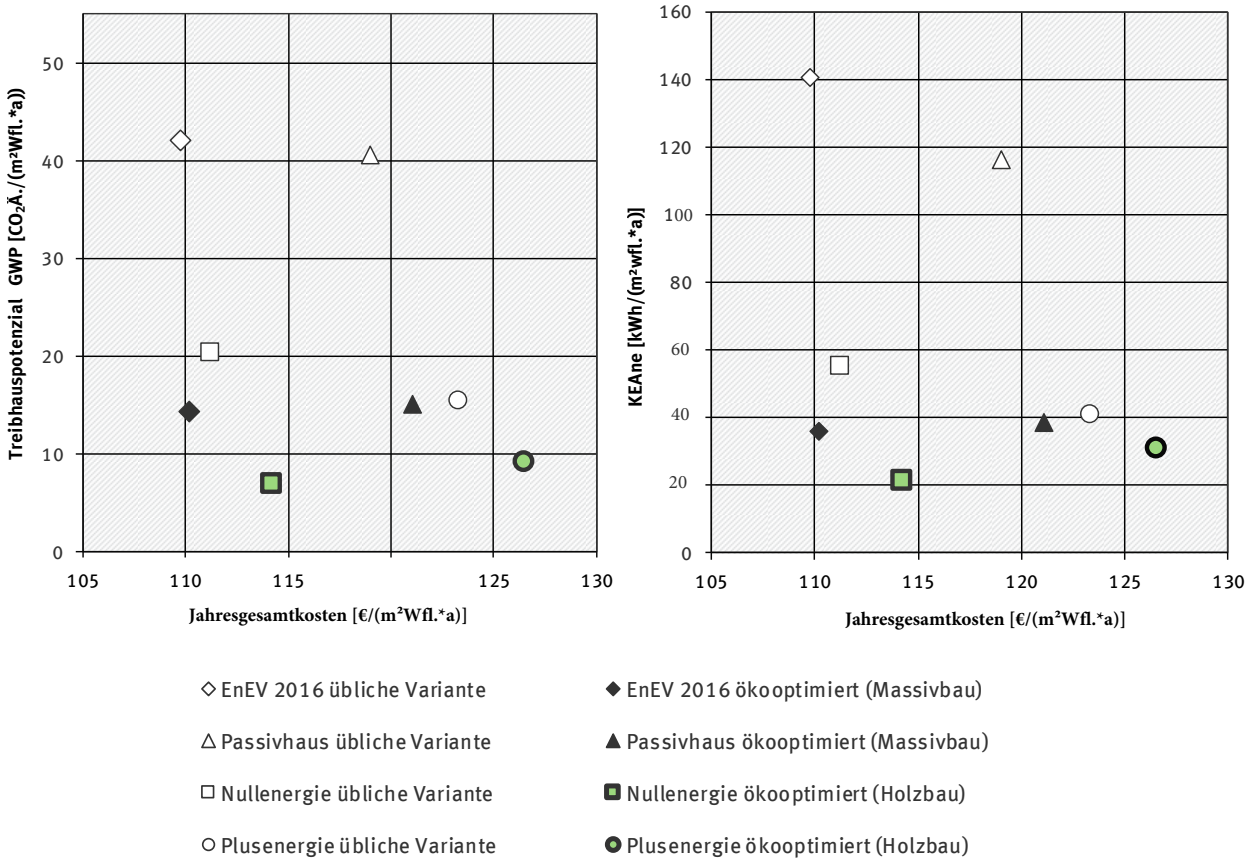
Abbildung 21: KEAne der „ökooptimierten Varianten“ Neubau MFH



Quelle: Eigene Berechnungen

Abbildung 22 zeigt zusammenfassend eine Gegenüberstellung der „üblichen“ und „ökooptimierten Varianten“ je Gebäudeenergiestandard gemäß Tabelle 20 und Tabelle 23. Die ökooptimierten EnEV-2016 und Passivhaus-Konzepte erreichen mit ca. 15 kgCO_2-Ä./(m²$_{Wfl.}$·a) bzw. 40 kWh/(m²$_{Wfl.}$·a) das Niveau eines Plusenergiegebäudes bei nur geringen Jahresgesamtmehrkosten. Durch eine alternative Ausführung von Null- oder Plusenergiegebäuden in Holzbauweise können CO_2-Emissionen < 10 kgCO_2-Ä./(m²$_{Wfl.}$·a) bzw. KEAne von 20 - 30 kWh/(m²$_{Wfl.}$·a) erreicht werden. Die Jahresgesamtmehrkosten erhöhen sich dabei um 3 %. Durch eine Ausführung des Neubau Mehrfamilienhauses in Holzbau- statt Massivbauweise lassen sich über 6 kgCO_2-Ä./(m²$_{Wfl.}$·a) bzw. 540 t CO_2-Emissionen im gesamten Lebenszyklus einsparen.

Abbildung 22: GWP/ JGK und KEAne/ JGK der Neubauvarianten MFH



Quelle: Eigene Berechnungen

2.3 Neubau Einfamilienhaus

2.3.1 Untersuchte Varianten

Tabelle 24 zeigt die Matrix aller untersuchten Maßnahmenkombinationen und die daraus resultierenden erreichbaren Gebäudeenergiestandards für das Typgebäude Neubau Einfamilienhaus.

Fast alle Varianten erreichen den EnEV-2016-Standard. Alle Variantenkombinationen mit einer Dämmung gemäß KfW Effizienzhaus 40 oder besser in Kombination mit einer Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung erreichen den Passivhaus-Standard. Durch eine Photovoltaikanlage auf dem kompletten Pultdach wird mit allen Wärmeversorgungstechniken der Nullenergie-Standard erreicht. Voraussetzung für ein Plusenergiegebäude ist auch hier eine strombasierte Wärmeversorgung mit einer Wärmepumpe und einer Photovoltaikanlage auf dem Dach. Im Einfamilienhausbereich können diese Komponenten jedoch entweder mit einer Abluftanlage und einer verbesserten Dämmung gemäß KfW Effizienzhaus 40 oder einer Lüftungsanlage mit WRG und einer Dämmung gemäß KfW Effizienzhaus 55 kombiniert werden. Die jeweils „üblichen Varianten“ zur Realisierung der Gebäudeenergiestandards für den Neubau Einfamilienhaus sind durch eine schwarze Umrandung hervorgehoben.

Tabelle 24: Variantenmatrix Energiekonzepte Neubau Einfamilienhaus

Therm. Qualität Gebäude-hülle	Lüftungsart	ohne PV						mit PV Dach (100%)					
		Gas + Solar	Fernwärme fPE=0,70	Fernwärme fPE=0,35	Pellets	Wärmepumpe	Brennstoff-zelle + Gas	Gas + Solar	Fernwärme fPE=0,70	Fernwärme fPE=0,35	Pellets	Wärmepumpe	Brennstoff-zelle + Gas
EnEV 2016	Abluft		EnEV	EnEV	EnEV	EnEV	EnEV		Null	Null	Null	Null	Null
KfW 55	Abluft	EnEV	EnEV	EnEV	EnEV	EnEV	EnEV	Null	Null	Null	Null	Null	Null
KfW 40	Abluft	EnEV	EnEV	EnEV	EnEV	EnEV	EnEV	Null	Null	Null	Null	Plus	Null
EnEV 2016	Lüftung m WRG	EnEV	EnEV	EnEV	EnEV	EnEV	EnEV	Null	Null	Null	Null	Null	Null
KfW 55	Lüftung m WRG	EnEV	EnEV	EnEV	EnEV	EnEV	EnEV	Null	Null	Null	Null	Plus	Null
KfW 40	Lüftung m WRG	Passiv	Passiv	Passiv	Passiv	Passiv	Passiv	Null	Null	Null	Null	Plus	Null
extrem	Lüftung m WRG	Passiv	Passiv	Passiv	Passiv	Passiv	Passiv	Null	Null	Null	Null	Plus	Null

Die ausgewählten „üblichen Varianten“ sind durch eine schwarze Umrandung hervorgehoben.
Quelle: Eigene Berechnungen Steinbeis-Transferzentrum EGS auf Basis DIN V 18599

In Tabelle 25 sind die Technikkomponenten und Bauweisen der jeweils „üblichen Variante“ zur Realisierung der Gebäudeenergiestandards für das neu gebaute Einfamilienhaus zusammengefasst.

Tabelle 25: „Übliche Varianten“ Neubau EFH

EnEV 2016	Passivhaus	Nullenergie	Plusenergie
Gas + Solarthermie	Wärmepumpe	Wärmepumpe	Wärmepumpe
KfW 55 (HT´)	KfW 40 (HT´)	KfW 55 (HT´)	KfW 55 (HT´)
Abluftanlage	Lüftung mit WRG	Abluftanlage	Lüftung mit WRG
ohne PV	ohne PV	PV Dach	PV Dach
Massivbau	Massivbau	Massivbau	Massivbau

Quelle: Steinbeis-Transferzentrum EGS, Statistisches Bundesamt 2015, Diefenbach 2016, Passivhaus-Datenbank 2017

Die Jahresgesamtkosten der Varianten sind in Tabelle 26 aufgeführt. Beim Einfamilienhaus erhöht sich die Spanne der Mehrkosten der Varianten untereinander auf max. 23 %. Dies ist vor allem auf die Kostenunterschiede der Wärmeversorgungstechniken untereinander zurückzuführen. Die mit Abstand kostenintensivste Lösung im Einfamilienhausbereich ist derzeit eine Wärmeversorgung mit einem Brennstoffzellenkompaktgerät (+10 %) gefolgt von Holzpellets (+5 %). Die Kostenunterschiede zwischen einer Wärmeversorgung mit Gas und Solarthermie, Fernwärme oder Wärmepumpe sind mit 1 % sehr gering. Eine Photovoltaikanlage auf dem Gebäudedach führt zu keinen bzw. nur zu vernachlässigbaren Mehrkosten. Die geringfügigen Mehrkosten durch eine Photovoltaikanlage sind auf den gewählten Zeitraum der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung von 30 Jahren zurückzuführen. Nach 20 Jahren entfällt die EEG-Vergütung und die Einspeiseerlöse bewegen sich in Höhe der dann noch erzielbaren Börsenpreise (vgl. Marktwert Solar 2015). Auch im Einfamilienhaus ist eine Lüftungsanlage mit WRG ein Kostenfaktor und führt im Vergleich zu einer Abluftanlage zu etwa 5 % Jahresgesamtmehrkosten. Ein weiterer Kostensprung von etwa 5 % wird durch die Verbesserung des Dämmstandards von KfW 55 auf KfW Effizienzhaus 40 verursacht. Eine Verschärfung der Dämmung über den KfW Effizienzhaus 40 hinaus ist sowohl aus energetischen als auch wirtschaftlichen Gründen nicht sinnvoll.

Die „üblichen Varianten“ je Gebäudeenergiestandard entsprechen im Einfamilienhausbereich teilweise den kostengünstigsten Ausführungen.

Tabelle 26: Jahresgesamtkosten Neubau EFH (ohne Energiepreissteigerung)

Therm. Qualität Gebäude-hülle	Lüftungsart	ohne PV					mit PV Dach (100%)				
		Gas + Solar	Fernwärme	Pellets	Wärmepumpe	Brennstoff-zelle + Gas	Gas + Solar	Fernwärme	Pellets	Wärmepumpe	Brennstoff-zelle + Gas
EnEV 2016	Abluft		101%	104%	101%	109%		102%	105%	101%	110%
KfW 55	Abluft	100%	101%	105%	101%	110%	100%	102%	106%	101%	111%
KfW 40	Abluft	104%	104%	110%	104%	115%	104%	105%	110%	104%	116%
EnEV 2016	Lüftung m WRG	105%	106%	110%	105%	114%	105%	106%	110%	105%	115%
KfW 55	Lüftung m WRG	105%	106%	111%	105%	116%	105%	106%	112%	105%	117%
KfW 40	Lüftung m WRG	109%	109%	116%	108%	121%	109%	109%	116%	108%	122%
extrem	Lüftung m WRG	110%	110%	117%	109%	122%	111%	110%	118%	109%	123%

Die ausgewählten „üblichen Varianten“ sind durch eine schwarze Umrandung hervorgehoben.
Quelle: Eigene Berechnungen Steinbeis-Transferzentrum EGS

Eine Preissteigerung von 2 % auf alle Energieträger gemäß Tabelle 27 führt nur zu marginalen Unterschieden. Die Varianten mit Wärmepumpe werden im Gegensatz zu den anderen Wärmeversorgungstechniken aufgrund ihrer Effizienz etwas günstiger. Die Hauptaussagen ändern sich gegenüber einer Betrachtung ohne Preissteigerung nicht. In den folgenden Auswertungen werden die Jahresgesamtkosten daher ohne Energiepreissteigerung dargestellt.

Tabelle 27: Jahresgesamtkosten Neubau EFH (2 % Energiepreissteigerung)

Therm. Qualität Gebäude-hülle	Lüftungsart	ohne PV					mit PV Dach (100%)				
		Gas + Solar	Fernwärme	Pellets	Wärmepumpe	Brennstoff-zelle + Gas	Gas + Solar	Fernwärme	Pellets	Wärmepumpe	Brennstoff-zelle + Gas
EnEV 2016	Abluft		103%	105%	101%	110%		103%	105%	100%	110%
KfW 55	Abluft	101%	103%	106%	100%	110%	100%	102%	106%	100%	111%
KfW 40	Abluft	104%	105%	110%	103%	114%	104%	105%	110%	103%	115%
EnEV 2016	Lüftung m WRG	105%	107%	110%	105%	114%	105%	107%	110%	104%	115%
KfW 55	Lüftung m WRG	105%	106%	111%	104%	115%	105%	106%	111%	104%	116%
KfW 40	Lüftung m WRG	109%	109%	116%	108%	120%	108%	109%	115%	107%	120%
extrem	Lüftung m WRG	110%	110%	117%	108%	121%	109%	109%	116%	108%	122%

Die ausgewählten „üblichen Varianten“ sind durch eine schwarze Umrandung hervorgehoben.
Quelle: Eigene Berechnungen Steinbeis-Transferzentrum EGS

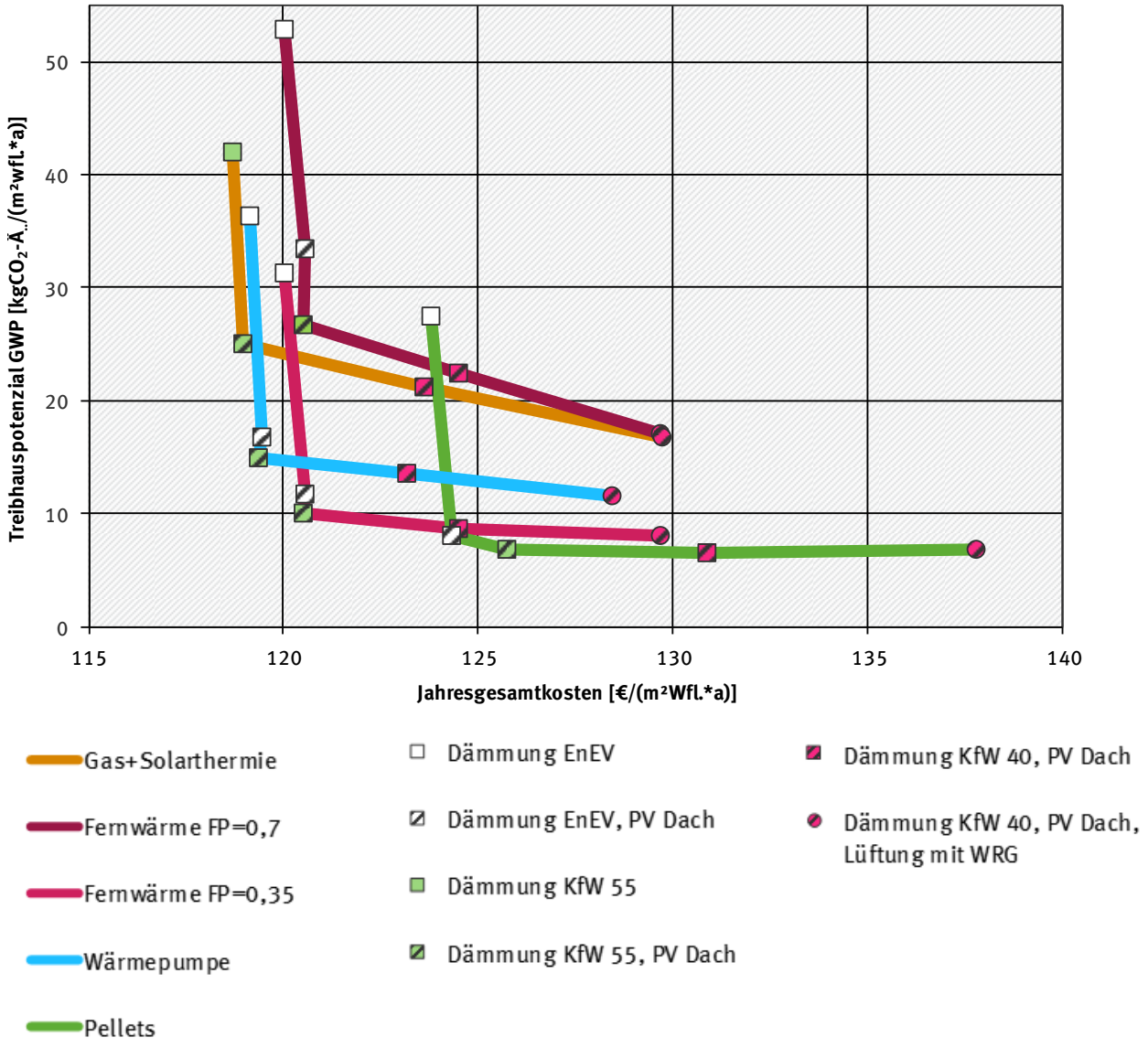
2.3.2 KEAne und GWP

Die CO_2-Emissionen (GWP) und die damit verbundenen Jahresgesamtkosten der untersuchten Variantenkombinationen sind in Abbildung 23 analog zum Mehrfamilienhaus dargestellt.

Die größten Unterschiede in Bezug auf die CO_2-Emissionen der Varianten sind auch im Einfamilienhaus auf die Art der Wärmeversorgung und den Anteil der dezentralen PV-Stromerzeugung in der Nutzungsphase zurückzuführen. Fast 50 % der CO_2-Emissionen (> 25 kgCO_2-Ä./($m^2_{Wfl.}$·a)) können durch eine regenerative Wärmeversorgung mit Holzpellets im Vergleich zu einer fossilen Versorgung durch Fernwärme eingespart werden. Auch im Einfamilienhausbereich befindet sich eine Wärmeversorgung mit Wärmepumpenvarianten im guten Mittelfeld und eine sehr gute Fernwärmeversorgung mit hohem regenerativen Anteil kann die niedrigen CO_2-Emissionen einer Wärmeversorgung über Holzpellets erreichen. Eine Photovoltaikanlage auf dem Gebäudedach kann beinahe kostenneutral weitere 20 kgCO_2-Ä./($m^2_{Wfl.}$·a) einsparen. In Abhängigkeit von der Wärmeversorgung variiert hier die

CO_2-Einsparung zwischen 35 – 70 %. Eine fast bei allen Wärmeversorgungsvarianten kostenneutrale Verbesserung der Gebäudehülle auf KfW 55- Standard wirkt sich je nach Energieträger mit einer weiteren Reduktion zwischen 10 – 20 % der CO_2-Emissionen (1 – 7 kgCO_2-Ä./(m²$_{Wfl.}$·a)) aus. Eine zusätzliche Verschärfung der Dämmung von KfW 55 auf KfW Effizienzhaus 40 führt im Einfamilienhaus aufgrund des hohen A/V-Verhältnisses zu einer weiteren CO_2-Einsparung von 5 – 15 % (0 – 4 kgCO_2-Ä./(m²$_{Wfl.}$·a)). Die Einsparung ist nur bei den fossil dominierten Wärmeversorgungsvarianten „Gas+Solar“ und „Fernwärme PE=0,7“sichtbar. Bei den Wärmeversorgungsvarianten mit Wärmepumpe, regenerativer Fernwärme und Holzpellets liegt die Einsparung bei > 1,5 kgCO_2-Ä./(m²$_{Wfl.}$·a). Eine Dämmung gemäß KfW Effizienzhaus 40 wird aufgrund des Kosten-/Nutzen-Verhältnisses daher nur bei einer fossilen Wärmeversorgung empfohlen. Die Integration einer Lüftung mit Wärmerückgewinnung wirkt sich aus energetischer Sicht ebenfalls nur bei fossilen Wärmeversorgungen mit CO_2-Einsparungen von bis zu 25 % (max. 5 kgCO_2-Ä./(m²$_{Wfl.}$·a)) positiv aus. Bei einer regenerativen Wärmeversorgung kann eine Lüftungsanlage mit WRG zu höheren CO_2-Emissionen führen.

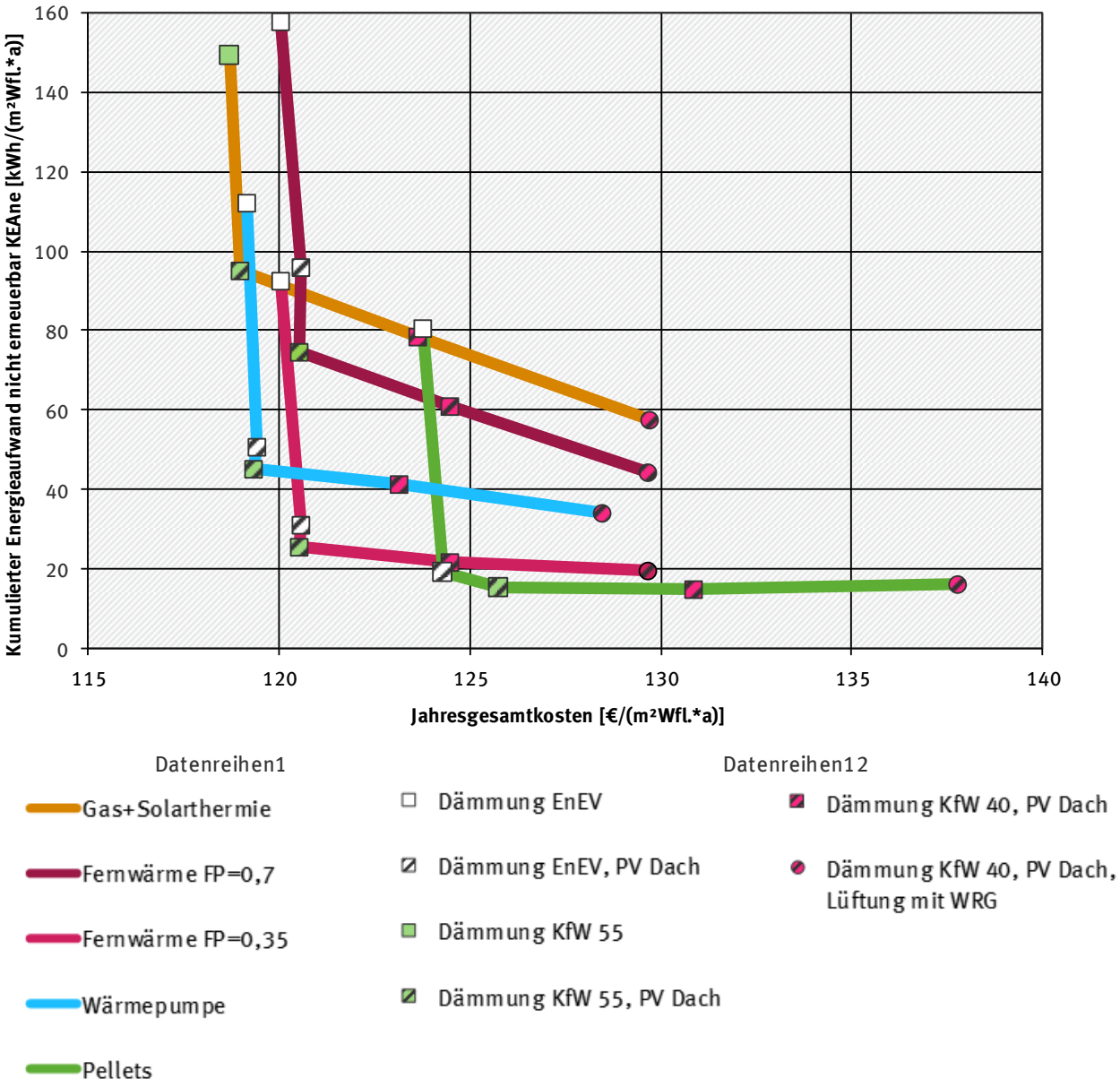
Abbildung 23: GWP/ Jahresgesamtkosten der Energiekonzepte Neubau EFH



Quelle: Eigene Berechnungen

Wie aus Abbildung 24 hervorgeht, korrelieren die Verbesserungen hinsichtlich CO_2-Emissionen und KEAne auch im Einfamilienhausbereich tendenziell. Auch hier bewirkt die unterschiedliche Bewertung des KEAne der Energieträger Erdgas und fossiler Fernwärme gegenüber der Bewertung von CO_2-Emissionen eine Verschiebung der Wärmeversorgungsvarianten. Die Varianten mit „Gas+Solarthermie“ schneiden in Bezug auf KEAne schlechter ab als die Varianten mit „Fernwärme f_P = 0,7“.

Abbildung 24: KEAne/ Jahresgesamtkosten der Energiekonzepte Neubau EFH

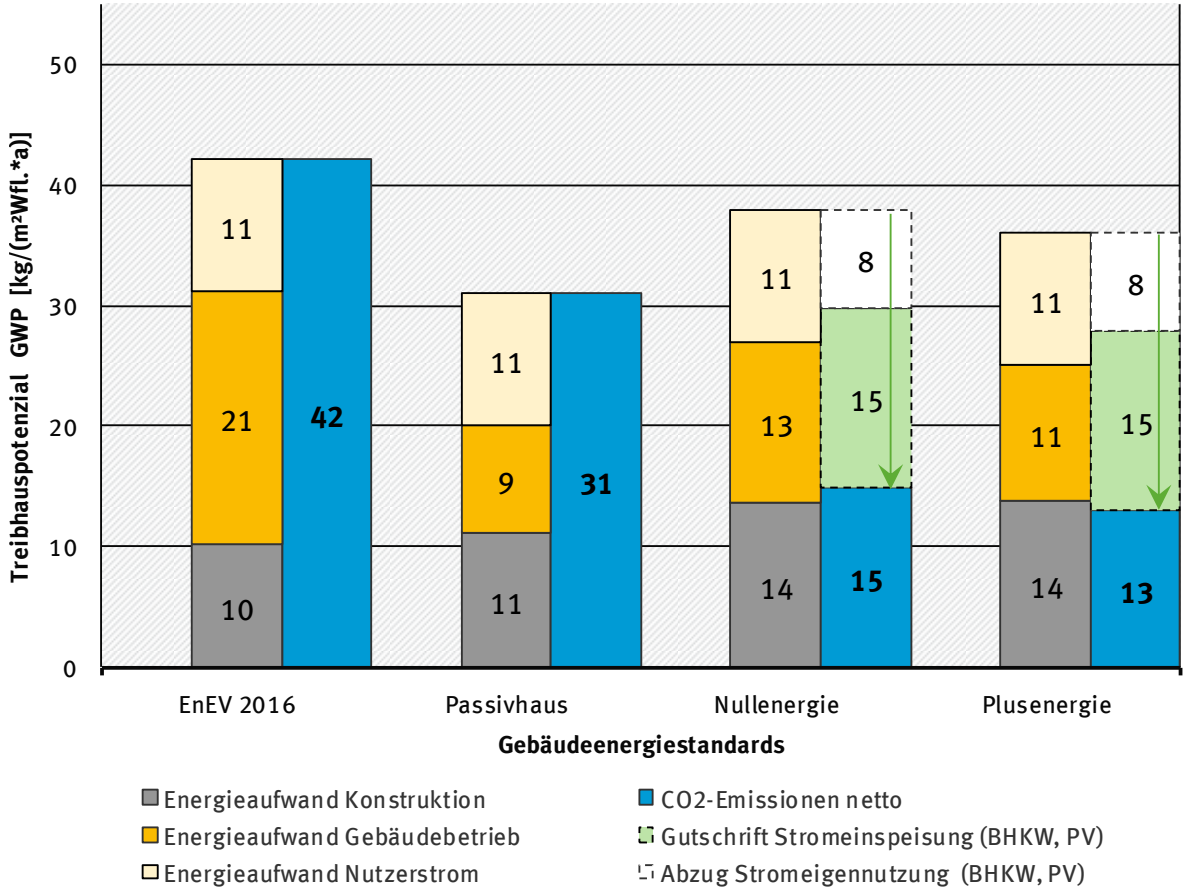


Quelle: Eigene Berechnungen

In Abbildung 25 sind die Bilanzen der CO_2-Emissionen im Lebenszyklus für die „üblichen Varianten“ der Gebäudeenergiestandards dargestellt. Auf die Gebäudekonstruktion entfallen insgesamt 10 – 14 kgCO_2-Ä./(m²$_{Wfl.}$·a). Beim EnEV-2016-Gebäude entfallen rund 25 % der CO_2-Emissionen auf die Konstruktion. Bei den Gebäuden im Passivhaus-, Null- und Plusenergiestandard beträgt der Konstruktionsanteil bedingt durch einen höheren technischen Aufwand rund 35 – 40 % der Emissionen. Beim Plusenergiegebäude führt auch im Einfamilienhaus die konsequente lokale Stromerzeugung zur

Kompensation der nutzungsbedingten CO_2-Emissionen, so dass bilanziell lediglich Emissionen im Umfang der Konstruktion verbleiben.

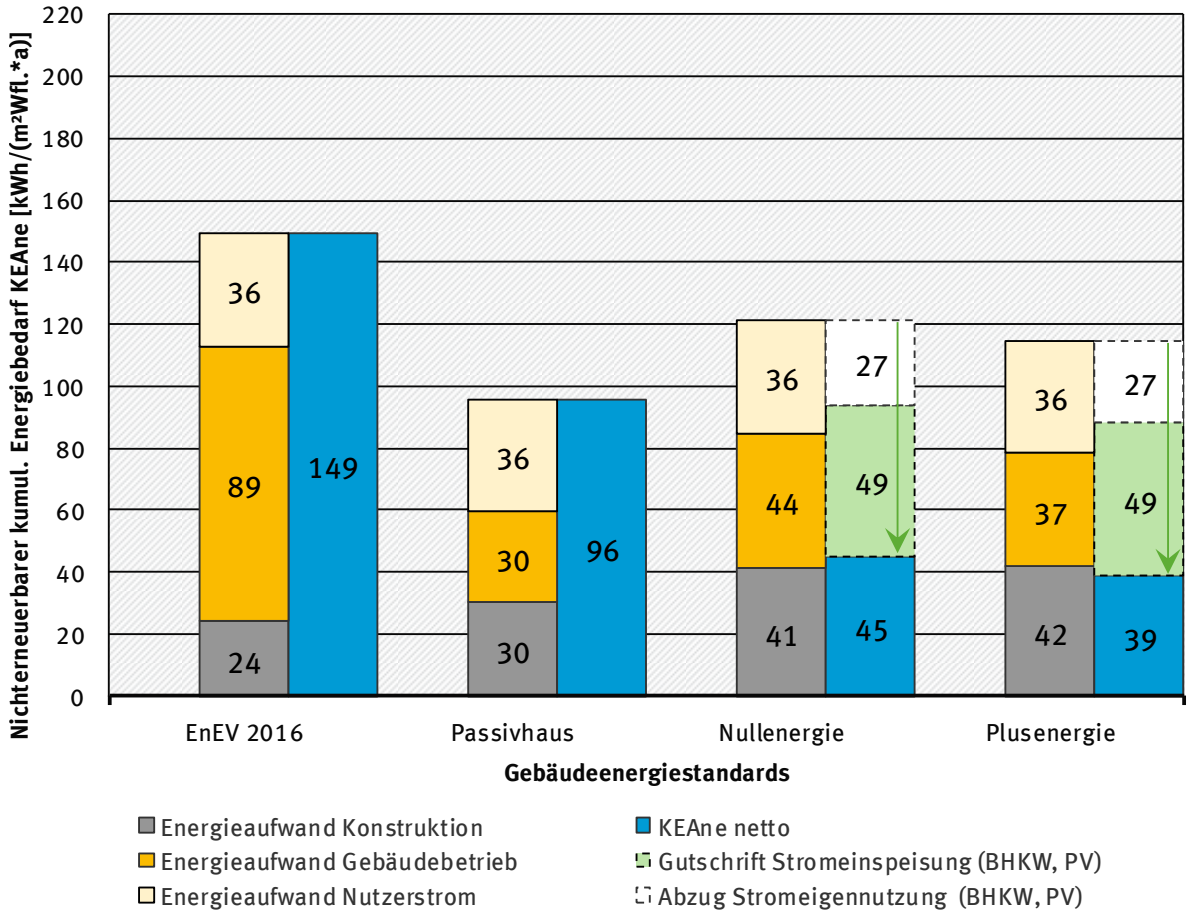
Abbildung 25: GWP der „üblichen Varianten“ Neubau EFH



Quelle: Eigene Berechnungen

In Abbildung 26 ist der KEAne im Lebenszyklus der „üblichen Varianten“ dargestellt. Auf die Gebäudekonstruktion entfallen insgesamt 24 – 42 kWh/($m^2_{Wfl.}$·a). Bei einem Einfamilienhaus im EnEV-2016 –Standard entfallen rund 15 % des KEAne auf die Konstruktion. Bei den Gebäuden im Passivhaus-, Null- und Plusenergiestandard beträgt der Konstruktionsanteil bedingt durch einen höheren technischen Aufwand rund 30 – 35 % des KEAne. Beim Plusenergiegebäude führt auch hier die konsequente lokale Stromerzeugung zur Kompensation des nutzungsbedingten KEAne, so dass bilanziell lediglich ein Energieaufwand im Umfang der Konstruktion verbleibt.

Abbildung 26: KEAne der „üblichen Varianten“ Neubau EFH

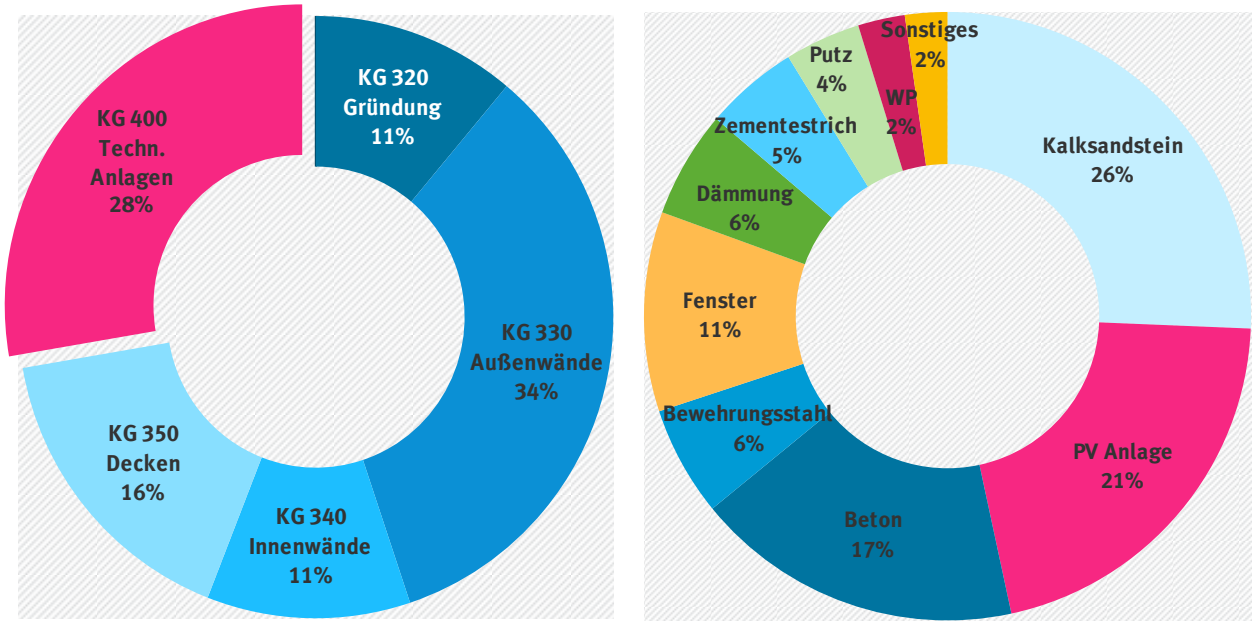


Quelle: Eigene Berechnungen

2.3.3 Analyse der Bauweisen

Betrachtet man die Herstellungsphase im Typgebäude Einfamilienhaus entfällt auch hier mit über 70 % der größte Anteil der CO_2-Emissionen auf die KG 300 Bauwerk, wie aus Abbildung 27 am Beispiel der Plusenergievariante hervorgeht. Materialseitig dominieren mit über 25 % Kalksandstein und mit 23 % Stahlbeton für die Gebäudekonstruktion, gefolgt von der Photovoltaikanlage mit 21 %. Die Kunststofffenster haben einen Anteil von 10 % an den CO_2-Emissionen und jeweils ca. 5 % entfallen auf Zementestrich und Gebäudedämmung. Mit einem Anteil von weniger als 5 % sind noch die Komponenten Putz (4 %) und Wärmepumpe (2 %) erwähnenswert. Die restlichen 2 % der CO_2-Emissionen entfallen auf Komponenten der Anlagentechnik wie Pufferspeicher, Wasserleitungen, Fußbodenheizung und zentrale Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung. Nicht abgebildet wurde anlagenseitig die Elektroverteilung, da diese bei allen Varianten gleich ist und erfahrungsgemäß einen vernachlässigbaren Anteil am Energieaufwand der Herstellphase hat.

Abbildung 27: Anteile GWP an Herstellung am Bsp. Neubau Einfamilienhaus Plusenergie



Quelle: Eigene Berechnungen Fraunhofer IBP auf Basis der ÖKOBAUDAT 2015

Für die „ökooptimierte Variante“ wird auch beim Einfamilienhaus eine alternative Ausführung in Holzbauweise gewählt. Außenwände, Dach, Decken und Innenwände werden in Holzständerbauweise errichtet und der nachwachsende Dämmstoff Zellulose gewählt. Der Fußboden gegen Erdreich bleibt auch bei der „ökooptimierten Variante“ massiv in Stahlbeton ausgeführt.

2.3.4 Ökooptimierte Varianten

Auf Basis der vorangegangenen Untersuchungen wurden analog zum Mehrfamilienhaus, ausgehend von den „üblichen Varianten“, die „ökooptimierten Varianten“ für das Einfamilienhaus gemäß Tabelle 28 abgeleitet.

Tabelle 28: „Ökooptimierte Varianten“ Neubau EFH

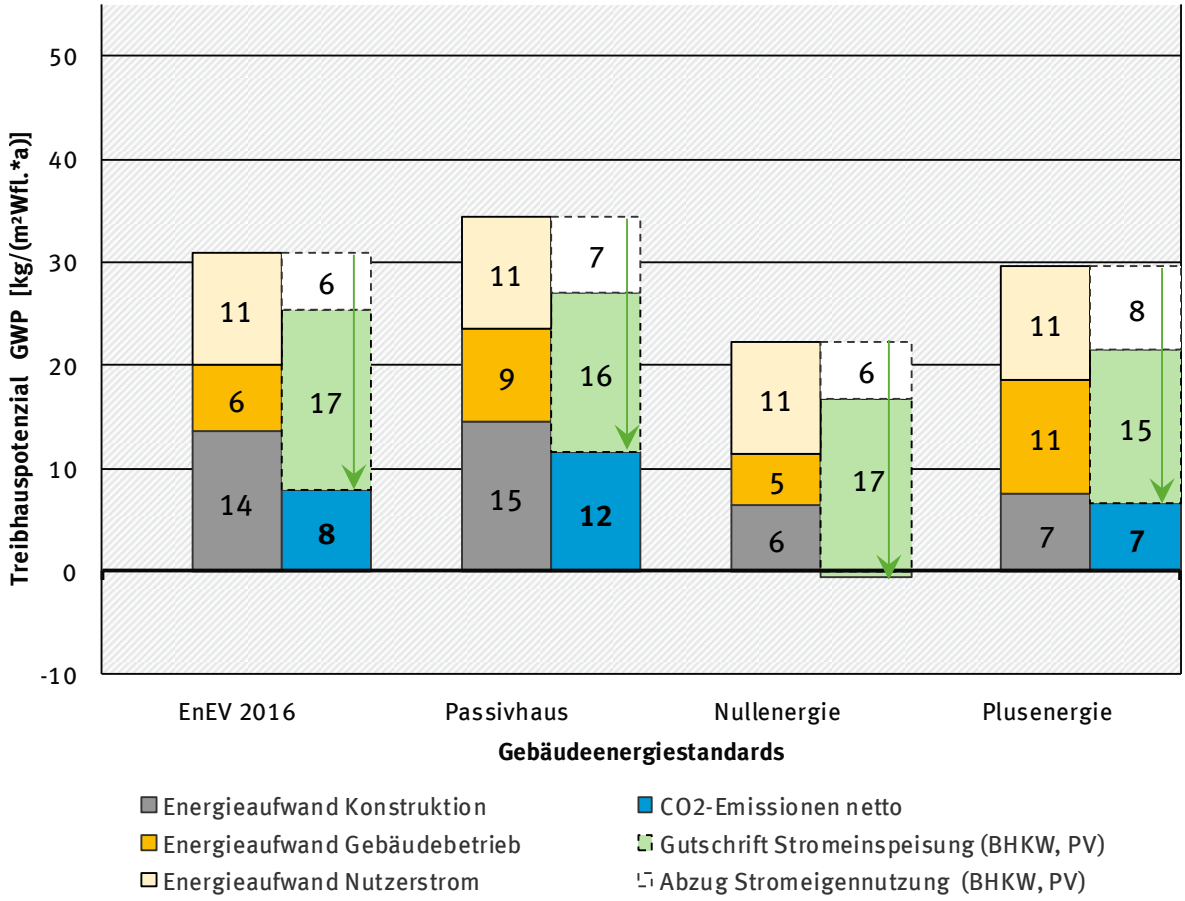
EnEV 2016	Passivhaus	Nullenergie	Plusenergie
Pellets	Wärmepumpe	Pellets	Wärmepumpe
EnEV 2016 (HT´)	KfW 40 (HT´)	KfW 55 (HT´)	KfW 55 (HT´)
Abluftanlage	Lüftung mit WRG	Abluftanlage	Lüftung mit WRG
PV Dach	PV Dach	PV Dach	PV Dach
Massivbauweise	Massivbauweise	Holzbauweise	Holzbauweise

Quelle: Steinbeis-Transferzentrum EGS

In Abbildung 28 sind die Bilanzen der CO_2-Emissionen im Lebenszyklus der „ökooptimierten Varianten“ dargestellt. Durch die Integration einer Photovoltaikanlage erhöht sich bei den ökooptimierten Gebäuden im EnEV-2016 und Passivhaus-Standard der Anteil Konstruktion auf rund 15 $kgCO_2$-Ä./($m^2_{Wfl.}$·a). Durch die Ausführung in Holzbauweise sinkt bei den ökooptimierten Gebäuden im Null- und Plusenergie-Standard der Konstruktionsanteil auf 6 - 7 $kgCO_2$-Ä./($m^2_{Wfl.}$·a). Durch die großen Photovoltaikanlagen und die regenerative Wärmeversorgung verbleiben bilanziell nur noch

CO_2-Emissionsmengen für die Konstruktion. Beim Nullenergiegebäude sind CO_2-Emissionen > 0 kgCO_2-Ä./(m²$_{Wfl.}$·a) erreichbar.

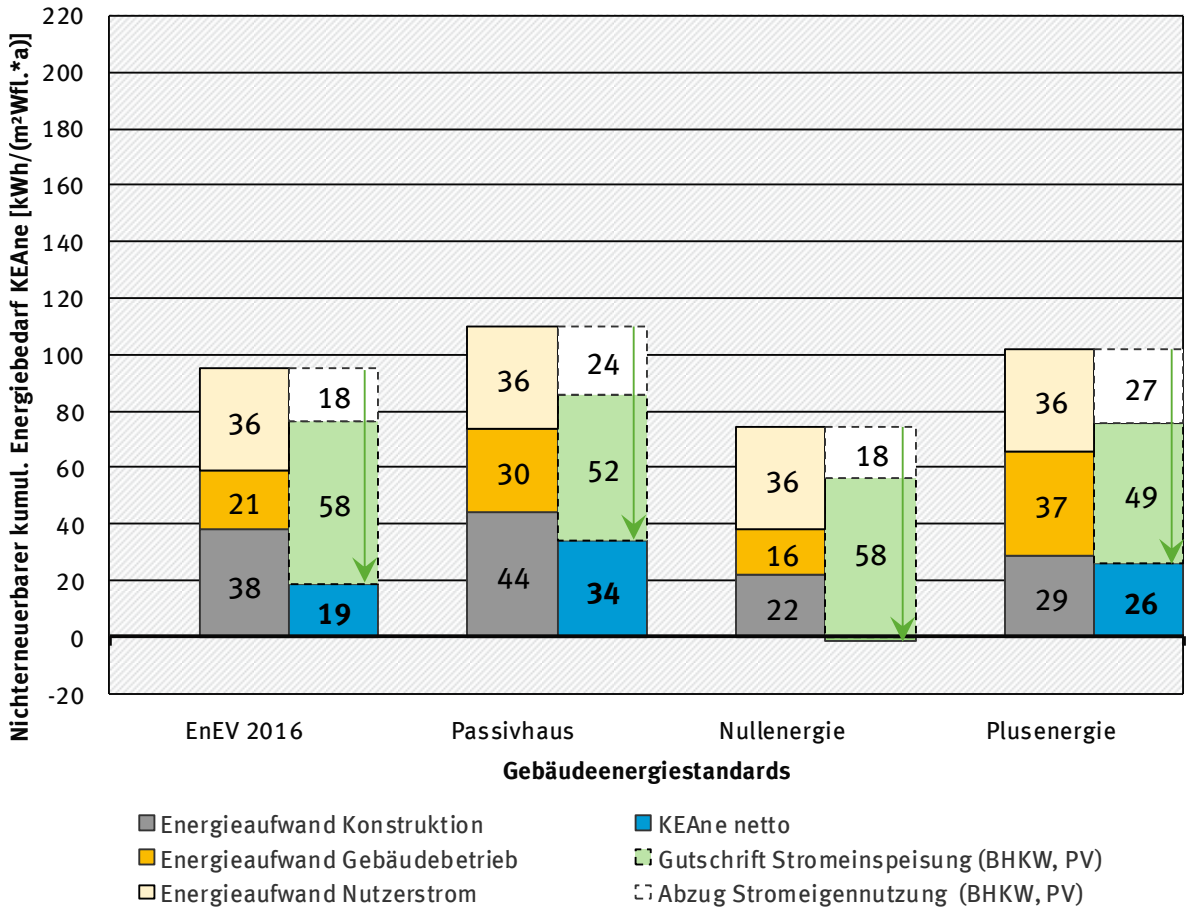
Abbildung 28: GWP der „ökooptimierten Varianten“ Neubau EFH



Quelle: Eigene Berechnungen

In Abbildung 29 wird der KEAne im Lebenszyklus der „ökooptimierten Varianten“ ausgewiesen. Durch die Integration einer Photovoltaikanlage erhöht sich bei den ökooptimierten Gebäuden im EnEV-2016 und Passivhaus-Standard der Anteil Konstruktion auf 38 – 44 kWh/(m²$_{Wfl.}$·a). Durch die Ausführung in Holzbauweise sinkt bei den ökooptimierten Gebäuden im Nullenergie- und Plusenergie-Standard der Konstruktionsanteil auf 22 – 39 kWh/(m²$_{Wfl.}$·a). Auch hier verbleibt bilanziell nur verbleiben bilanziell nur noch KEAne für die Konstruktion. Beim Nullenergiegebäude sind KEAne > 0 kWh/(m²$_{Wfl.}$·a) erreichbar.

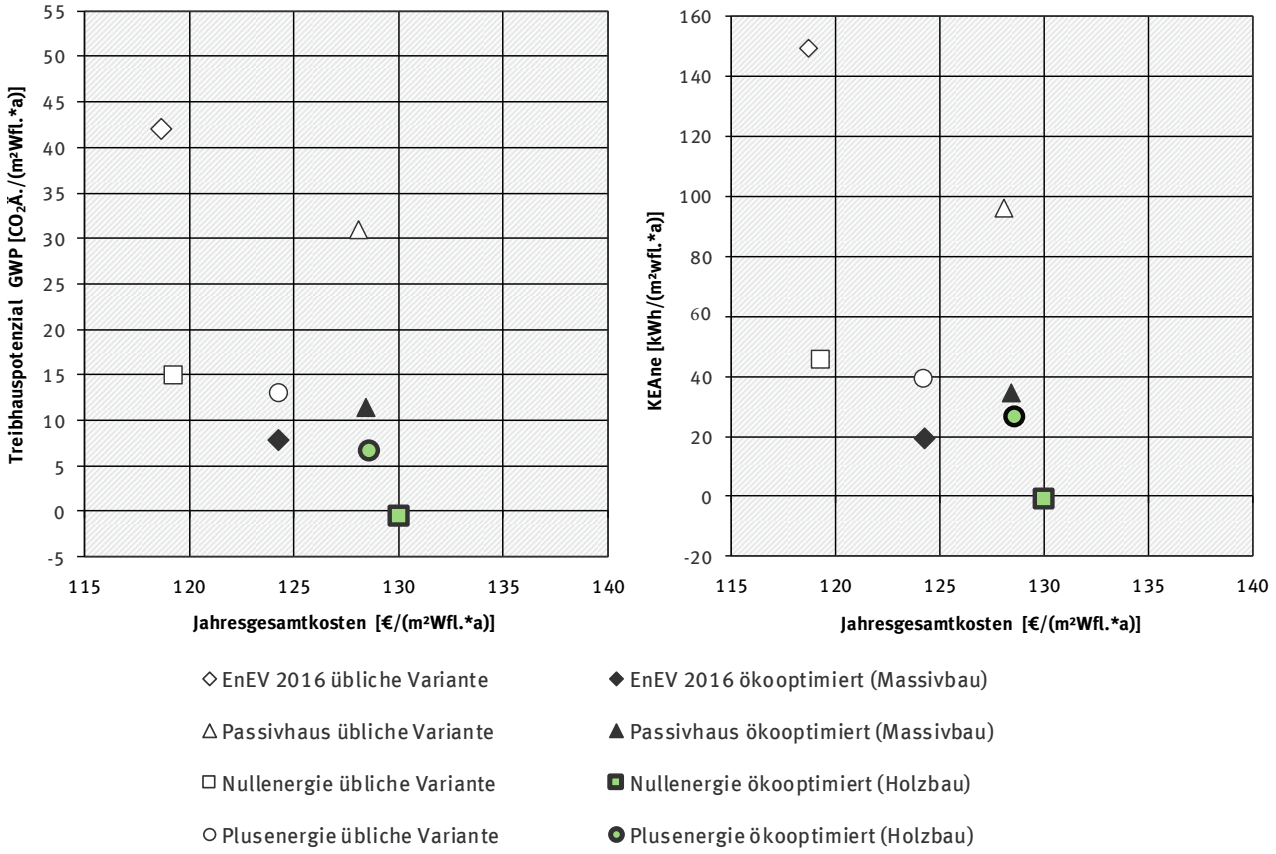
Abbildung 29: KEAne der „ökooptimierten Varianten“ Neubau EFH



Quelle: Eigene Berechnungen

Abbildung 30 zeigt zusammenfassend eine Gegenüberstellung der „üblichen“ und „ökooptimierten“ Varianten je Gebäudeenergiestandard für das Einfamilienhaus gemäß Tabelle 25 und Tabelle 28. Die ökooptimierten Varianten im EnEV-2016 und Passivhaus-Standard erreichen mit ca. 10 kgCO_2-Ä./(m²$_{Wfl.}$·a) bzw. 20 - 35 kWh/(m²$_{Wfl.}$·a) niedrigere Werte als das Plusenergiegebäude. Dies ist auf den Energieträger Biomasse bzw. beim Passivhaus auf die verbesserte Dämmung gemäß KfW Effizienzhaus 40 zurückzuführen. Die Jahresgesamtkosten sind ähnlich bzw. erhöhen sich beim ökooptimierten Passivhaus um 4 %. Durch eine alternative Ausführung von Null- oder Plusenergiegebäuden in Holzbauweise erhöhen sich die Jahresgesamtkosten um 3 %. Mit einem ökooptimierten Nullenergiegebäude kann eine Klimaneutralität mit CO_2-Emissionen und KEAne < 0 erreicht werden. Durch eine Ausführung des Neubau Einfamilienhauses in Holzbau- statt Massivbauweise lassen sich über 6 kgCO_2-A./(m²$_{Wfl.}$·a) oder 43 t CO_2-Emissionen im gesamten Lebenszyklus einsparen.

Abbildung 30: GWP/ JGK und KEAne/ JGK Neubauvarianten EFH



Quelle: Eigene Berechnungen

3 Energiekonzepte Bestandssanierung

3.1 Variantenauswahl

Die Auswahl der „üblichen Varianten“ in der Bestandssanierung erfolgte analog zur Vorgehensweise im Neubau. Im Jahr 2015 wurden Maßnahmen an 237.000 Wohnungen gefördert. Diese umfassen Einzelmaßnahmen bis hin zu Gesamtpaketen zu Erreichung eines KfW Effizienzhausstandards 55 bis 115 und das KfW Effizienzhaus Denkmal.

Wurde in der Bestandssanierung ein neuer Wärmeerzeuger eingebaut, so handelt es sich bei 85 % um fossil dominierte Wärmeversorgung durch Gas und Öl. Auf EnEV-Neubauniveau sanierte Wohngebäude wurden noch immer zu über 50 % durch Gaskessel beheizt. Sanierte KfW Effizienzhäuser 55 wurden je zu rund 40 % durch Biomassekessel und Wärmepumpen mit Wärme versorgt. Laut Passivhaus-Datenbank werden sanierte Wohngebäude im Passivhausstandard meist über ein BHKW beheizt. Im Einfamilienhausbereich dominiert auch hier die Wärmepumpe.

65 % der geförderten Effizienzhäuser wurden ohne Solaranlage ausgestattet. Wurden Solaranlagen im Bestand installiert, handelt es sich zumeist um Solarthermie-Anlagen. Fast die Hälfte der auf EnEV-Neubauniveau sanierten Gebäude haben eine Solarthermie-Anlage. Bei 13 % der geförderten Gebäude wurde eine Photovoltaikanlage installiert. Bei einer Sanierung eines Gebäudes auf KfW Effizienzhaus 55 steigt der Anteil an Photovoltaikanlagen auf 30 %.

3.2 Sanierung MFH E

3.2.1 Untersuchte Varianten

Tabelle 29 zeigt die Matrix aller untersuchten Maßnahmenkombinationen für die Sanierung des „MFH E“. Die ausgewählten „üblichen Varianten“ sind durch eine schwarze Umrandung hervorgehoben.

Tabelle 29: Variantenmatrix Energiekonzepte Sanierung MFH E

Therm. Qualität Gebäude-hülle	Lüftungsart	ohne PV						mit PV Flachdach (50%)					
		Gas + Solar	Fernwärme fPE=0,70	Fernwärme fPE=0,35	Pellets	Wärmepumpe	BHKW+Gas	Gas + Solar	Fernwärme fPE=0,70	Fernwärme fPE=0,35	Pellets	Wärmepumpe	BHKW+Gas
EnEV 2016	Abluft		EnEV	EnEV	EnEV	EnEV	EnEV		EnEV	Null	Null	Null	Null
KfW 55	Abluft	EnEV	EnEV	EnEV	EnEV	EnEV	EnEV	EnEV	Null	Null	Null	Null	Null
KfW 40	Abluft	EnEV	EnEV	EnEV	EnEV	EnEV	EnEV	EnEV	Null	Null	Null	Null	Null
EnEV 2016	Lüftung m WRG		EnEV	EnEV	EnEV	EnEV	EnEV	EnEV	Null	Null	Null	Null	Null
KfW 55	Lüftung m WRG	Passiv	Passiv	Passiv	Passiv	Passiv	Passiv	Passiv	Null	Null	Null	Null	Null
KfW 40	Lüftung m WRG	Passiv	Passiv	Passiv	Passiv	Passiv	Passiv	Null	Null	Null	Null	Null	Null

Die ausgewählten „üblichen Varianten“ sind durch eine schwarze Umrandung hervorgehoben.
Quelle: Eigene Berechnungen Steinbeis-Transferzentrum EGS auf Basis DIN V 18599

In Tabelle 30 sind die Technikkomponenten der „üblichen Variante“ zur Erreichung der jeweiligen Gebäudeenergiestandards für das sanierte Typgebäude „MFH E“ zusammengefasst.

Tabelle 30: „Übliche Varianten“ Sanierung MFH E

EnEV 2016	Passivhaus	Nullenergie
Gas + Solarthermie	BHKW	Pellets
KfW 55 (HT´)	KfW 55 (HT´)	KfW 55 (HT´)
Abluftanlage	Lüftung mit WRG	Abluftanlage
ohne PV	ohne PV	PV Dach

Quelle: Steinbeis-Transferzentrum EGS, Statistisches Bundesamt 2015, Diefenbach 2016, Passivhaus-Datenbank 2017

Die Jahresgesamtkosten der Sanierungsvarianten bezogen auf die kostengünstigste Variante sind in Tabelle 31 aufgeführt. Die Sanierungsvarianten erreichen gegenüber Neubauvarianten eine größere Mehrkostenspanne von bis zu 26 %. Im Unterschied zu einem Neubau ist eine Wärmeversorgung mit Wärmepumpe im Bestand mit 11 % Mehrkosten verbunden und die mit Abstand kostenintensivste Lösung. Dies ist vor allem auf die Mehrkosten für die Wärmeübergabe und die geringere Effizienz im Vergleich zum Neubau zurückzuführen. Alle weiteren Wärmeversorgungsvarianten in Kombination mit Abluftanlagen und Wärmedämmstandards EnEV-2016 bis KfW Effizienzhaus 55 bewegen sich innerhalb von 0–5 % Jahresgesamtmehrkosten. Eine Photovoltaikanlage auf dem Gebäudedach führt, am deutlichsten bei den Wärmepumpenvarianten, zu Minderkosten von 1 – 2 %. Ein deutlicher Kostensprung von 9 % ist durch die nachträgliche Integration einer Lüftungsanlage mit WRG verbunden. Eine weitere Effizienzmaßnahme durch die Verschärfung der Dämmung von KfW Effizienzhaus 55 auf KfW Effizienzhaus 40 ist in der Bestandssanierung mit einem Kostensprung von etwa 6 % verbunden.

Nur beim Passivhausstandard entspricht die „übliche Variante“ der kostengünstigsten Ausführung.

Tabelle 31: Jahresgesamtkosten Sanierung MFH E (ohne Energiekostensteigerung)

Therm. Qualität Gebäude-hülle	Lüftungsart	ohne PV					mit PV Dach (50%)				
		Gas + Solar	Fernwärme	Pellets	Wärmepumpe	BHKW+Gas	Gas + Solar	Fernwärme	Pellets	Wärmepumpe	BHKW+Gas
EnEV 2016	Abluft		105%	103%	111%	100%		104%	102%	109%	101%
KfW 55	Abluft	103%	105%	105%	112%	101%	102%	105%	104%	110%	102%
KfW 40	Abluft	109%	111%	111%	117%	107%	108%	110%	110%	115%	108%
EnEV 2016	Lüftung m WRG	111%	113%	111%	119%	108%	109%	112%	110%	117%	109%
KfW 55	Lüftung m WRG	114%	115%	115%	121%	111%	112%	113%	114%	119%	112%
KfW 40	Lüftung m WRG	119%	120%	121%	126%	117%	118%	119%	119%	124%	117%

Die ausgewählten „üblichen Varianten“ sind durch eine schwarze Umrandung hervorgehoben.
Quelle: Eigene Berechnungen Steinbeis-Transferzentrum EGS

Eine Preissteigerung von 2 % auf alle Energieträger wirkt sich vor allem für Varianten mit Eigenstromerzeugung durch Photovoltaik oder BHKW und Eigenstromnutzung über Wärmepumpen und Lüftungsanlagen kostensenkend aus. In der Gesamtbetrachtung sind diese Unterschiede jedoch marginal und die Hauptaussagen ändern sich gegenüber einer Betrachtung ohne Preissteigerung nicht. In den folgenden Auswertungen werden die Jahresgesamtkosten daher ohne Energiepreissteigerung dargestellt.

Tabelle 32: Jahresgesamtkosten Sanierung MFH E (2 % Energiepreissteigerung)

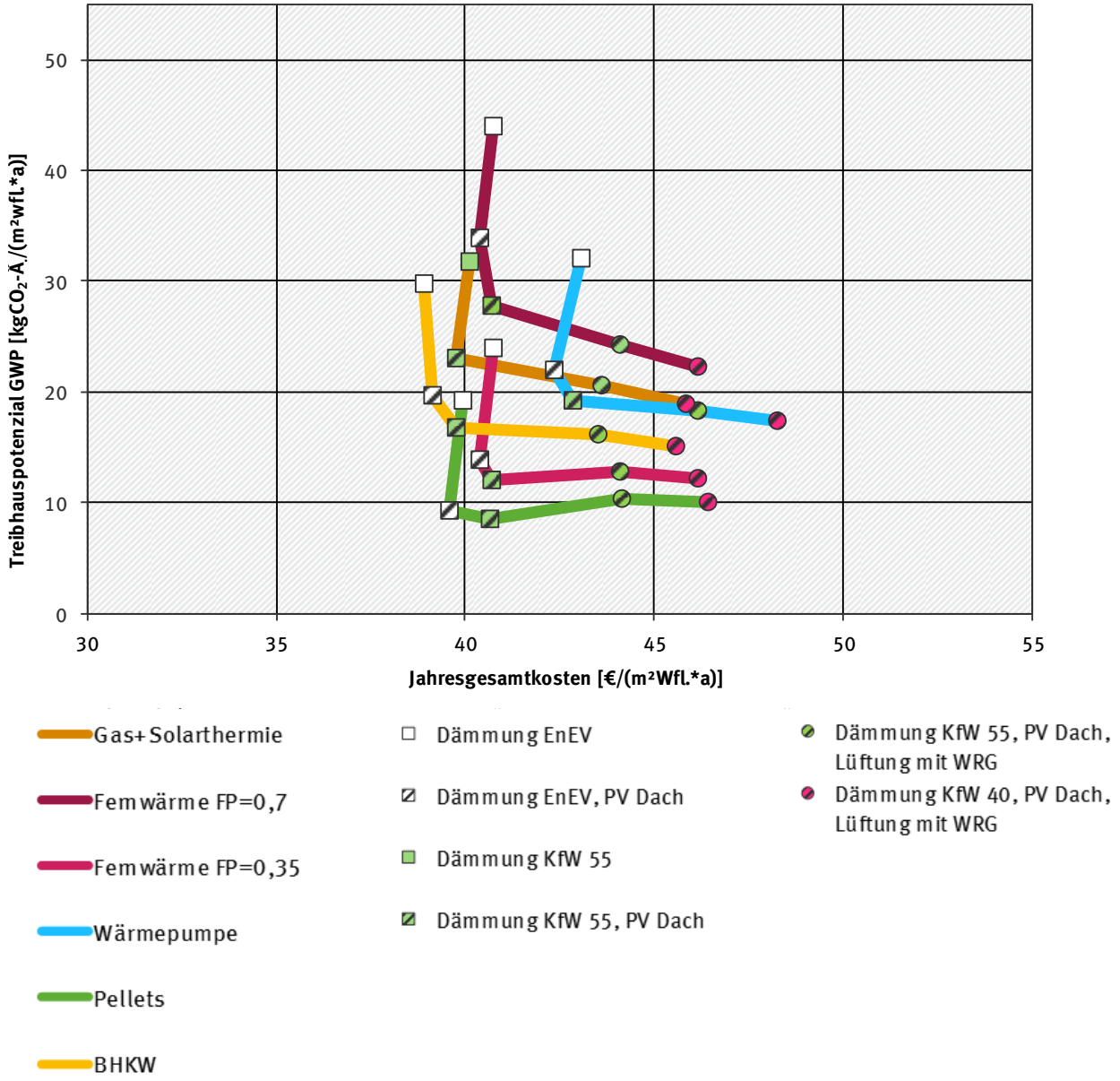
Therm. Qualität Gebäude-hülle	Lüftungsart	ohne PV					mit PV Dach (50%)				
		Gas + Solar	Fernwärme	Pellets	Wärmepumpe	BHKW+Gas	Gas + Solar	Fernwärme	Pellets	Wärmepumpe	BHKW+Gas
EnEV 2016	Abluft		108%	104%	112%	100%		105%	101%	108%	100%
KfW 55	Abluft	103%	107%	105%	113%	100%	101%	104%	103%	109%	100%
KfW 40	Abluft	108%	111%	111%	117%	105%	106%	109%	108%	113%	106%
EnEV 2016	Lüftung m WRG	111%	114%	112%	120%	107%	108%	111%	109%	116%	106%
KfW 55	Lüftung m WRG	113%	115%	114%	120%	109%	110%	112%	111%	116%	109%
KfW 40	Lüftung m WRG	118%	120%	119%	125%	114%	115%	116%	116%	121%	113%

Die ausgewählten „üblichen Varianten“ sind durch eine schwarze Umrandung hervorgehoben.
Quelle: Eigene Berechnungen Steinbeis-Transferzentrum EGS

3.2.2 KEAne und GWP

Die Unterschiede in Bezug auf die CO_2-Emissionen der Energiekonzepte sind im Bestand fast ausschließlich auf die Nutzungsphase zurückzuführen (s. Abbildung 31). Ausgehend von einer Sanierung der Gebäudehülle auf EnEV-2016-Neubauniveau hat die Art der Wärmeversorgung auch hier den größten Einfluss auf die CO_2-Emissionen. Durch eine regenerative Wärmeversorgung mit Holzpellets im Vergleich zu einer fossilen Fernwärmeversorgung sind 55 % CO_2-Einsparungen (25 kgCO_2-Ä./(m²$_{Wfl.}$·a)) möglich. Im Vergleich zu einem Neubau stehen die Wärmepumpenvarianten energetisch schlechter da und haben nur vergleichbar geringere CO_2-Emissionen als eine Wärmeversorgung über Gaskessel und Solarthermie. Eine Wärmeversorgung mit BHKW verbessert die CO_2-Bilanz und befindet sich im guten Mittelfeld. Bedingt durch das geringere nutzbare Solarpotenzial auf dem Bestandsdach belaufen sich die Einsparungen durch Photovoltaik im „MFH E“ auf nur 10 kgCO_2-Ä./(m²$_{Wfl.}$·a). In Abhängigkeit von der Wärmeversorgung variieren hier die prozentualen CO_2-Einsparungen zwischen 25 – 50 %. Da ein Großteil des erzeugten Stroms im Gebäude selbst direkt genutzt wird, ist die Integration einer PV-Anlage, mit Ausnahme einer Wärmeversorgung mit BHKW, kostensenkend. Eine Verbesserung der Gebäudehülle gemäß KfW Effizienzhaus 55 wirkt sich je nach Energieträger mit einer weiteren Einsparung zwischen 5 – 20 % (1 – 6 kgCO_2-Ä./(m²$_{Wfl.}$·a)) aus. Die Integration einer Lüftung mit WRG (max. 13 % CO_2-Einsparung bzw. 3 kgCO_2-Ä./(m²$_{Wfl.}$·a)) und eine zusätzliche Verschärfung der Dämmung gemäß KfW Effizienzhaus 40 (max. 8 % CO_2-Einsparung bzw. 2 kgCO_2-Ä./(m²$_{Wfl.}$·a)) wirken sich analog zum Neubau Mehrfamilienhaus aus energetischer Sicht nur bei fossil dominierter Versorgung positiv aus. Bei einer regenerativen Wärmeversorgung führt eine Lüftungsanlage mit WRG auch hier zu höheren CO_2-Emissionen. Eine zusätzliche verbesserte Dämmung von KfW Effizienzhaus 55 auf KfW Effizienzhaus 40 ist im Bestand oft mit größeren baulichen Maßnahmen verbunden und aufgrund des schlechten Kosten-/Nutzen-Verhältnis nicht zu empfehlen.

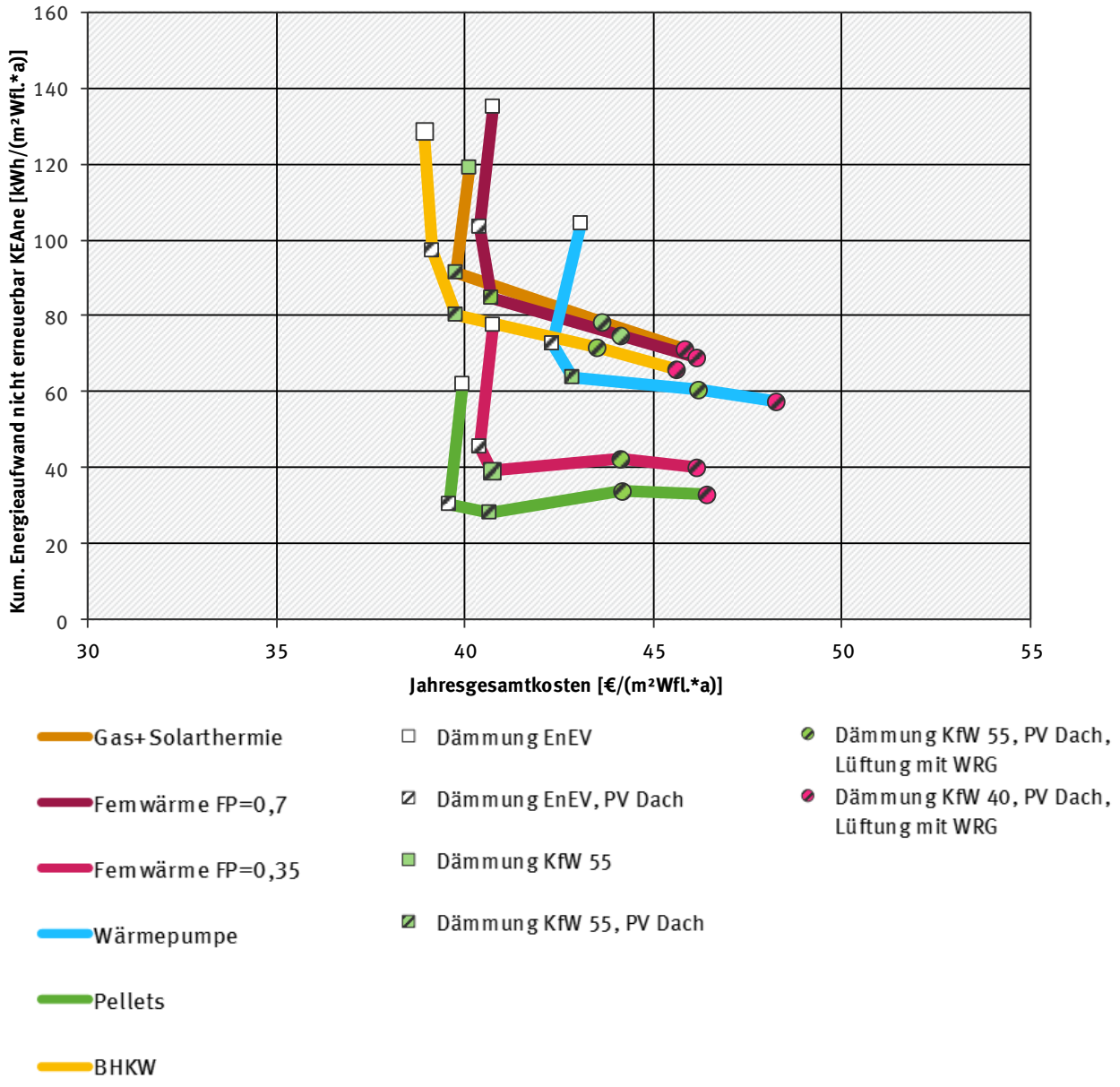
Abbildung 31: GWP/ Jahresgesamtkosten Energiekonzepte Sanierung MFH E



Quelle: Eigene Berechnungen

Die Verbesserungen hinsichtlich CO_2-Emissionen und KEAne korrelieren tendenziell wie aus Abbildung 32 ersichtlich ist. Lediglich die Bewertung der Wärmeversorgungsvarianten untereinander unterscheidet sich. In der Bewertung hinsichtlich KEAne liegen die Wärmeversorgungsvarianten „Fernwärme $f_P = 0{,}7$“, „Gas+Solarthermie“ und „BHKW“ nahe beieinander. Die Wärmeversorgungsvarianten mit Wärmepumpen werden etwas besser bewertet und liegen im unteren Mittelfeld. Die regenerativ dominierten Varianten „Fernwärme $f_P = 0{,}35$“ und „Pellets“ haben analog zur Bewertung der CO_2-Emissionen mit Abstand den geringsten KEAne.

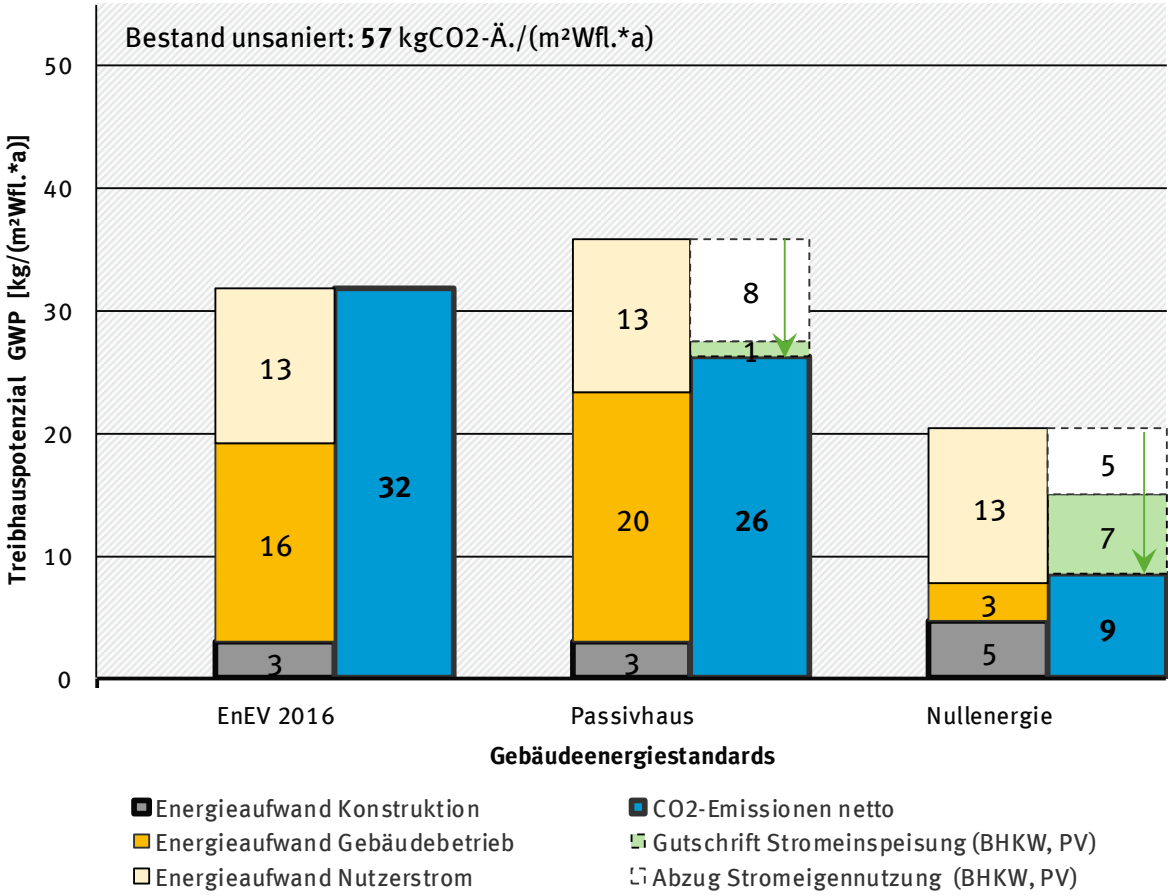
Abbildung 32: KEAne/ Jahresgesamtkosten der Energiekonzepte Sanierung MFH E



Quelle: Eigene Berechnungen

Die Aufteilung der CO_2-Emissionen der „üblichen Varianten“ für die Sanierung des „MFH E“ sind in Abbildung 33 dargestellt. Auf die Gebäudekonstruktion entfallen insgesamt nur 3 – 5 kgCO_2-Ä./(m²$_{Wfl.}$·a). Im Gegensatz zum Neubau ist die Bestandskonstruktion vorhanden und es fallen nur CO_2-Emissionen für neue Fenster, eine nachträgliche Dämmung und eine neue Anlagetechnik an. Bei sanierten Gebäuden im EnEV-2016 und Passivhaus-Standard entfallen weniger als 10 % der CO_2-Emissionen auf die Konstruktion. Bei einem üblichen sanierten Nullenergiegebäude steigt der Konstruktionsanteil durch die lokale Stromerzeugung auf über 20 % der CO_2-Emissionen an.

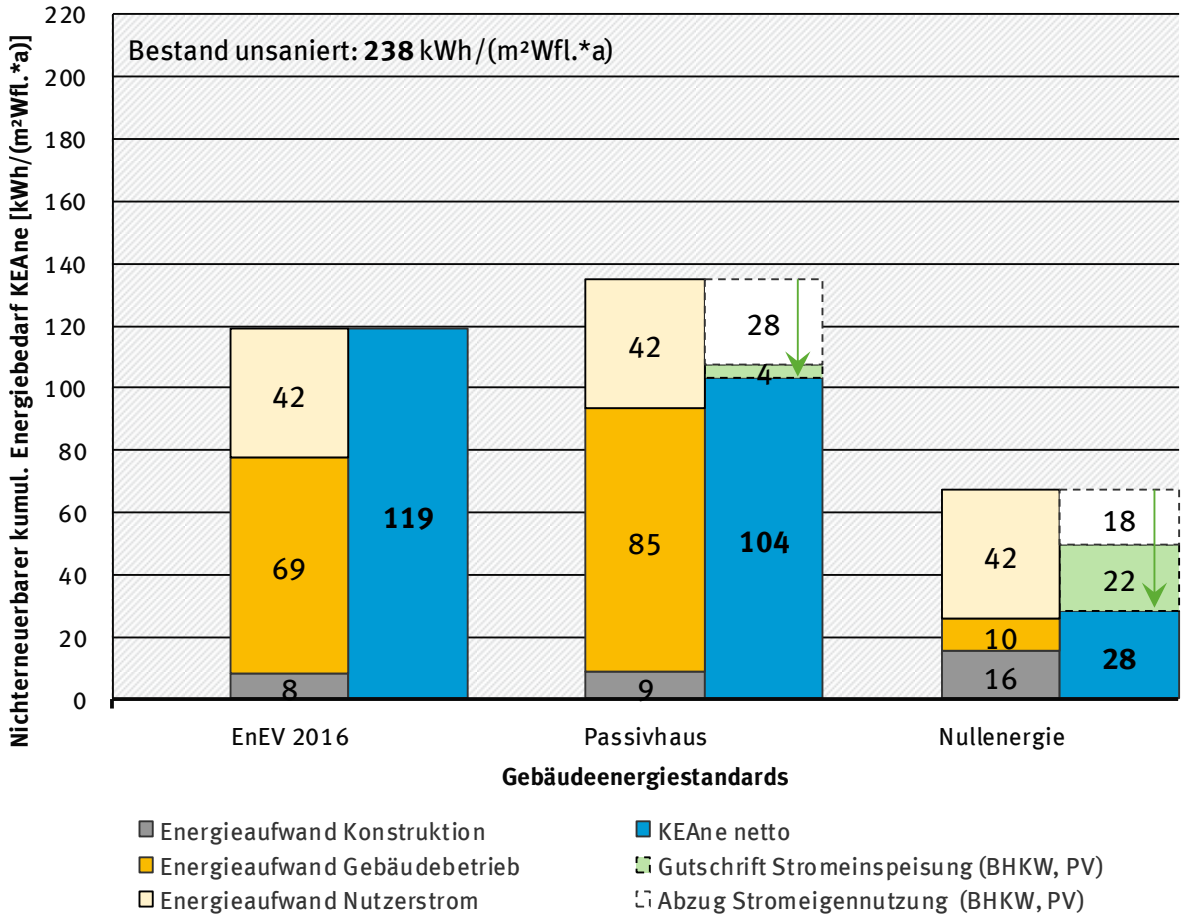
Abbildung 33: GWP der „üblichen Varianten“ Sanierung MFH E



Quelle: Eigene Berechnungen

Abbildung 34 zeigt den KEAne im Lebenszyklus der „üblichen Varianten“. Auf die Gebäudekonstruktion entfallen insgesamt nur 8 – 16 kWh/(m²$_{Wfl.}$·a). Dies entspricht einem Anteil für die Konstruktion bei Gebäuden im EnEV-2016 und Passivhaus-Standard von weniger als 10 % Beim üblichen Nullenergiegebäude steigt der Konstruktionsanteil auf über 20 % des KEAne.

Abbildung 34: KEAne der „üblichen Varianten“ Sanierung MFH E



Quelle: Eigene Berechnungen

3.2.3 Ökooptimierte Varianten

Im Bestand werden auf Basis der vorangegangenen Analyse der Nutzungsphase ausgehend von den „üblichen Varianten“ die „ökooptimierten Varianten“ gemäß Tabelle 33 abgeleitet. Das üblicherweise ausgeführte Nullenergiekonzept entspricht im Bestand bereits der bestmöglichen „ökooptimierten“ Ausführung.

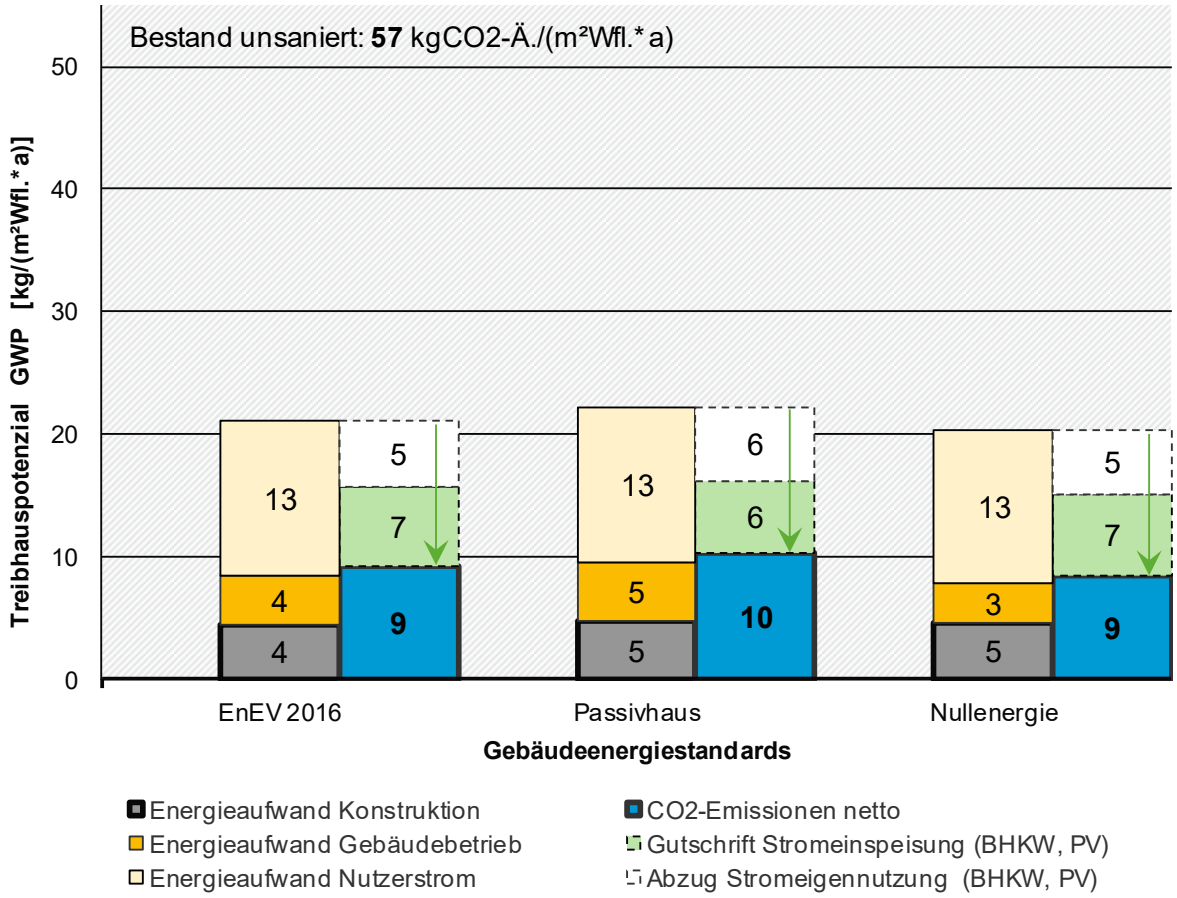
Tabelle 33: „Ökooptimierte Varianten“ Sanierung MFH E

EnEV 2016	Passivhaus	Nullenergie
Pellets	Pellets	Pellets
EnEV 2016 (HT´)	KfW 55 (HT´)	KfW 55 (HT´)
Abluftanlage	Lüftung mit WRG	Abluftanlage
PV Dach	PV Dach	PV Dach

Quelle: Steinbeis-Transferzentrum EGS

In Abbildung 35 sind die Bilanzen der CO_2-Emissionen im Lebenszyklus der „ökooptimierten Varianten“ dargestellt. Auf die Gebäudekonstruktion entfallen hier insgesamt nur 4 – 5 $kgCO_2/(m^2_{Wfl.} \cdot a)$. Dies entspricht einem Anteil von etwa 20 % der CO_2-Emissionen für die Konstruktion.

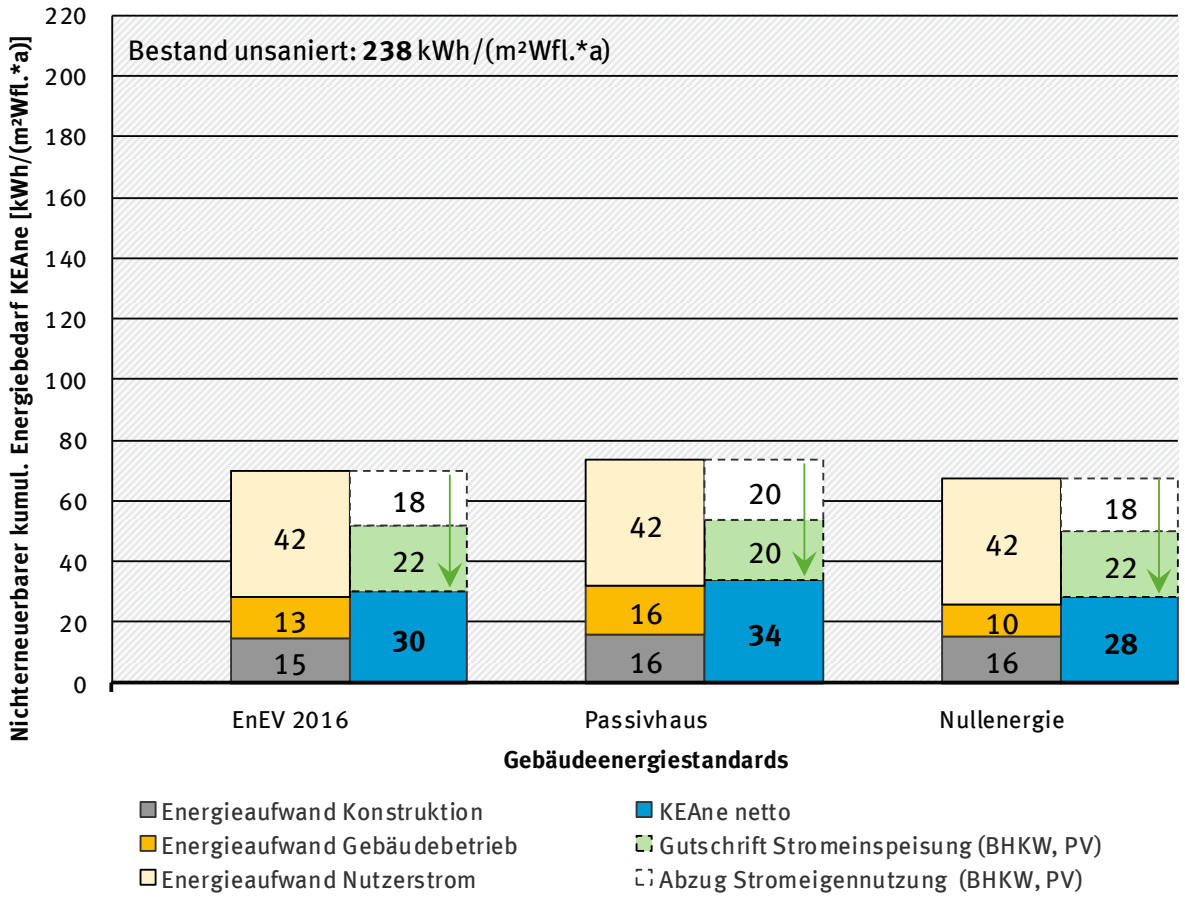
Abbildung 35: GWP der „ökooptimierten Varianten“ Sanierung MFH E



Quelle: Eigene Berechnungen

In Abbildung 36 wird der KEAne im Lebenszyklus der „ökooptimierten Varianten“ ausgewiesen. Der Anteil Konstruktion liegt bei 15 – 16 kWh/(m²$_{Wfl.}$·a). Dies entspricht einem Anteil von etwa 20 % des KEAne für die Konstruktion.

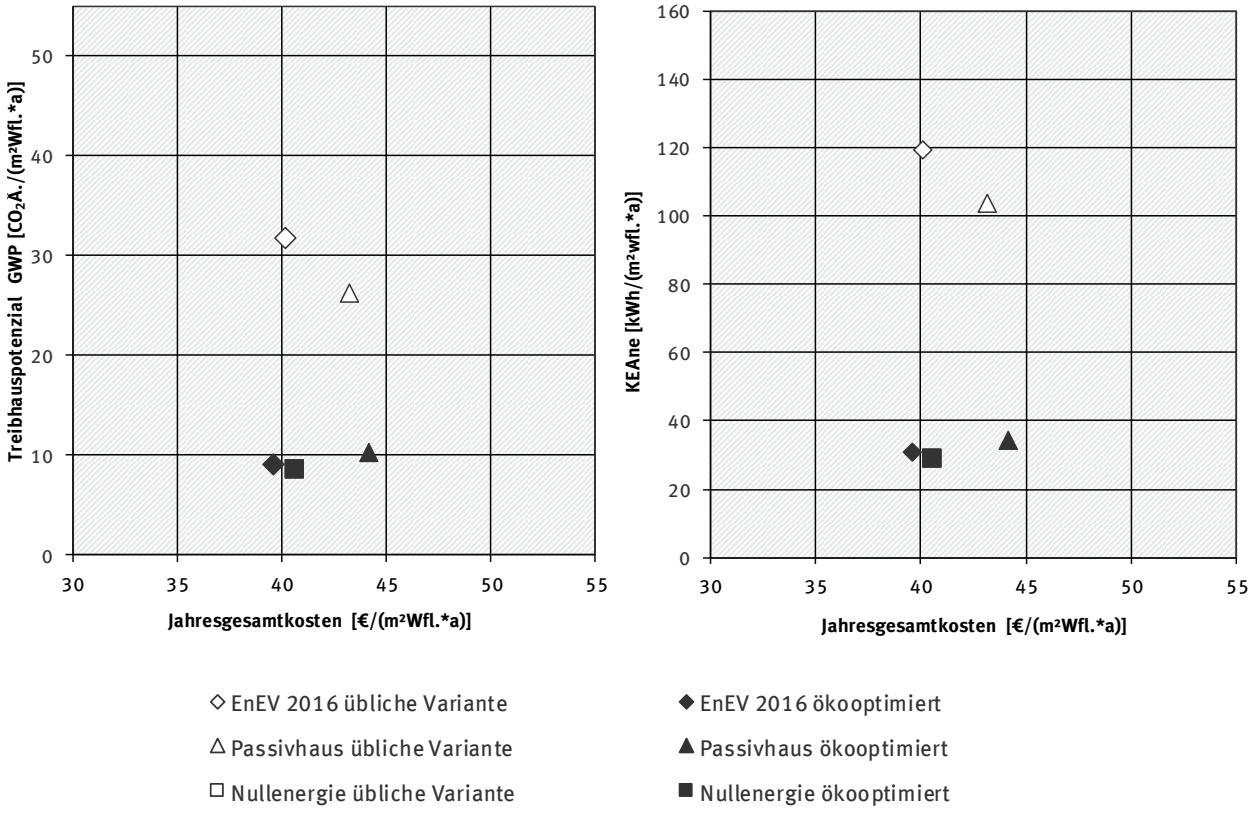
Abbildung 36: KEAne der „ökooptimierten Varianten“ Sanierung MFH E



Quelle: Eigene Berechnungen

Abbildung 37 zeigt zusammenfassend eine Gegenüberstellung der „üblichen“ und „ökooptimierten“ Varianten je Gebäudeenergiestandard hinsichtlich erreichbarer CO_2-Emissionen/ KEAne und Jahresgesamtkosten. Die ökooptimierten Varianten im EnEV-2016 und Passivhaus-Standard erreichen mit ca. 10 kgCO_2-Ä./(m²$_{Wfl.}$·a) bzw. 30 – 35 kWh/(m²$_{Wfl.}$·a) das Niveau eines Nullenergiegebäudes. Die Ausführung der „ökooptimierten“ EnEV-2016-Variante führt gegenüber der „üblichen Ausführung“ sogar zu einer Kostenminderung.

Abbildung 37: GWP/ JGK und KEAne/ JGK Sanierungsvarianten MFH E



Quelle: Eigene Berechnungen

3.3 Sanierung GMH F

3.3.1 Untersuchte Varianten

Alle untersuchten Maßnahmenkombinationen für die Sanierung des „GMH F“ sind in Tabelle 34 dargestellt. Die ausgewählten „üblichen Varianten“ sind durch eine schwarze Umrandung hervorgehoben.

Tabelle 34: Variantenmatrix Energiekonzepte Sanierung GMH F

Therm. Qualität Gebäude-hülle	Lüftungsart	ohne PV						mit PV Süd-Dach (60%)					
		Gas + Solar	Fernwärme fPE=0,70	Fernwärme fPE=0,35	Pellets	Wärmepumpe	BHKW+Gas	Gas + Solar	Fernwärme fPE=0,70	Fernwärme fPE=0,35	Pellets	Wärmepumpe	BHKW+Gas
EnEV 2016	Abluft		EnEV	EnEV	EnEV	EnEV	EnEV		EnEV	Null	Null	EnEV	EnEV
KfW 55	Abluft	EnEV	EnEV	EnEV	EnEV	EnEV	EnEV	EnEV	EnEV	Null	Null	Null	Null
KfW 40	Abluft	EnEV	EnEV	EnEV	EnEV	EnEV	EnEV	EnEV	EnEV	Null	Null	Null	Null
EnEV 2016	Lüftung m WRG	EnEV	EnEV	EnEV	EnEV	EnEV	EnEV	EnEV	EnEV	Null	Null	EnEV	Null
KfW 55	Lüftung m WRG	Passiv	Passiv	Passiv	Passiv	Passiv	Passiv	Passiv	Null	Null	Null	Null	Null
KfW 40	Lüftung m WRG	Passiv	Passiv	Passiv	Passiv	Passiv	Passiv	Passiv	Null	Null	Null	Null	Null

Die ausgewählten „üblichen Varianten“ sind durch eine schwarze Umrandung hervorgehoben.
Quelle: Eigene Berechnungen Steinbeis-Transferzentrum EGS auf Basis DIN V 18599

In Tabelle 35 sind die Technikkomponenten der „üblichen Variante“ zur Erreichung der jeweiligen Gebäudeenergiestandards für das sanierte Typgebäude „GMH F“ zusammengefasst. Sie entsprechen den „üblichen Varianten“ des „MFH E“.

Tabelle 35: „Übliche Varianten“ Sanierung GMH F

EnEV 2016	Passivhaus	Nullenergie
Gas + Solarthermie	BHKW	Pellets
KfW 55 (HT´)	KfW 55 (HT´)	KfW 55 (HT´)
Abluftanlage	Lüftung mit WRG	Abluftanlage
ohne PV	ohne PV	PV Dach

Quelle: Steinbeis-Transferzentrum EGS, Statistisches Bundesamt 2015, Diefenbach 2016, Passivhaus-Datenbank 2017

Die Jahresgesamtkosten der Sanierungsvarianten für das „GMH F“ bezogen auf die kostengünstigste Variante sind in Tabelle 36 aufgeführt. Die Mehrkostenspanne der Sanierungsvarianten für das Typgebäude „GMH F“ vergrößert sich gegenüber der Sanierung des „MFH E“ auf bis zu 41 %. Dies ist wie beim Typgebäude „MFH E“ auf die Wärmepumpenvarianten zurückzuführen. Die Wärmeversorgung mit Wärmepumpen ist auch hier mit 20 % Mehrkosten die kostenintensivste Lösung. Wird der erzeugte Strom im Gebäude direkt genutzt, stellt das BHKW im Bestand mit Abstand die kostengünstigste Wärmeversorgungsvariante dar. Die Kosten für eine Wärmeversorgung mit Gas und Solarthermie, Holzpellets oder Fernwärme liegen nahe beieinander. Sichtbarer Kostenfaktor ist auch hier die Integration einer Lüftungsanlage mit 14 % Mehrkosten gegenüber Varianten mit reinen Abluftanlagen. Eine Verschärfung der Dämmung von KfW Effizienzhaus 55 auf KfW Effizienzhaus 40 ist mit weiteren 4 % Mehrkosten verbunden. Dies ist auf die kompakte Gebäudeform mit gutem A/V-Verhältnis zurückzuführen. Eine Photovoltaikanlage führt durch die hohe Eigenstromnutzung bei allen Varianten zu Kostenminderungen.

Auch hier entspricht nur beim Passivhausstandard die „übliche Variante“ auch der kostengünstigsten Ausführung.

Tabelle 36: Jahresgesamtkosten Sanierung GMH F (ohne Energiepreissteigerung)

Therm. Qualität Gebäude-hülle	Lüftungsart	ohne PV					mit PV Dach (60%)				
		Gas + Solar	Fernwärme	Pellets	Wärmepumpe	BHKW+Gas	Gas + Solar	Fernwärme	Pellets	Wärmepumpe	BHKW+Gas
EnEV 2016	Abluft		108%	107%	122%	101%		106%	105%	119%	100%
KfW 55	Abluft	107%	108%	109%	122%	103%	105%	106%	107%	120%	102%
KfW 40	Abluft	111%	112%	114%	126%	108%	109%	110%	112%	124%	107%
EnEV 2016	Lüftung m WRG	122%	123%	123%	137%	118%	119%	121%	120%	134%	117%
KfW 55	Lüftung m WRG	123%	123%	125%	137%	119%	121%	121%	122%	135%	118%
KfW 40	Lüftung m WRG	128%	127%	129%	141%	124%	125%	125%	126%	139%	123%

Die ausgewählten „üblichen Varianten“ sind durch eine schwarze Umrandung hervorgehoben.
Quelle: Eigene Berechnungen Steinbeis-Transferzentrum EGS

Wird auf alle Energieträger eine Energiepreissteigerung von 2 % angesetzt, wirkt sich dies nur bei Varianten mit Eigenstromerzeugung durch Photovoltaikanlagen und BHWKs kostensenkend aus. In der

Gesamtbetrachtung sind diese Unterschiede jedoch auch hier marginal und die Hauptaussagen ändern sich gegenüber einer Betrachtung ohne Preissteigerung nicht. In den folgenden Auswertungen werden die Jahresgesamtkosten daher ohne Energiepreissteigerung dargestellt.

Tabelle 37: Jahresgesamtkosten Sanierung GMH F (2 % Energiepreissteigerung)

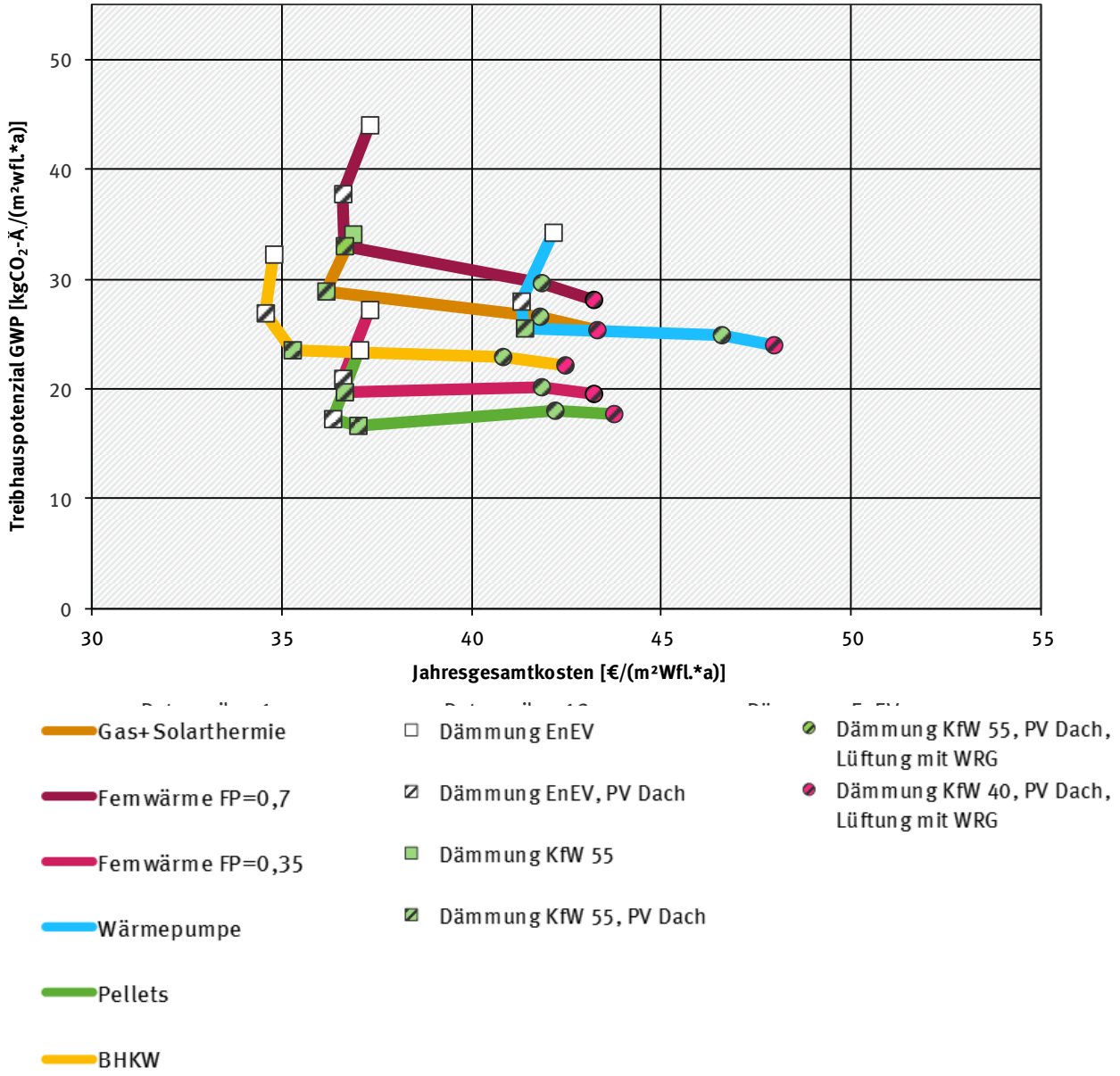
Therm. Qualität Gebäude-hülle	Lüftungsart	ohne PV					mit PV Dach (60%)				
		Gas + Solar	Fernwärme	Pellets	Wärmepumpe	BHKW+Gas	Gas + Solar	Fernwärme	Pellets	Wärmepumpe	BHKW+Gas
EnEV 2016	Abluft		112%	110%	125%	102%		109%	106%	120%	100%
KfW 55	Abluft	109%	112%	111%	124%	103%	105%	108%	107%	120%	101%
KfW 40	Abluft	113%	115%	115%	128%	108%	109%	111%	111%	123%	106%
EnEV 2016	Lüftung m WRG	124%	126%	124%	139%	118%	119%	122%	120%	134%	115%
KfW 55	Lüftung m WRG	124%	125%	126%	138%	119%	120%	121%	121%	134%	116%
KfW 40	Lüftung m WRG	128%	129%	129%	142%	123%	124%	124%	125%	137%	120%

Die ausgewählten „üblichen Varianten“ sind durch eine schwarze Umrandung hervorgehoben.
Quelle: Eigene Berechnungen Steinbeis-Transferzentrum EGS

3.3.2 KEAne und GWP

Ausgehend von einer Sanierung der Gebäudehülle auf EnEV-2016-Neubauniveau hat auch bei der Sanierung des Typgebäudes „GMH F“ die Art der Wärmeversorgung den größten Einfluss auf die CO_2-Emissionen, wie aus Abbildung 38 deutlich wird. Durch die Variation der Wärmeversorgung sind maximale CO_2-Einsparungen von 45 % (20 kgCO_2-Ä./(m²$_{Wfl.}$·a)) möglich. Wie im „MFH E“ haben die Wärmepumpenvarianten nur vergleichbar geringere CO_2-Emissionen als die Wärmeversorgungsvarianten durch Gaskessel und Solarthermie und die BHKW-Varianten im guten Mittelfeld. Auch im „GMH F“ ist das Solarpotenzial begrenzt und im Verhältnis zur gesamten Wohnfläche gering. Daher belaufen sich die Einsparungen durch Photovoltaik im Bestand am Typgebäude „MFH E“ lediglich auf 6 kgCO_2-Ä./(m²$_{Wfl.}$·a). In Abhängigkeit der Wärmeversorgung variieren hier die prozentualen CO_2-Einsparungen zwischen 15 – 25 %. Da ein Großteil des erzeugten Stroms direkt im Gebäude selbst genutzt werden kann, führt die Integration einer PV-Anlage bei allen Varianten zu geringeren Jahresgesamtkosten. Eine Verbesserung der Gebäudehülle gemäß KfW Effizienzhaus 55 wirkt sich je nach Energieträger mit einer weiteren Reduktion mit bis zu 13 % (max. 5 kgCO_2-Ä./(m²$_{Wfl.}$·a)) aus. Die Integration einer Lüftung mit WRG wirkt sich auch hier aus energetischer Sicht nur bei fossil dominierter Versorgung positiv aus und kann die CO_2-Emissionen um max. 10 % (max. 3 kgCO_2-Ä./(m²$_{Wfl.}$·a)) senken. Bei einer regenerativen Wärmeversorgung führt eine Lüftungsanlage mit WRG zu höheren CO_2-Emissionen. Eine zusätzliche Verschärfung der Dämmung von KfW Effizienzhaus 55 auf KfW Effizienzhaus 40 ist ebenfalls nur bei fossil dominierter Versorgung zu empfehlen und wirkt sich je nach Energieträger mit einer weiteren CO_2-Einsparung von max. 5 % (max. 2 kgCO_2-Ä./(m²$_{Wfl.}$·a)) aus.

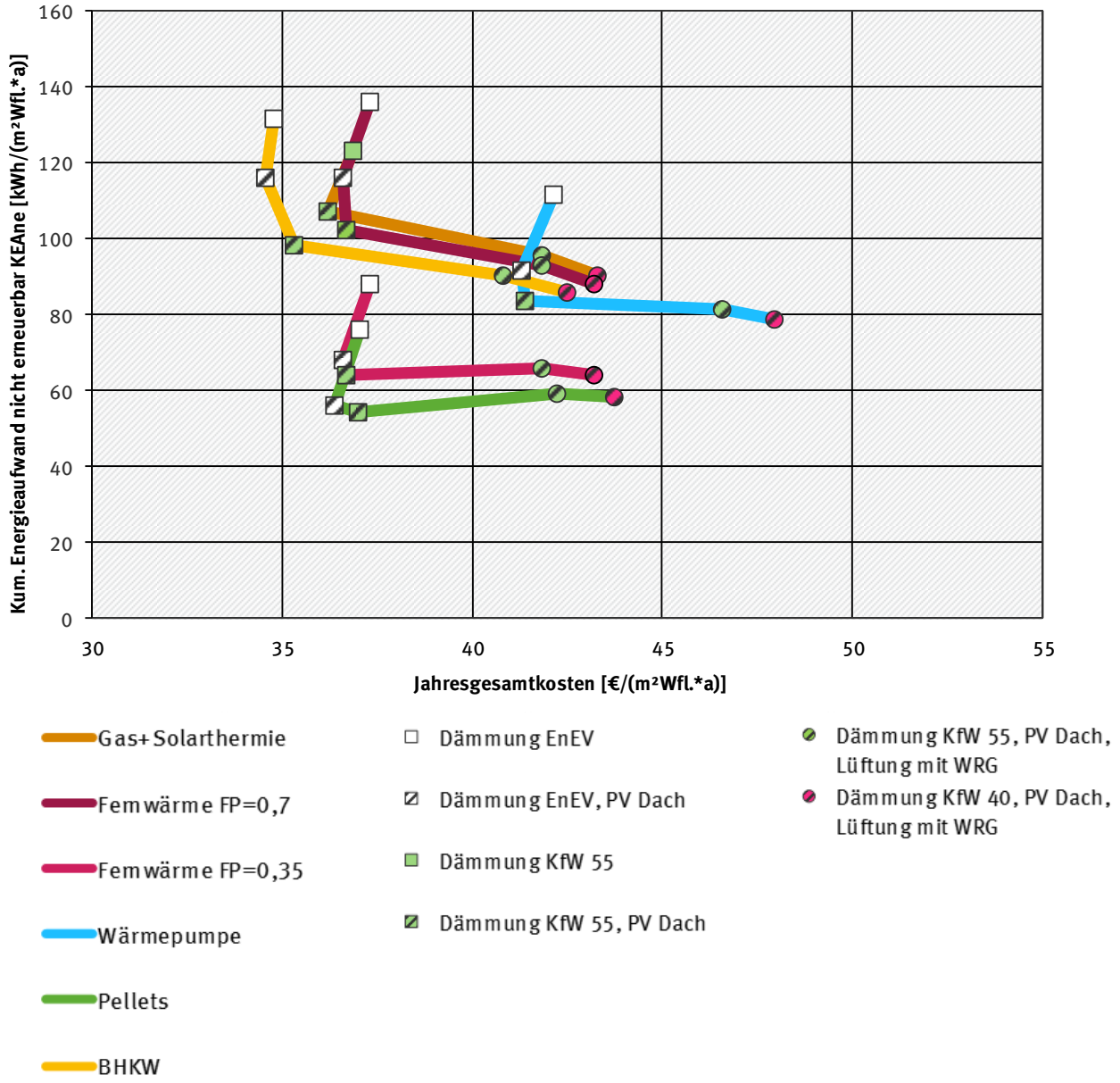
Abbildung 38: GWP/ Jahresgesamtkosten Energiekonzepte Sanierung GMH F



Quelle: Eigene Berechnungen

Die Verbesserungen hinsichtlich CO_2-Emissionen und KEAne korrelieren auch beim Typgebäude „GMH F“ tendenziell mit Ausnahme der Wärmeerzeugung wie aus Abbildung 39 ersichtlich wird. Wie beim Typgebäude „MFH E“ liegen die Wärmeversorgungsvarianten „Fernwärme f_P=0,7“ und „Gas+Solarthermie“ hinsichtlich dem KEAne nahe beieinander. Eine Versorgung über „BHKW“ führt zu etwas geringerem KEAne gefolgt von den Wärmepumpenvarianten im unteren Mittelfeld. Die regenerativ dominierten Varianten „Fernwärme f_P=0,35“ und „Pellets“ haben auch hier mit Abstand den geringsten KEAne.

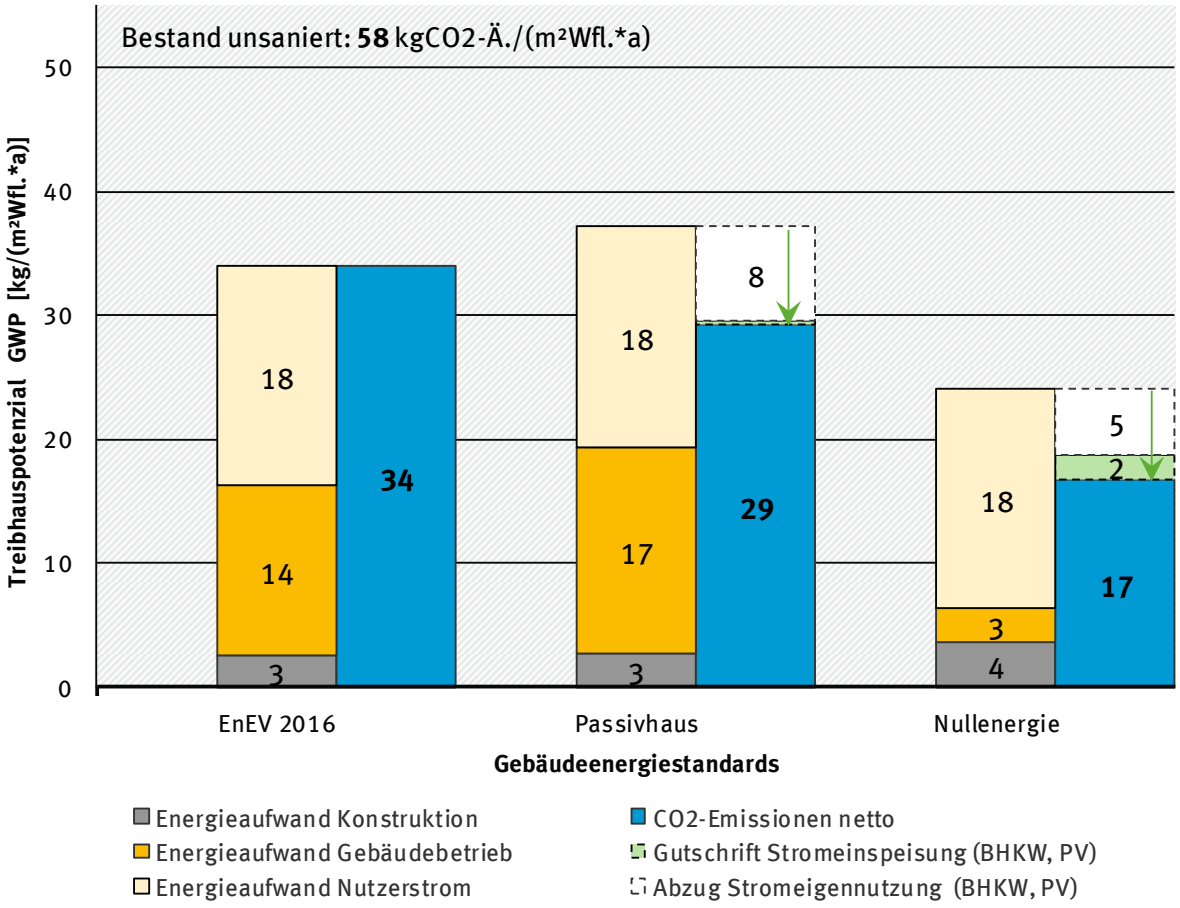
Abbildung 39: KEAne/ JGK der Energiekonzepte Sanierung GMH F



Quelle: Eigene Berechnungen

Die Aufteilung der CO_2-Emissionen der „üblichen Varianten“ sind in Abbildung 40 dargestellt. Beim sanierten „GMH F“ entfallen 3 – 4 kgCO_2-Ä./(m²$_{Wfl.}$·a) auf die Konstruktion. Bei den sanierten Gebäuden im EnEV-2016 und Passivhaus-Standard entfallen weniger als 10 % der CO_2-Emissionen auf die Konstruktion. Bei einem üblichen sanierten Nullenergiegebäude steigt der Konstruktionsanteil auf etwa 15 % der CO_2-Emissionen an.

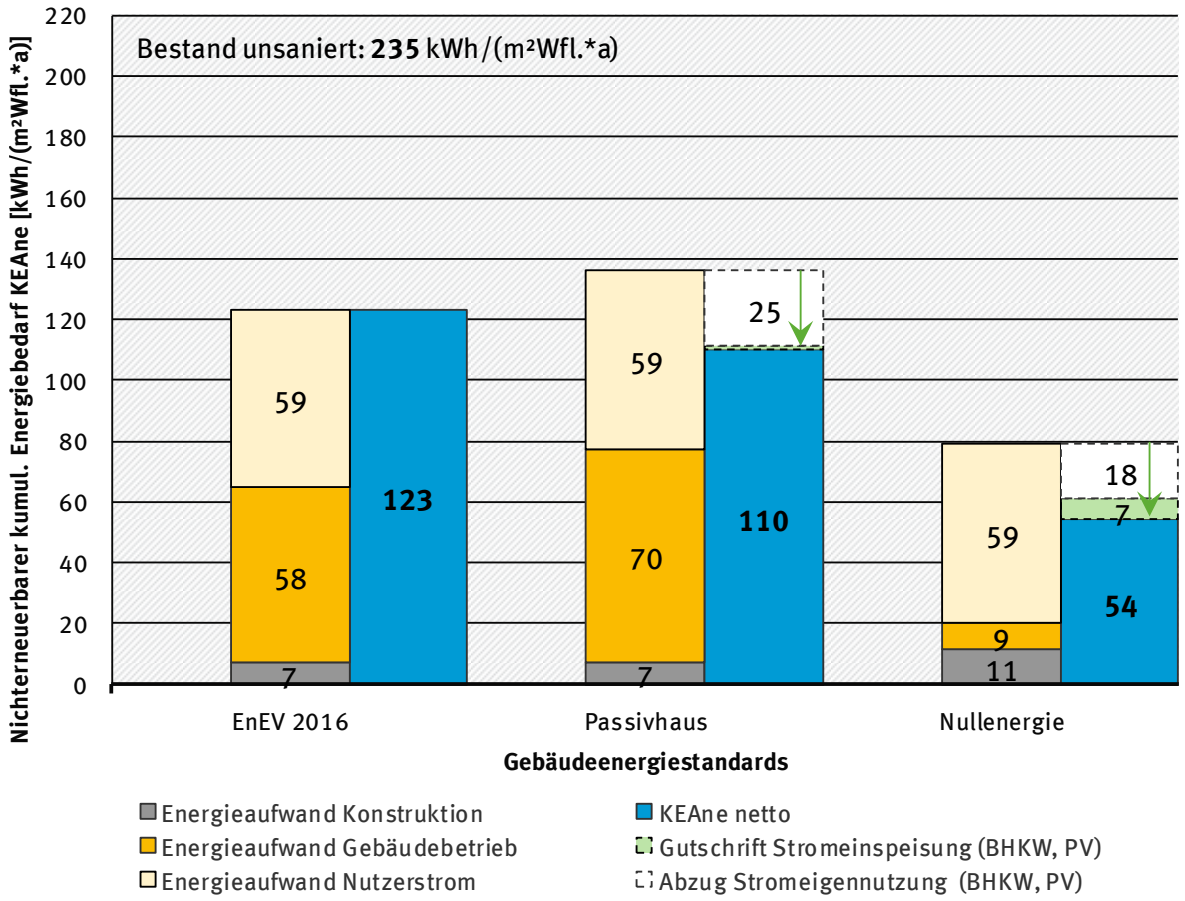
Abbildung 40: GWP der „üblichen Varianten“ Sanierung GMH F



Quelle: Eigene Berechnungen

Gemäß Abbildung 41 liegt der Anteil Konstruktion am KEAne bei allen Varianten bei 7 – 11 kWh/(m²$_{Wfl.}$·a). Dies entspricht einem Anteil für die Konstruktion bei Gebäuden im EnEV-2016 und Passivhaus-Standard von rund 5 % des KEAne. Beim üblichen Nullenergiegebäude steigt der Konstruktionsanteil auf über 15 % des KEAne.

Abbildung 41: KEAne der „üblichen Varianten“ Sanierung GMH F



Quelle: Eigene Berechnungen

3.3.3 Ökooptimierte Varianten

Im „GMH F“ werden analog zum „MFH E“ die „ökooptimierten Varianten“ gemäß Tabelle 38 abgeleitet. Auch beim Typgebäude „GMH F“ entspricht das üblicherweise ausgeführte Nullenergiekonzept bereits der bestmöglichen „ökooptimierten“ Ausführung.

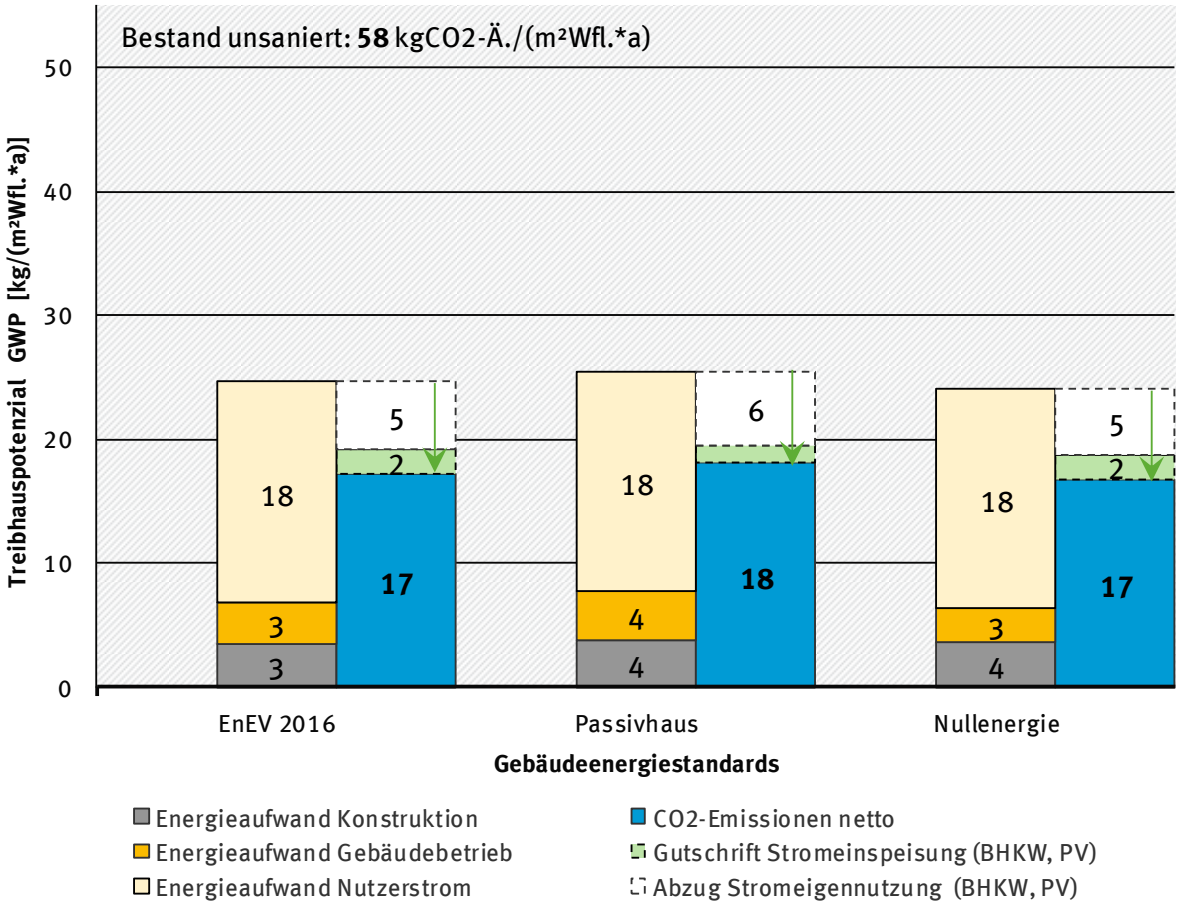
Tabelle 38: „Ökooptimierte Varianten“ Sanierung GMH F

EnEV 2016	Passivhaus	Nullenergie
Pellets	Pellets	Pellets
EnEV 2016 (HT´)	KfW 55 (HT´)	KfW 55 (HT´)
Abluftanlage	Lüftung mit WRG	Abluftanlage
PV Dach	PV Dach	PV Dach

Quelle: Steinbeis-Transferzentrum EGS

In Abbildung 42 sind die Bilanzen der CO_2-Emissionen im Lebenszyklus der „ökooptimierten Varianten“ dargestellt. Durch die Integration einer Photovoltaikanlage beim EnEV-2016-Gebäude und dem Wechsel der Wärmeerzeugung beim Passivhausgebäude liegen alle ökooptimierten Varianten bei CO_2-Emissionen netto von 17 - 18 kgCO_2-Ä./(m²$_{Wfl.}$·a). Dies entspricht einem Anteil für die Konstruktion von 15 % der CO_2-Emissionen.

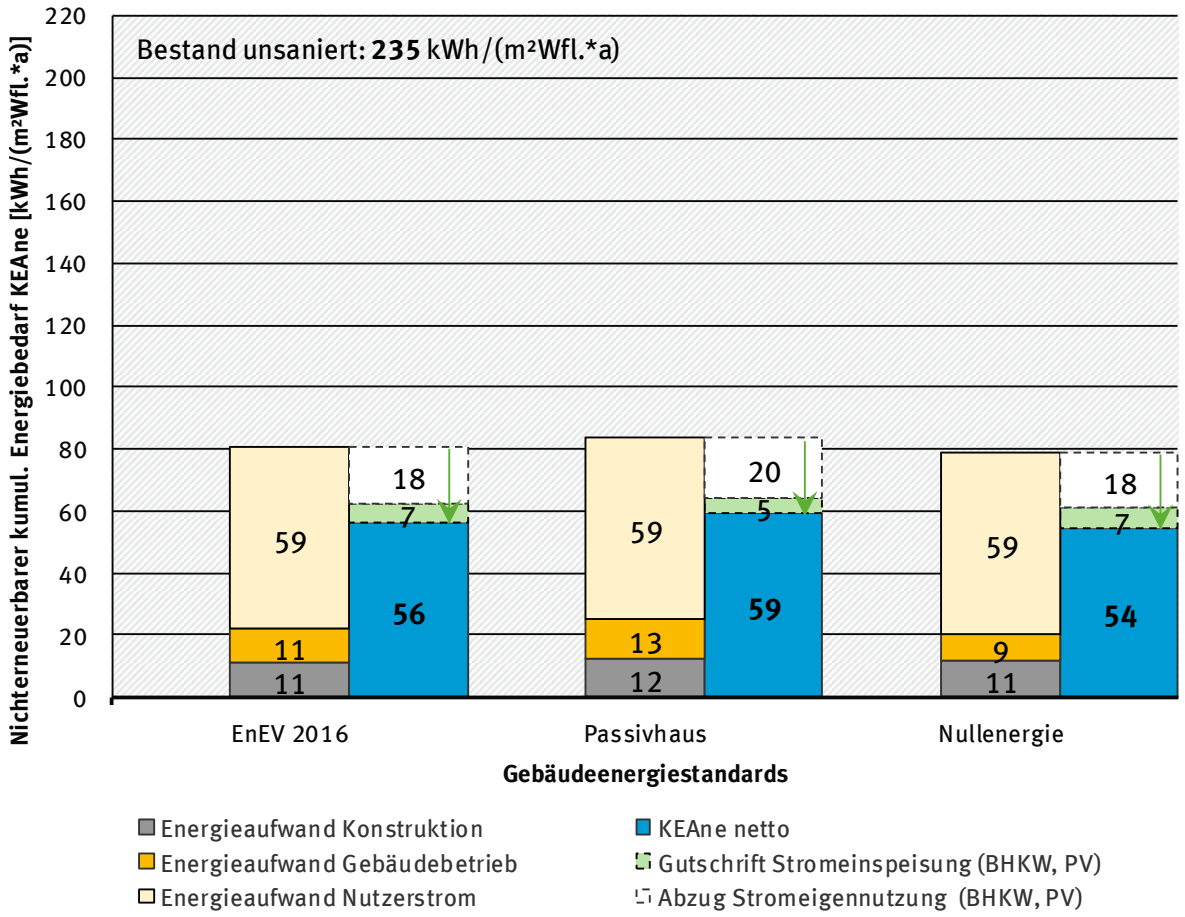
Abbildung 42: GWP der „ökooptimierten Varianten“ Sanierung GMH F



Quelle: Eigene Berechnungen

In Abbildung 43 wird der KEAne im Lebenszyklus der „ökooptimierten Varianten“ ausgewiesen. Der Anteil Konstruktion liegt bei 11 – 12 kWh/(m²$_{Wfl.}$·a). Dies entspricht einem Anteil von etwa 15 % des KEAne für die Konstruktion.

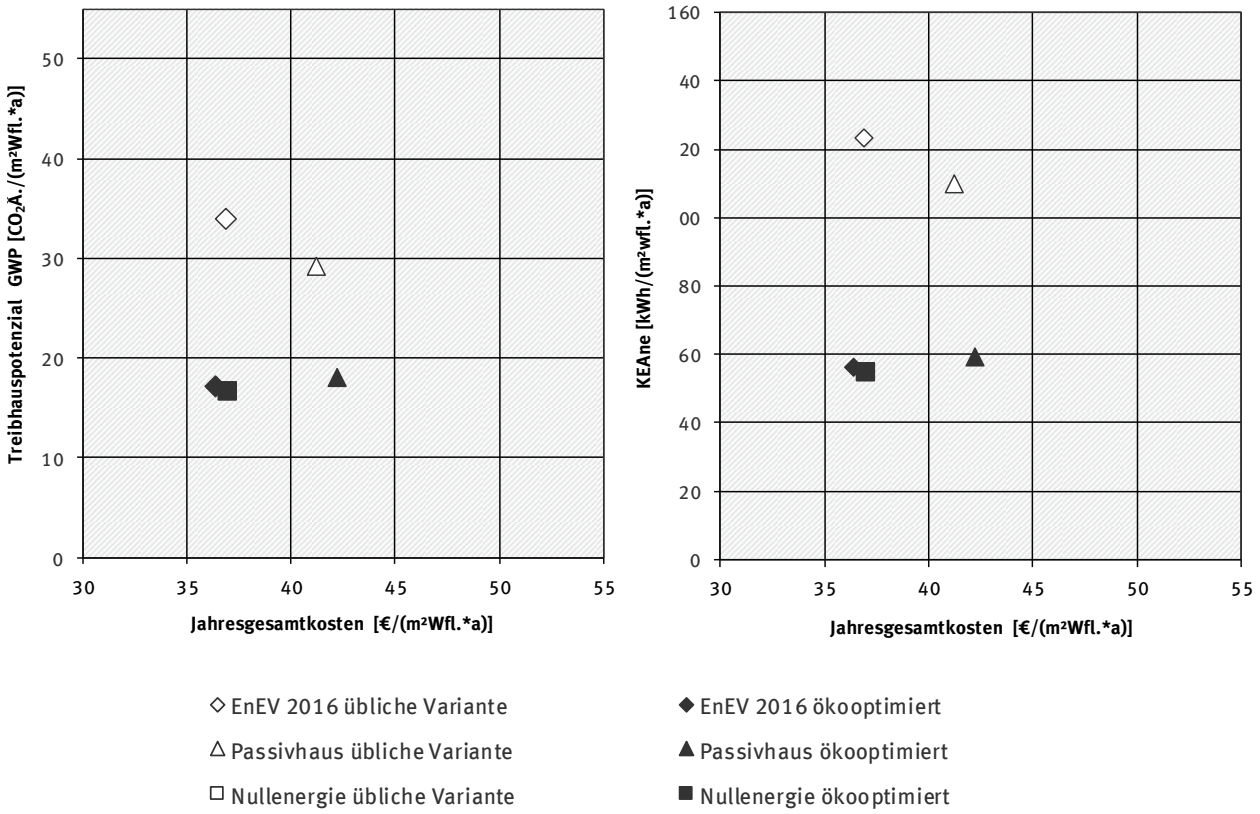
Abbildung 43: KEAne der „ökooptimierten Varianten“ Sanierung GMH F



Quelle: Eigene Berechnungen

Abbildung 44 zeigt zusammenfassend eine Gegenüberstellung der „üblichen“ und „ökooptimierten“ Varianten je Gebäudeenergiestandard hinsichtlich CO_2-Emissionen/ KEAne und Jahresgesamtkosten. Die „ökooptimierten Varianten“ der EnEV-2016 und Passivhaus-Standards erreichen mit > 20 kgCO_2-Ä./(m²$_{Wfl.}$·a) bzw. 55 – 60 kWh/(m²$_{Wfl.}$·a) das Niveau eines Nullenergiestandards für das „GMH F“. Die Ausführung der „ökooptimierten“ EnEV-2016-Variante führt gegenüber der „üblichen Ausführung“ auch hier zu einer Kostenminderung.

Abbildung 44: GWP/ JGK und KEAne/ JGK der Sanierungsvarianten GMH F



Quelle: Eigene Berechnungen

3.4 Sanierung EFH C

3.4.1 Untersuchte Varianten

Alle untersuchten Maßnahmenkombinationen bei der Sanierung des „EFH C“ sind in Tabelle 39 dargestellt. Die ausgewählten „üblichen Varianten“ sind durch eine schwarze Umrandung hervorgehoben.

Tabelle 39: Variantenmatrix Energiekonzepte Sanierung EFH C

Therm. Qualität Gebäude-hülle	Lüftungsart	ohne PV						mit PV Süd-Dach (30%)					
		Gas + Solar	Fernwärme fPE=0,70	Fernwärme fPE=0,35	Pellets	Wärmepumpe	Brennstoff-zelle + Gas	Gas + Solar	Fernwärme fPE=0,70	Fernwärme fPE=0,35	Pellets	Wärmepumpe	Brennstoff-zelle + Gas
EnEV 2016	Abluft		EnEV	EnEV	EnEV	EnEV	EnEV		EnEV	EnEV	EnEV	EnEV	EnEV
KfW 55	Abluft	EnEV	EnEV	EnEV	EnEV	EnEV	EnEV	EnEV	EnEV	EnEV	EnEV	EnEV	EnEV
KfW 40	Abluft	EnEV	EnEV	EnEV	EnEV	EnEV	EnEV	EnEV	EnEV	EnEV	EnEV	EnEV	EnEV
EnEV 2016	Lüftung m WRG		EnEV	EnEV	EnEV	EnEV	EnEV		EnEV	EnEV	EnEV	EnEV	EnEV
KfW 55	Lüftung m WRG	Passiv	Passiv	Passiv	Passiv	Passiv	Passiv	Passiv	Passiv	Passiv	Passiv	Passiv	Passiv
KfW 40	Lüftung m WRG	Passiv	Passiv	Passiv	Passiv	Passiv	Passiv	Passiv	Passiv	Passiv	Passiv	Passiv	Passiv

Die ausgewählten „üblichen Varianten“ sind durch eine schwarze Umrandung hervorgehoben.
Quelle: Eigene Berechnungen Steinbeis-Transferzentrum EGS auf Basis DIN V 18599

In Tabelle 40 sind die Technikkomponenten der „üblichen Variante“ zur Erreichung der jeweiligen Gebäudeenergiestandards für das sanierte Typgebäude „EFH C“ zusammengefasst. Der Nullenergiestandard kann bei diesem Typgebäude aufgrund des geringen Solarpotenzials nicht erreicht werden.

Tabelle 40: „Übliche Varianten“ Sanierung EFH C

EnEV 2016	Passivhaus	Nullenergie
Gas + Solarthermie	Wärmepumpe	-
KfW 55 (HT´)	KfW 55 (HT´)	-
Abluftanlage	Lüftung mit WRG	-
ohne PV	mit PV	-

Quelle: Steinbeis-Transferzentrum EGS, Statistisches Bundesamt 2015, Diefenbach 2016, Passivhaus-Datenbank 2017

Die resultierenden Jahresgesamtkosten der Sanierungsvarianten für das „EFH C“ bezogen auf die kostengünstigste Variante sind in Tabelle 41 aufgeführt. Die Mehrkosten der Variantenkombinationen für die Sanierung des Typgebäudes „EFH C“ mit max. 27 % sind vergleichbar mit der Sanierung des „MFH E“. Die kostenintensivste Wärmeversorgung stellen hier jedoch Fernwärme im Bestand und ein Brennstoffzellenkompaktgerät mit integrierter Gastherme dar (ca. + 7 %). Eine Wärmeversorgung durch Gastherme und Solarthermie, der „üblichen Variante“ für den EnEV-2016-Gebäudestandard, ist mit Abstand die günstigste Lösung. Eine kleine Photovoltaikanlage auf dem Gebäudedach lässt sich durch die hohe Eigenstromnutzung bei allen Varianten fast kostenneutral realisieren. Eine Verschärfung der Dämmung auf KfW Effizienzhaus 55 ist ebenfalls mehrheitlich kostenneutral. Ein wesentlicher Kostensprung wird durch die Integration einer Lüftungsanlage mit durchschnittlich 11 % Mehrkosten gegenüber Abluftvarianten verursacht. Eine weitere Verschärfung der Dämmung von KfW Effizienzhaus 55 auf KfW Effizienzhaus 40 ist mit weiteren 5 % Mehrkosten verbunden.

Tabelle 41: Jahresgesamtkosten Sanierung EFH C (ohne Energiepreissteigerung)

Therm. Qualität Gebäude-hülle	Lüftungsart	ohne PV					mit PV Dach (30%)				
		Gas + Solar	Fernwärme	Pellets	Wärmepumpe	Brennstoff-zelle + Gas	Gas + Solar	Fernwärme	Pellets	Wärmepumpe	Brennstoff-zelle + Gas
EnEV 2016	Abluft		108%	104%	105%	106%		107%	102%	105%	106%
KfW 55	Abluft	101%	107%	106%	105%	107%	100%	106%	105%	105%	108%
KfW 40	Abluft	106%	111%	111%	109%	112%	105%	110%	110%	109%	112%
EnEV 2016	Lüftung m WRG		118%	116%	115%	116%		116%	115%	115%	121%
KfW 55	Lüftung m WRG	112%	117%	119%	115%	118%	111%	116%	117%	115%	123%
KfW 40	Lüftung m WRG	117%	121%	124%	120%	123%	116%	120%	122%	119%	127%

Die ausgewählten „üblichen Varianten“ sind durch eine schwarze Umrandung hervorgehoben.
Quelle: Eigene Berechnungen Steinbeis-Transferzentrum EGS

Wird auf alle Energieträger eine Preissteigerung von 2 % angesetzt, erhöhen sich die Jahresgesamtkosten der Varianten. Auch hier sind die Auswirkungen einer Energiepreissteigerung bei Varianten mit Eigenstromerzeugung durch Photovoltaikanlagen und Brennstoffzelle sowie hoher Eigenstromnutzung durch strombasierte Wärmeversorgung über Wärmepumpen und Lüftungsanlagen mit WRG geringer. Die getroffenen Hauptaussagen ändern sich jedoch dadurch nicht und in den folgenden Auswertungen werden die Jahresgesamtkosten daher ohne Energiepreissteigerung dargestellt.

Tabelle 42: Jahresgesamtkosten Sanierung EFH C (2 % Energiepreissteigerung)

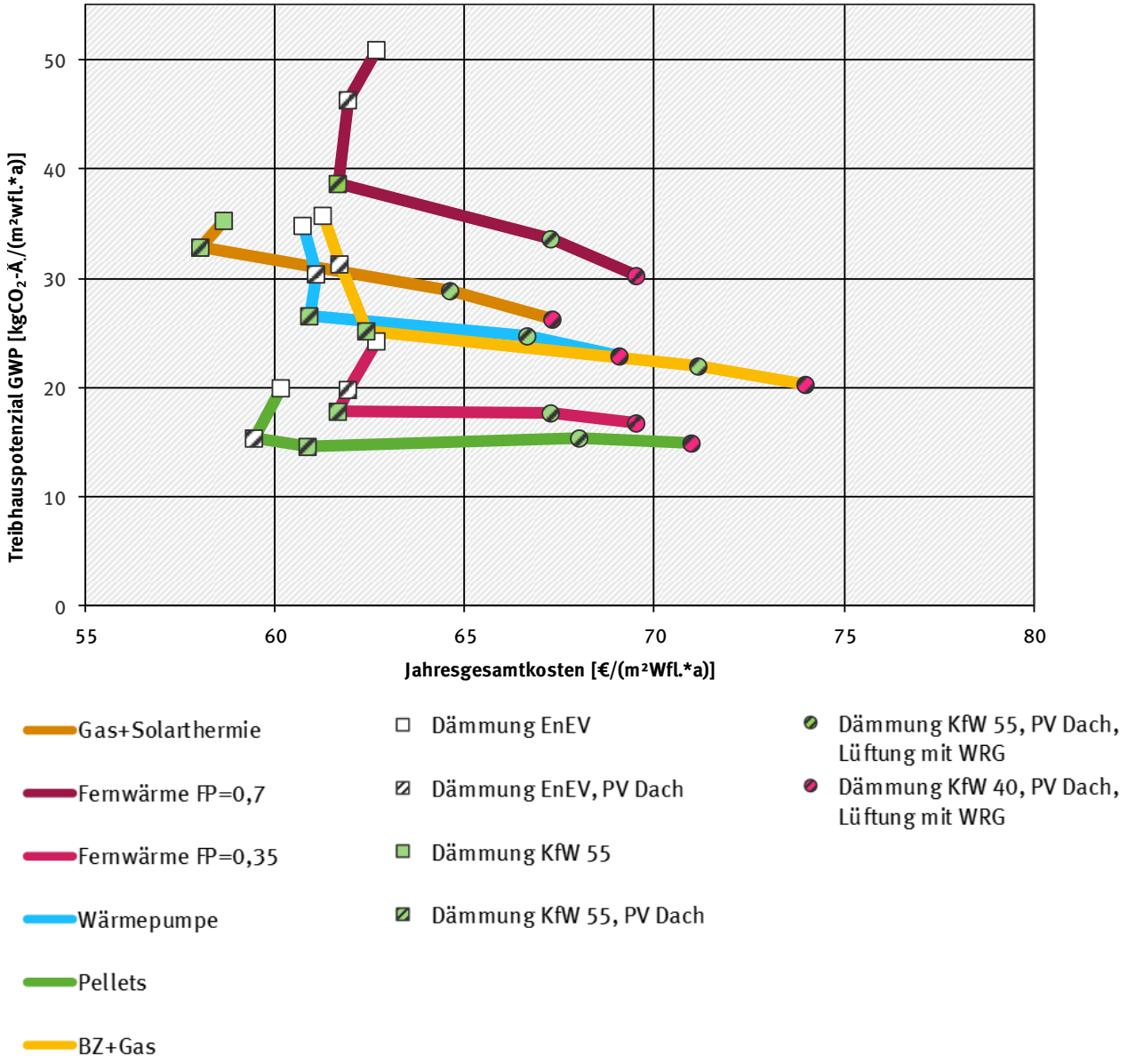
Therm. Qualität Gebäude-hülle	Lüftungsart	ohne PV					mit PV Dach (30%)				
		Gas + Solar	Fernwärme	Pellets	Wärmepumpe	Brennstoff-zelle + Gas	Gas + Solar	Fernwärme	Pellets	Wärmepumpe	Brennstoff-zelle + Gas
EnEV 2016	Abluft		112%	105%	106%	106%		110%	103%	106%	106%
KfW 55	Abluft	102%	110%	107%	105%	106%	100%	108%	105%	105%	106%
KfW 40	Abluft	106%	113%	111%	109%	110%	104%	111%	109%	108%	111%
EnEV 2016	Lüftung m WRG		120%	117%	115%	115%		118%	114%	115%	121%
KfW 55	Lüftung m WRG	112%	118%	118%	115%	116%	110%	116%	116%	114%	121%
KfW 40	Lüftung m WRG	116%	121%	123%	118%	120%	114%	119%	120%	117%	126%

Die ausgewählten „üblichen Varianten“ sind durch eine schwarze Umrandung hervorgehoben.
Quelle: Eigene Berechnungen Steinbeis-Transferzentrum EGS

3.4.2 KEAne und GWP

In Abbildung 45 sind die einzelnen Variantenkombinationen und die damit verbundenen CO_2-Emissionen (GWP) und die Jahresgesamtkosten der Sanierungskonzepte für das „EFH C“ dargestellt. Auch hier prägt die Nutzungsphase den Gesamtenergieaufwand und die Art der Wärmeversorgung ist maßgeblich für die CO_2-Emissionen der Varianten. Durch die Variation der Wärmeversorgung mit entsprechendem Energieträger sind maximale CO_2-Einsparungen von 60 % (30 kgCO_2-Ä./(m²$_{Wfl.}$·a)) möglich. Varianten mit einer Wärmeversorgung über fossile Fernwärme führen mit Abstand zu den höchsten CO_2-Emissionen gefolgt von Wärmeversorgungsvarianten mit Gastherme und Solarthermie. Die Wärmepumpenvarianten erreichen bei einer Sanierung im Einfamilienhausbereich niedrigere CO_2-Emissionen und befinden sich im Mittelfeld. Brennstoffzellenvarianten werden durch die Eigenstromerzeugung etwas besser bewertet. Am besten schneiden auch hier wieder die regenerativ dominierten Energieträger ab. Durch das Walmdach mit Dachgauben ist das Solarpotenzial im Typgebäude „EFH C“ stark begrenzt. Die Einsparungen durch Photovoltaik belaufen sich lediglich auf max. 5 kgCO_2-Ä./(m²$_{Wfl.}$·a). Dies entspricht je nach Wärmeversorgung einer prozentualen CO_2-Einsparung von 5 - 25 %. Da ein Großteil des erzeugten Stroms direkt im Gebäude selbst genutzt werden kann, führt die PV-Anlage bei fast allen Varianten zu einer Kostensenkung. Eine Verbesserung der Gebäudehülle auf KfW Effizienzhaus 55 wirkt sich mit einer weiteren Reduktion von 5 – 20 % (1 – 8 kgCO_2-Ä./(m²$_{Wfl.}$·a)) vor allem bei fossil dominierten Energieträgern aus. Die Integration einer Lüftung mit Wärmerückgewinnung wirkt sich auch hier aus energetischer Sicht nur bei fossil dominierter Versorgung mit einer max. Reduktion von 15 % (max. 5 kgCO_2-Ä./(m²$_{Wfl.}$·a)) positiv aus. Bei einer regenerativen Wärmeversorgung führt die Lüftungsanlage mit WRG zu höheren CO_2-Emissionen. Eine zusätzliche Verschärfung der Dämmung von KfW Effizienzhaus 55 auf KfW Effizienzhaus 40 wirkt sich mit einer weiteren Reduktion von 5 – 10 % (1 – 3 kgCO_2-Ä./(m²$_{Wfl.}$·a)) vor allem bei fossil dominierter Wärmeerzeugung aus und ist bei regenerativer Wärmeversorgung nicht zu empfehlen.

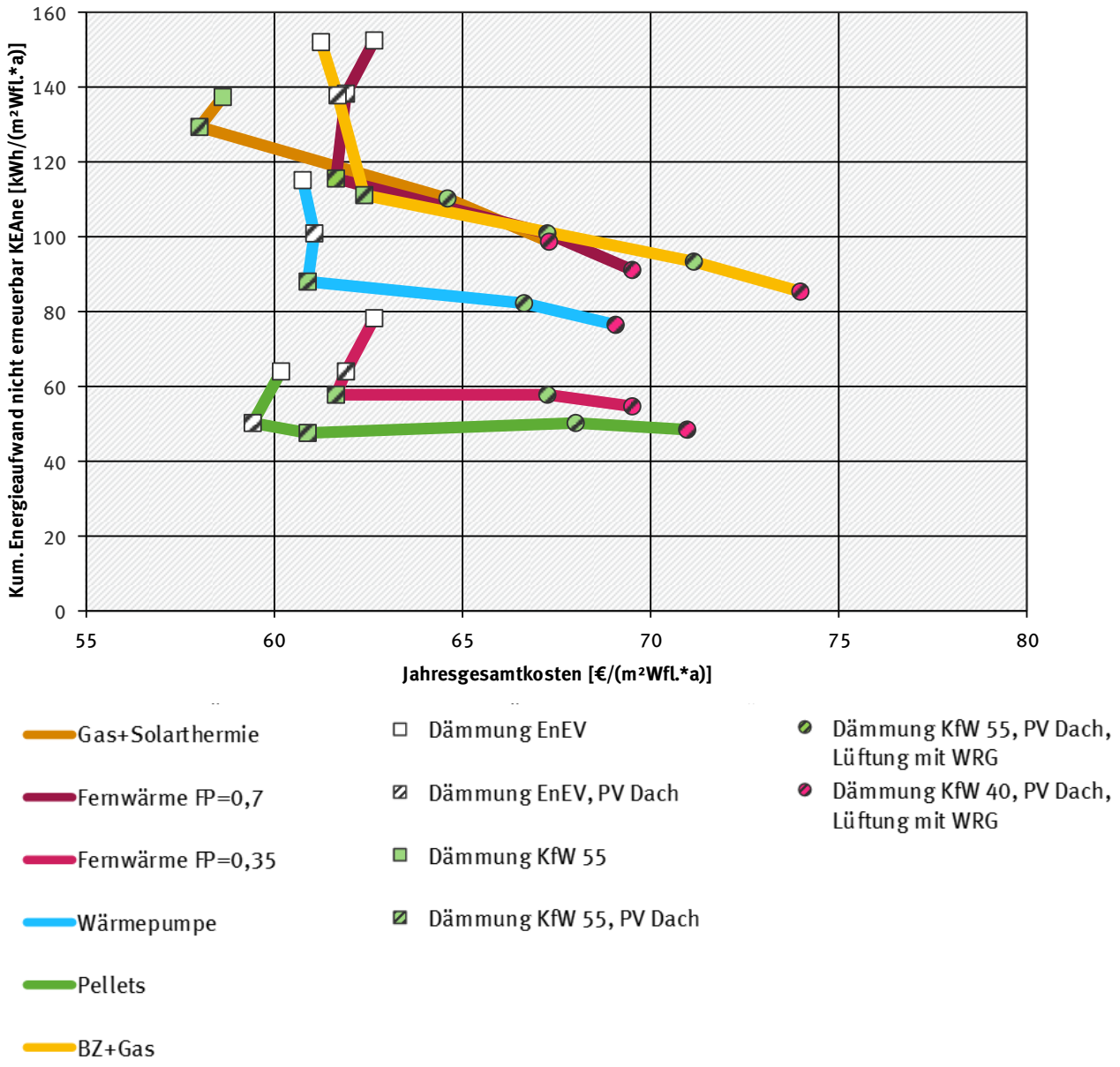
Abbildung 45: GWP/ Jahresgesamtkosten Energiekonzepte Sanierung EFH C



Quelle: Eigene Berechnungen

Die Verbesserungen hinsichtlich CO_2-Emissionen und KEAne korrelieren auch beim Typgebäude „EFH C“ tendenziell mit Ausnahme der fossilen Wärmeerzeugung, wie aus Abbildung 46 ersichtlich wird. Auch hier liegen die Wärmeversorgungsvarianten „Fernwärme f_P=0,7“, „Gas+Solarthermie“ und „Brennstoffzelle“ hinsichtlich KEAne näher beieinander.

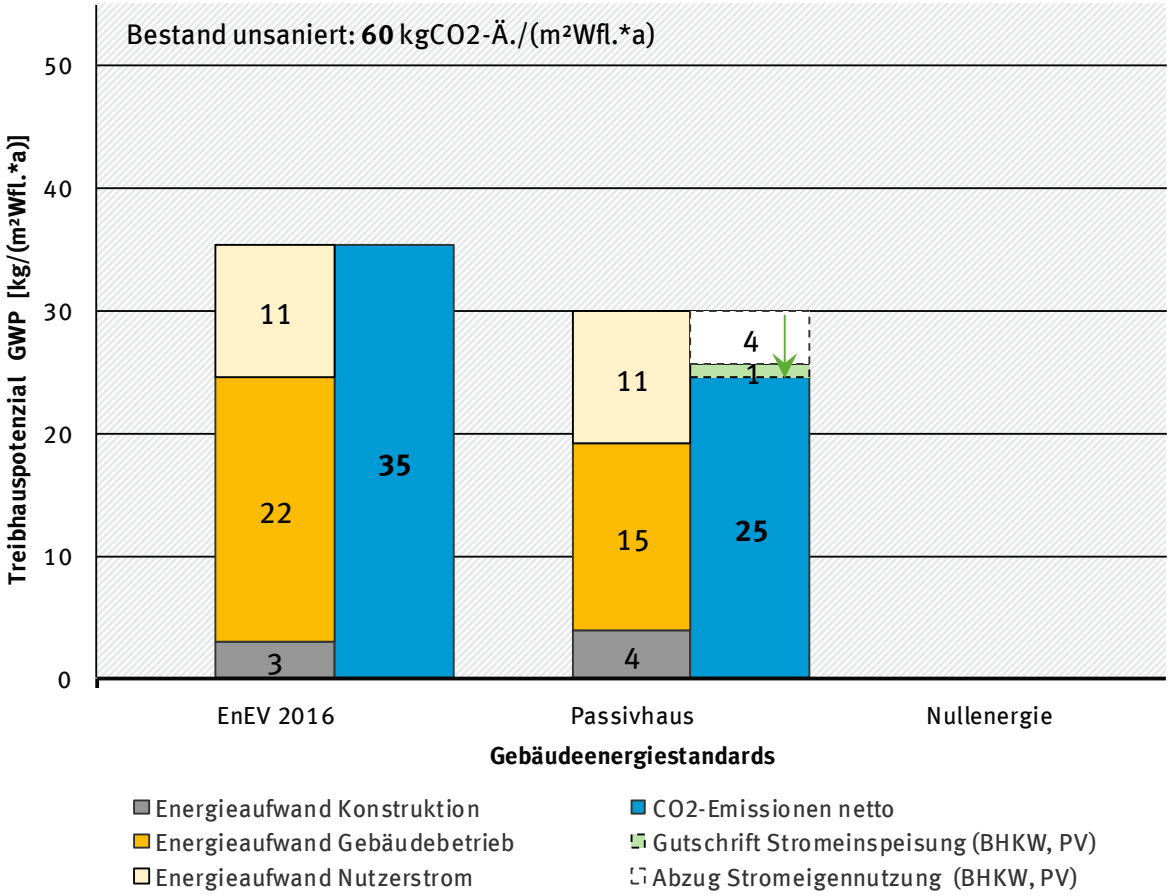
Abbildung 46: KEAne/ Jahresgesamtkosten der Energiekonzepte Sanierung EFH C



Quelle: Eigene Berechnungen

Die Aufteilung der CO_2-Emissionen der „üblichen Varianten“ sind in Abbildung 47 dargestellt. Der Anteil Konstruktion liegt bei 3 – 4 kgCO_2-Ä./(m²$_{Wfl.}$·a). Beim sanierten „EFH C“ auf EnEV-2016-Neubauniveau und Passivhaus-Standard im Bestand entfallen damit knapp 10 - 15 % der CO_2-Emissionen auf die Konstruktion.

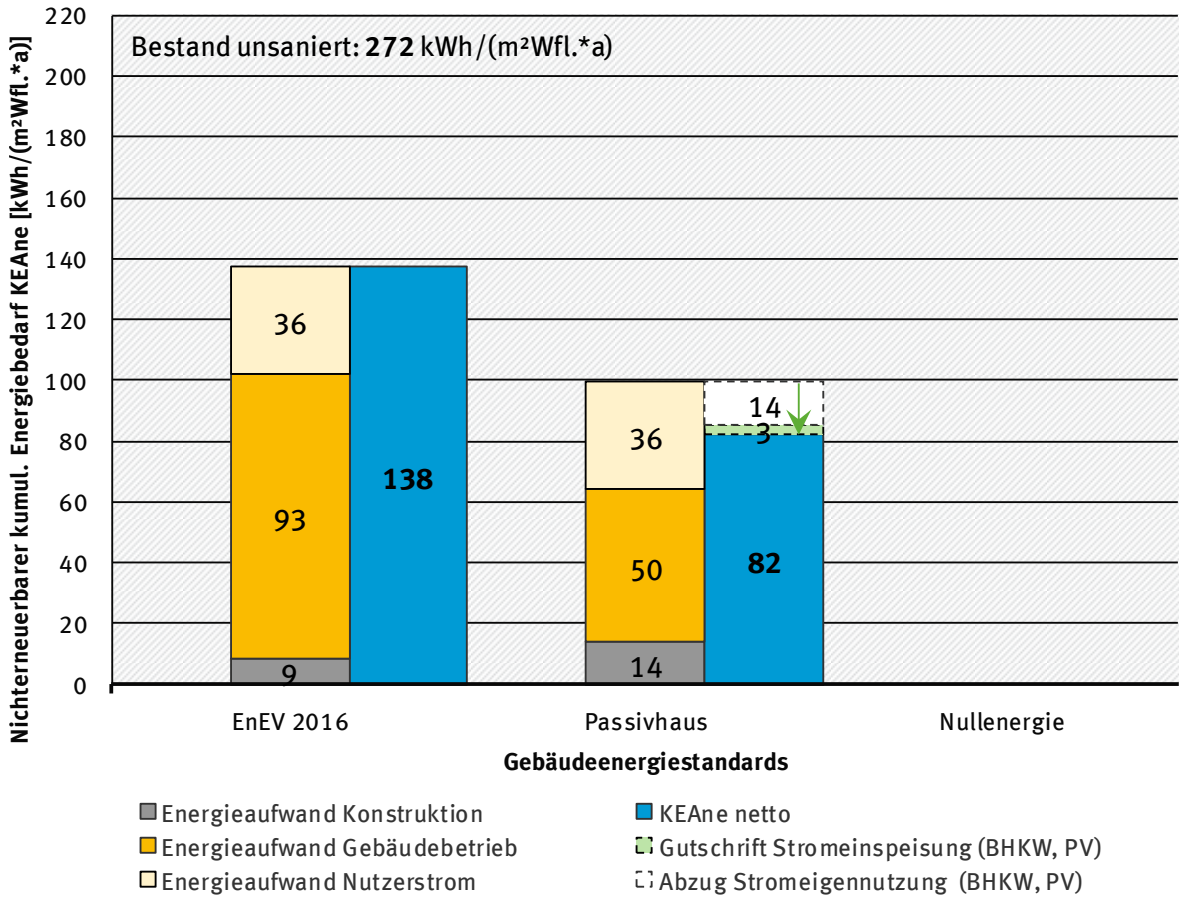
Abbildung 47: GWP der „üblichen Varianten“ Sanierung EFH C



Quelle: Eigene Berechnungen

Gemäß Abbildung 48 liegt der Anteil Konstruktion der üblichen Sanierungsvarianten bei 9 – 14 kWh/(m²Wfl.·a). Bei den Sanierungen auf EnEV-Neubauniveau und Passivhaus-Standard im Bestand entfallen damit 5 - 15 % des KEAne auf die Konstruktion.

Abbildung 48: KEAne der „üblichen Varianten“ Sanierung EFH C



Quelle: Eigene Berechnungen

3.4.3 Ökooptimierte Varianten

Im „EFH C“ wurden die „ökooptimierte Varianten“ gemäß Tabelle 43 abgeleitet.

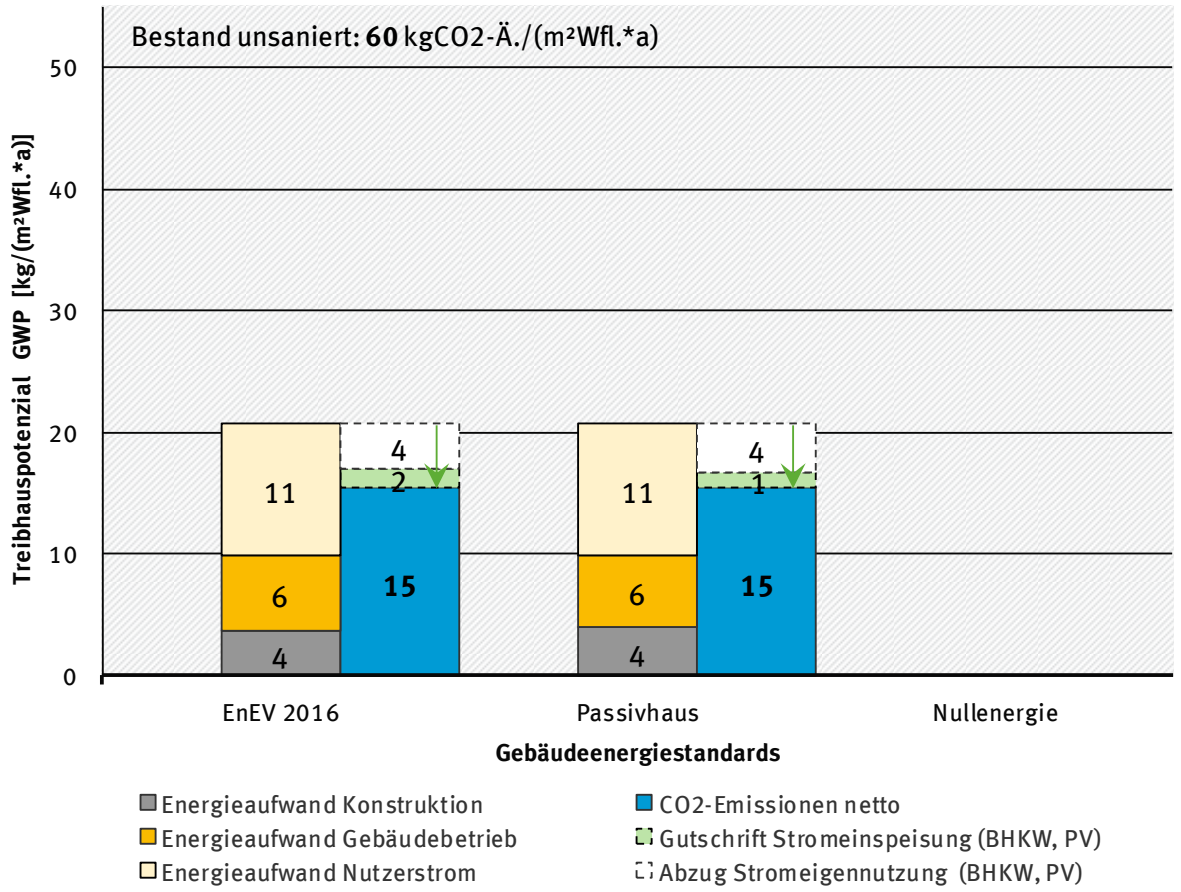
Tabelle 43: „Ökooptimierte Varianten“ Sanierung EFH C

EnEV 2016	Passivhaus	Nullenergie
Pellets	Pellets	-
EnEV 2016 (HT´)	KfW 55 (HT´)	-
Abluftanlage	Lüftung mit WRG	-
mit PV	mit PV	-

Quelle: Steinbeis-Transferzentrum EGS

In Abbildung 49 sind die Bilanzen der CO_2-Emissionen im Lebenszyklus der „ökooptimierten Varianten“ dargestellt. Auf die Gebäudekonstruktion entfallen 4 kgCO_2/(m²$_{Wfl.}$·a). Dies entspricht einem Anteil von knapp 20 % der CO_2-Emissionen für die Konstruktion.

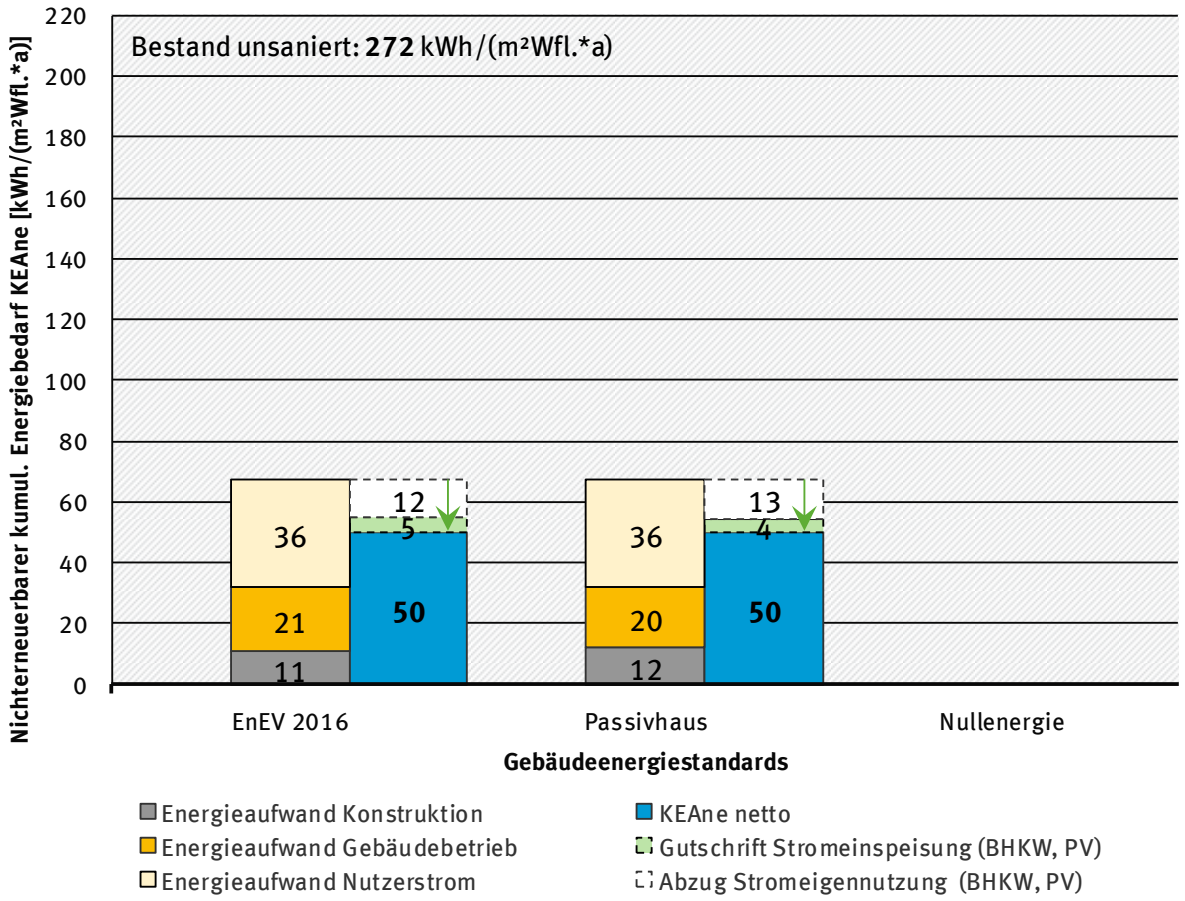
Abbildung 49: GWP der „ökooptimierten Varianten“ Sanierung EFH C



Quelle: Eigene Berechnungen

In Abbildung 50 wird der KEAne im Lebenszyklus der „ökooptimierten Varianten“ ausgewiesen. Der Anteil Konstruktion liegt bei 11 – 12 kWh/(m²$_{Wfl.}$·a). Dies entspricht einem Anteil von etwa 15 - 20 % des KEAne für die Konstruktion.

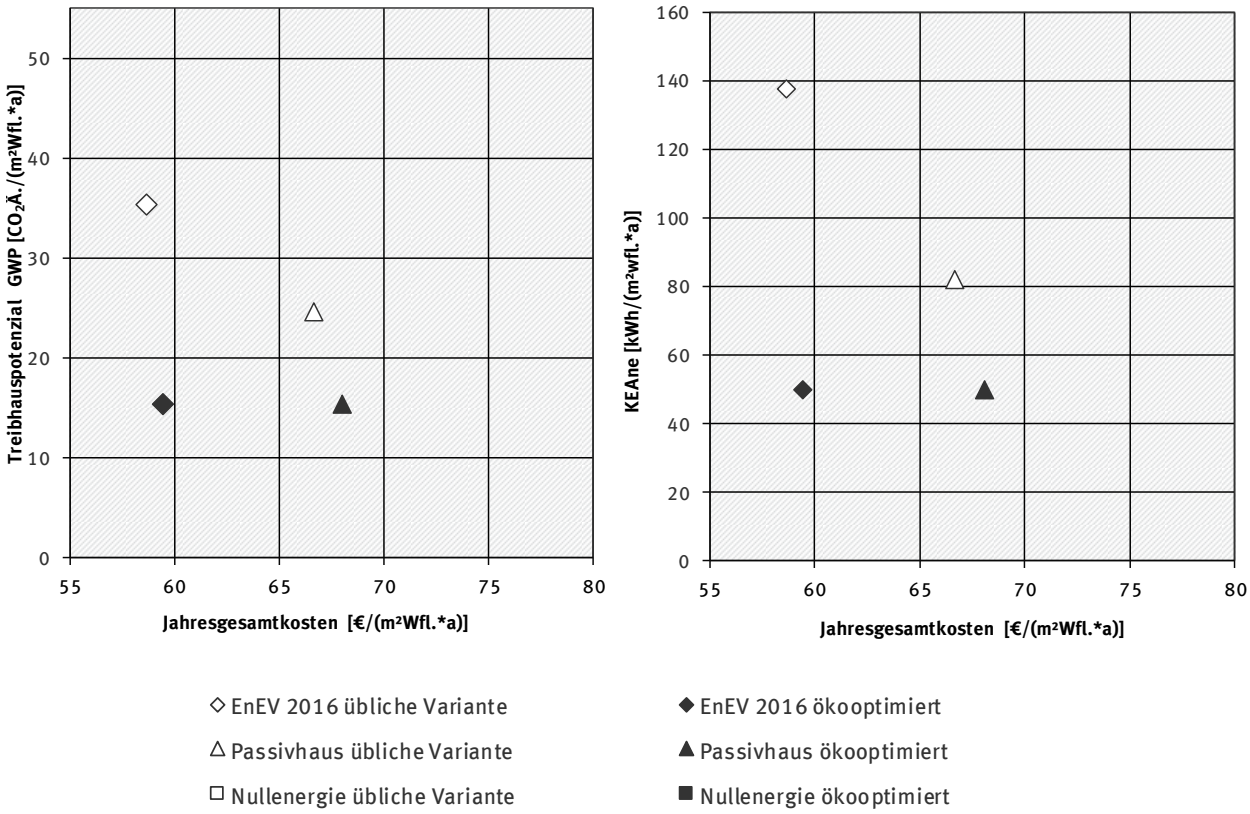
Abbildung 50: KEAne der „ökooptimierten Varianten“ Sanierung EFH C



Quelle: Eigene Berechnungen

Abbildung 51 zeigt zusammenfassend eine Gegenüberstellung der „üblichen“ und „ökooptimierten Varianten“ je Gebäudeenergiestandard hinsichtlich CO_2-Emissionen/ KEAne und Jahresgesamtkosten. Die „ökooptimierten Varianten“ der Gebäudeenergiestandards EnEV-2016 und Passivhaus erreichen beide 15 kgCO_2-Ä./(m²$_{Wfl.}$·a) bzw. 50 kWh/(m²$_{Wfl.}$·a) und liegen damit in ähnlicher Größenordnung wie im Neubau Mehrfamilienhaus. Die „ökooptimierten Varianten“ führen gegenüber den „üblichen Varianten“ zu geringen Kostensteigerungen.

Abbildung 51: GWP/ JKG und KEAne/ JGK Sanierungsvarianten EFH C



Quelle: Eigene Berechnungen

3.5 Sanierung EFH E

3.5.1 Untersuchte Varianten

Alle untersuchten Maßnahmenkombinationen bei der Sanierung des „EFH E“ sind in Tabelle 44 dargestellt. Die ausgewählten „üblichen Varianten“ sind durch eine schwarze Umrandung hervorgehoben.

Tabelle 44: Variantenmatrix Energiekonzepte Sanierung EFH E

Therm. Qualität Gebäude-hülle	Lüftungsart	ohne PV						mit PV Süd-Dach (40%)					
		Gas + Solar	Fernwärme fPE=0,70	Fernwärme fPE=0,35	Pellets	Wärmepumpe	Brennstoff-zelle + Gas	Gas + Solar	Fernwärme fPE=0,70	Fernwärme fPE=0,35	Pellets	Wärmepumpe	Brennstoff-zelle + Gas
EnEV 2016	Abluft		EnEV	EnEV	EnEV	EnEV	EnEV		EnEV	Null	Null	Null	EnEV
KfW 55	Abluft	EnEV	EnEV	EnEV	EnEV	EnEV	EnEV	EnEV	Null	Null	Null	Null	Null
KfW 40	Abluft	EnEV	EnEV	EnEV	EnEV	EnEV	EnEV	EnEV	Null	Null	Null	Null	Null
EnEV 2016	Lüftung m WRG		EnEV	EnEV	EnEV	EnEV	EnEV		EnEV	Null	Null	Null	Null
KfW 55	Lüftung m WRG	Passiv	Passiv	Passiv	Passiv	Passiv	Passiv	Passiv	Null	Null	Null	Null	Null
KfW 40	Lüftung m WRG	Passiv	Passiv	Passiv	Passiv	Passiv	Passiv	Null	Null	Null	Null	Null	Null

Die ausgewählten „üblichen Varianten“ sind durch eine schwarze Umrandung hervorgehoben.
Quelle: Eigene Berechnungen Steinbeis-Transferzentrum EGS auf Basis DIN V 18599

In Tabelle 45 sind die Technikkomponenten der „üblichen Variante“ zur Erreichung der jeweiligen Gebäudeenergiestandards für das sanierte Typgebäude „EFH E“ zusammengefasst.

Tabelle 45: Übliche Varianten Sanierung EFH E

EnEV 2016	Passivhaus	Nullenergie
Gas + Solarthermie	Wärmepumpe	Wärmepumpe
KfW 55 (HT´)	KfW 55 (HT´)	KfW 55 (HT´)
Abluftanlage	Lüftung mit WRG	Abluftanlage
ohne PV	mit PV	PV Dach

Quelle: Steinbeis-Transferzentrum EGS, Statistisches Bundesamt 2015, Diefenbach 2016, Passivhaus-Datenbank 2017

Die resultierenden Jahresgesamtkosten der Sanierungsvarianten für das „EFH E“ bezogen auf die kostengünstigste Variante sind in Tabelle 46 aufgeführt. Vergleichbar mit dem untersuchten Typgebäude „EFH C“ liegen die Sanierungsvarianten des „EFH E“ bei max. 28 % Mehrkosten. Ausgehend von einer Sanierung der Gebäudehülle auf EnEV-2016-Neubauniveau hat auch bei der Sanierung des „EFH E“ die Art der Wärmeversorgung den größten Einfluss auf die Jahresgesamtkosten. Wie beim „EFH C“ ist eine Wärmeversorgung durch eine Gastherme mit Solarthermie die mit Abstand günstigste Lösung gefolgt von einer Wärmepumpe (+ 3 %). Ein Brennstoffzellenkompaktgerät ist beim „EFH E“ mit nur einer Wohneinheit die mit Abstand kostenintensivste Lösung (+ 15 %). Eine kleine Photovoltaikanlage auf dem Gebäudedach lässt sich durch die hohe Eigenstromnutzung bei allen Varianten fast kostenneutral realisieren. Eine Verschärfung der Dämmung auf KfW Effizienzhaus 55 ist ebenfalls abhängig von Energieträger beinahe kostenneutral. Die beiden Maßnahmen Integration einer Lüftungsanlage mit WRG und eine weitere Verschärfung der Dämmung von KfW Effizienzhaus 55 auf KfW Effizienzhaus 40 sind jeweils mit 5 % Mehrkosten verbunden.

Tabelle 46: Jahresgesamtkosten Sanierung EFH E (ohne Energiepreissteigerung)

Therm. Qualität Gebäude-hülle	Lüftungsart	ohne PV					mit PV Dach (40%)				
		Gas + Solar	Fernwärme	Pellets	Wärmepumpe	Brennstoff-zelle + Gas	Gas + Solar	Fernwärme	Pellets	Wärmepumpe	Brennstoff-zelle + Gas
EnEV 2016	Abluft		109%	107%	104%	114%		109%	106%	104%	115%
KfW 55	Abluft	101%	108%	108%	103%	116%	100%	107%	108%	103%	116%
KfW 40	Abluft	106%	112%	114%	108%	121%	105%	111%	113%	108%	122%
EnEV 2016	Lüftung m WRG		114%	114%	109%	120%		113%	113%	109%	121%
KfW 55	Lüftung m WRG	106%	113%	116%	109%	122%	105%	112%	115%	109%	123%
KfW 40	Lüftung m WRG	111%	117%	121%	114%	128%	110%	116%	120%	114%	128%

Die ausgewählten „üblichen Varianten“ sind durch eine schwarze Umrandung hervorgehoben.
Quelle: Eigene Berechnungen Steinbeis-Transferzentrum EGS

Eine Energiepreissteigerung von 2 %/a auf alle Energieträger wirkt sich auf besonders energieeffiziente Varianten mit Eigenstromerzeugung durch Photovoltaikanlagen und Brennstoffzelle sowie hoher Eigenstromnutzung durch strombasierte Wärmeversorgung über Wärmepumpen und Lüftungsanlagen mit WRG kostensenkend aus. Die getroffenen Hauptaussagen ändern sich dadurch nicht. In den folgenden Auswertungen werden die Jahresgesamtkosten daher ohne Energiepreissteigerung dargestellt.

Tabelle 47: Jahresgesamtkosten Sanierung EFH E (2 %/a Energiepreissteigerung)

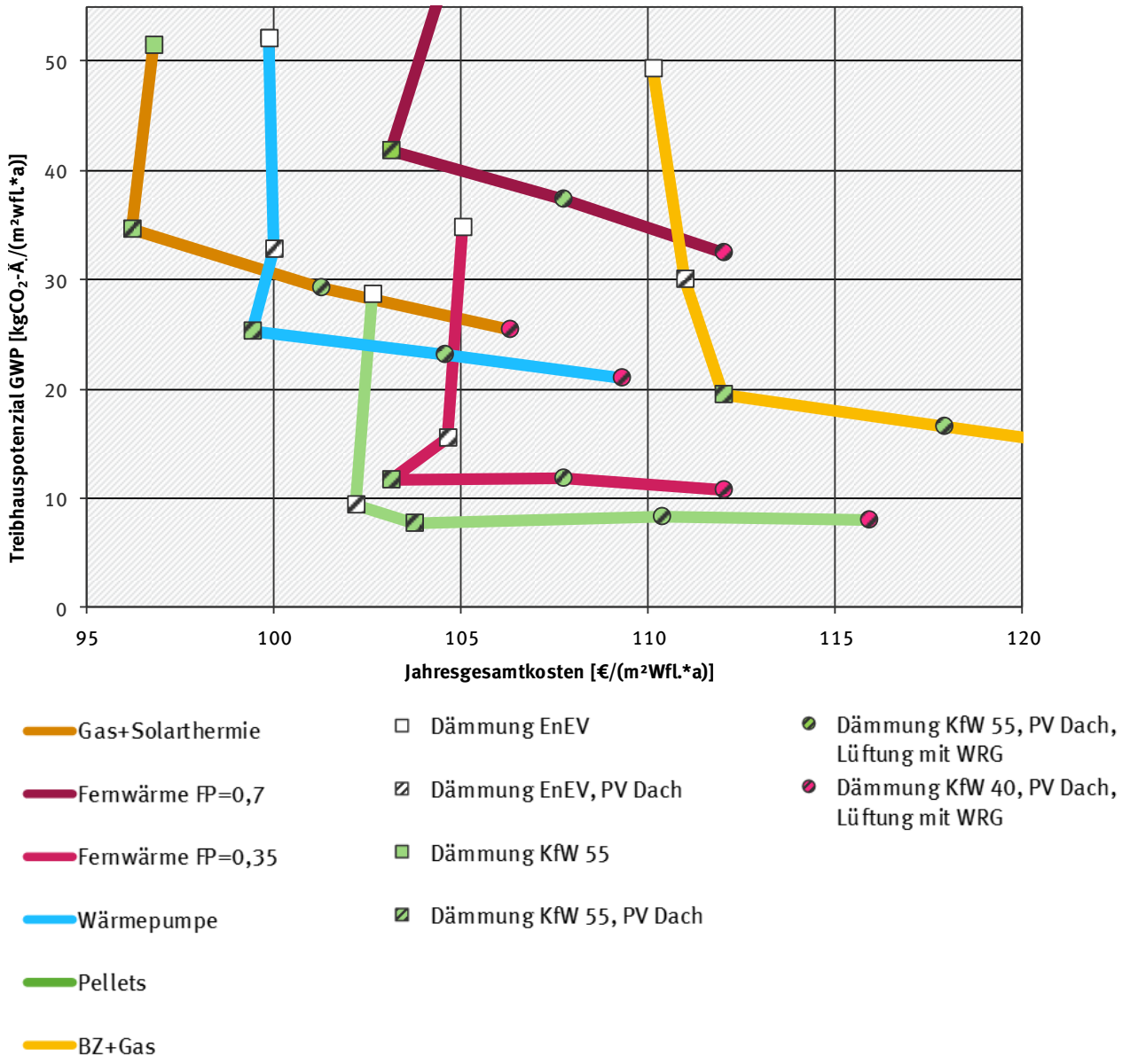
Therm. Qualität Gebäude-hülle	Lüftungsart	ohne PV					mit PV Dach (40%)				
		Gas + Solar	Fernwärme	Pellets	Wärmepumpe	Brennstoff-zelle + Gas	Gas + Solar	Fernwärme	Pellets	Wärmepumpe	Brennstoff-zelle + Gas
EnEV 2016	Abluft		113%	108%	105%	115%		112%	107%	105%	116%
KfW 55	Abluft	101%	110%	109%	104%	115%	100%	109%	108%	103%	116%
KfW 40	Abluft	106%	113%	114%	108%	120%	104%	112%	113%	107%	120%
EnEV 2016	Lüftung m WRG		117%	115%	111%	120%		115%	113%	109%	120%
KfW 55	Lüftung m WRG	106%	114%	116%	109%	121%	105%	112%	114%	108%	121%
KfW 40	Lüftung m WRG	111%	118%	121%	114%	126%	109%	116%	119%	112%	126%

Die ausgewählten „üblichen Varianten“ sind durch eine schwarze Umrandung hervorgehoben.
Quelle: Eigene Berechnungen Steinbeis-Transferzentrum EGS

3.5.2 KEAne und GWP

In Abbildung 52 sind die einzelnen Variantenkombinationen und die damit verbundenen CO_2-Emissionen (GWP) und die Jahresgesamtkosten der Sanierungskonzepte für das „EFH E“ dargestellt. Typisch für die Bestandssanierung prägt die Nutzungsphase den Gesamtenergieaufwand und die Art der Wärmeversorgung ist maßgeblich für die CO_2-Emissionen der Varianten. Durch die Variation der Wärmeversorgung mit entsprechendem Energieträger sind maximale CO_2-Einsparungen von 60 % (> 50 kgCO_2-Ä./(m²$_{Wfl.}$·a)) möglich. Die Einstufung der Wärmeversorgungsvarianten ist vergleichbar mit den Ergebnissen des „EFH C“. Die Wärmepumpenvarianten befinden sich auch hier genau im Mittelfeld flankiert von den Varianten mit Gastherme und Solarthermie mit etwas höheren CO_2-Emissionen und den Brennstoffzellenvarianten mit etwas geringeren CO_2-Emissionen. Durch das Satteldach ist das Solarpotenzial beim „EFH E“ etwas größer als beim „EFH C“. Die Einsparungen durch Photovoltaik belaufen sich auf fast 20 kgCO_2-Ä./(m²$_{Wfl.}$·a). In Abhängigkeit von der Wärmeversorgung bedeutet dies eine prozentuale Einsparung zwischen 25 – 65 % der CO_2-Emissionen. Eine Verbesserung der Gebäudehülle auf KfW Effizienzhaus 55 wirkt sich je nach Energieträger mit einer weiteren Reduktion von 15 – 35 % (2 – 15 kgCO_2-Ä./(m²$_{Wfl.}$·a)) aus. Die Integration einer Lüftung mit Wärmerückgewinnung wirkt sich auch hier aus energetischer Sicht nur bei fossil dominierter Versorgung mit einer Reduktion von max. 15 % oder 6 kgCO_2-Ä./(m²$_{Wfl.}$·a) positiv aus. Bei einer regenerativen Wärmeversorgung führt die Lüftungsanlage mit WRG auch hier zu insgesamt höheren CO_2-Emissionen. Eine zusätzliche Verschärfung der Dämmung von KfW Effizienzhaus 55 auf KfW Effizienzhaus 40 wirkt sich mit einer weiteren Reduktion von bis zu 15 % (0 – 5 kgCO_2-Ä./(m²$_{Wfl.}$·a)) ebenfalls bei fossil dominierter Wärmeerzeugung höher aus und ist bei regenerativer Wärmeversorgung nicht zu empfehlen.

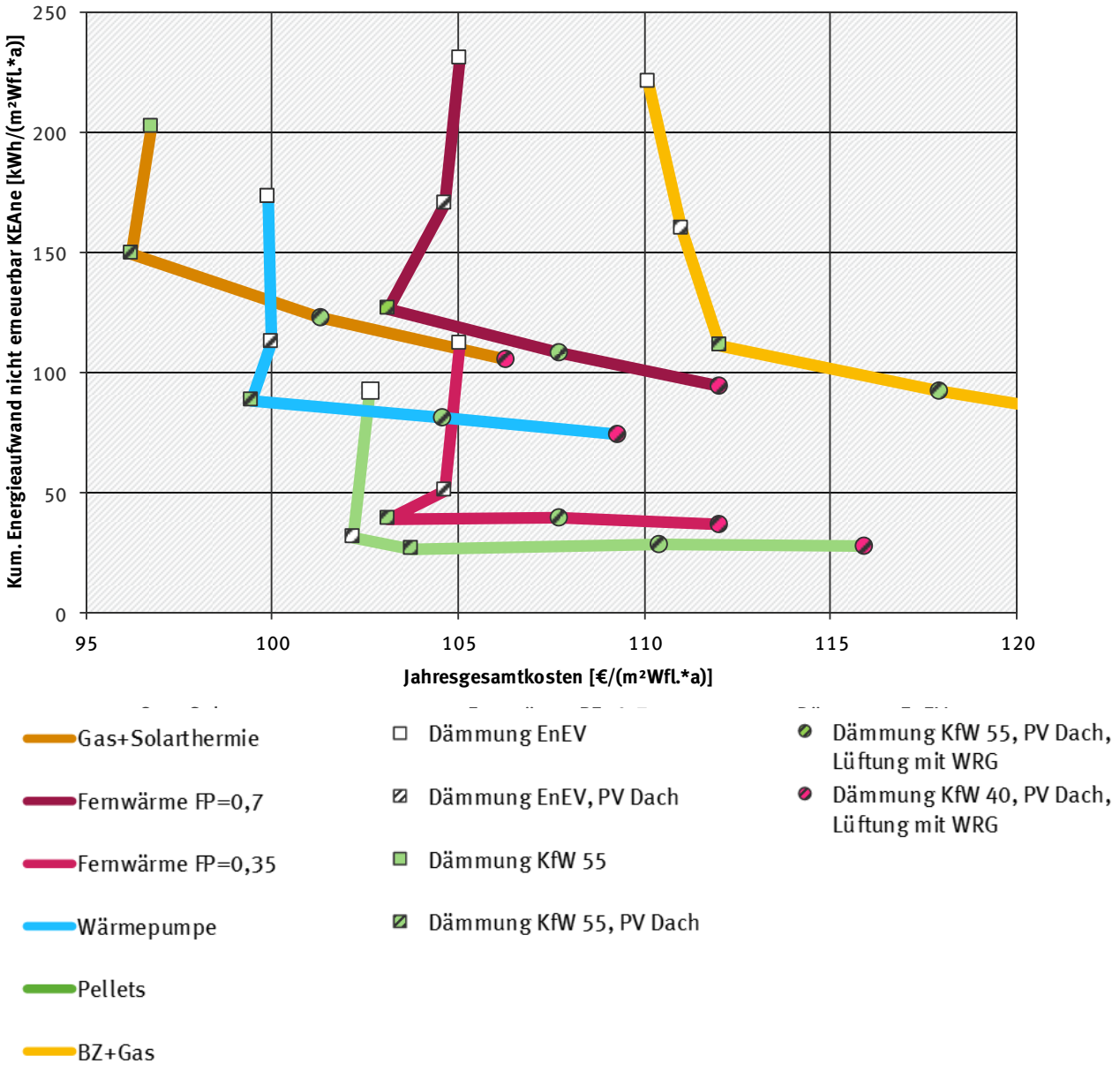
Abbildung 52: GWP/ Jahresgesamtkosten Energiekonzepte Sanierung EFH E



Quelle: Eigene Berechnungen

Die Verbesserungen hinsichtlich CO_2-Emissionen und KEAne korrelieren auch beim Typgebäude „EFH E“ tendenziell mit Ausnahme der fossilen Wärmeerzeugung, wie aus Abbildung 53 ersichtlich wird. Auch hier liegen die Wärmeversorgungsvarianten „Fernwärme f_P=0,7“, „Gas+Solarthermie“ und „Brennstoffzelle“ hinsichtlich KEAne nahe beieinander und bilden die obere Grenze. Die Wärmepumpenvarianten befinden sich hinsichtlich KEAne im Mittelfeld.

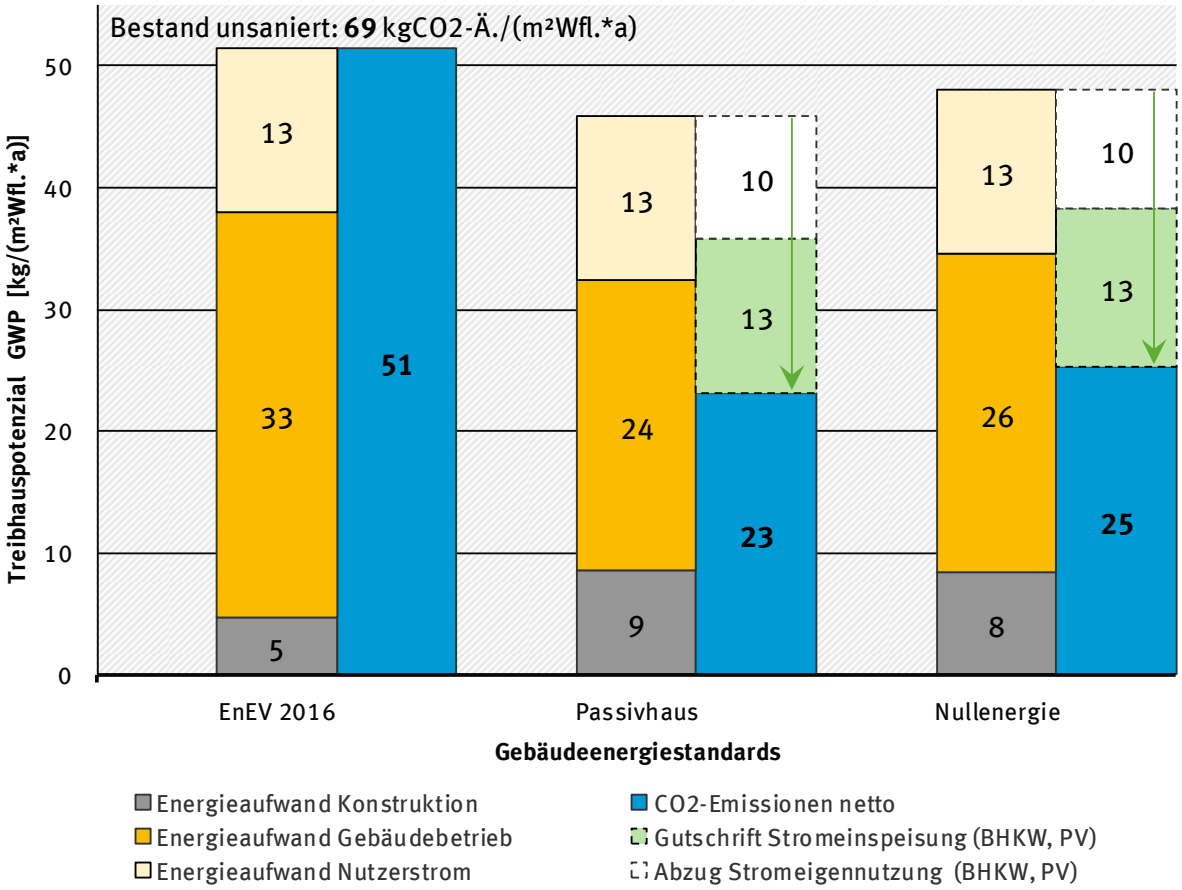
Abbildung 53: KEAne/ Jahresgesamtkosten der Energiekonzepte Sanierung EFH E



Quelle: Eigene Berechnungen

Die Aufteilung der CO_2-Emissionen der „üblichen Varianten“ sind in Abbildung 54 dargestellt. Der Anteil Konstruktion liegt bei allen Varianten bei 5 – 9 kgCO_2-Ä./(m²$_{Wfl.}$·a). Beim sanierten „EFH E“ auf EnEV-Neubauniveau entfallen knapp 10 % der CO_2-Emissionen auf die Konstruktion. Bei einer üblichen Sanierung auf Passivhaus-Standard im Bestand und Nullenergieniveau steigt der Anteil Konstruktion durch die lokale Stromerzeugung an den verbleibenden CO_2-Emissionen auf knapp 20 %.

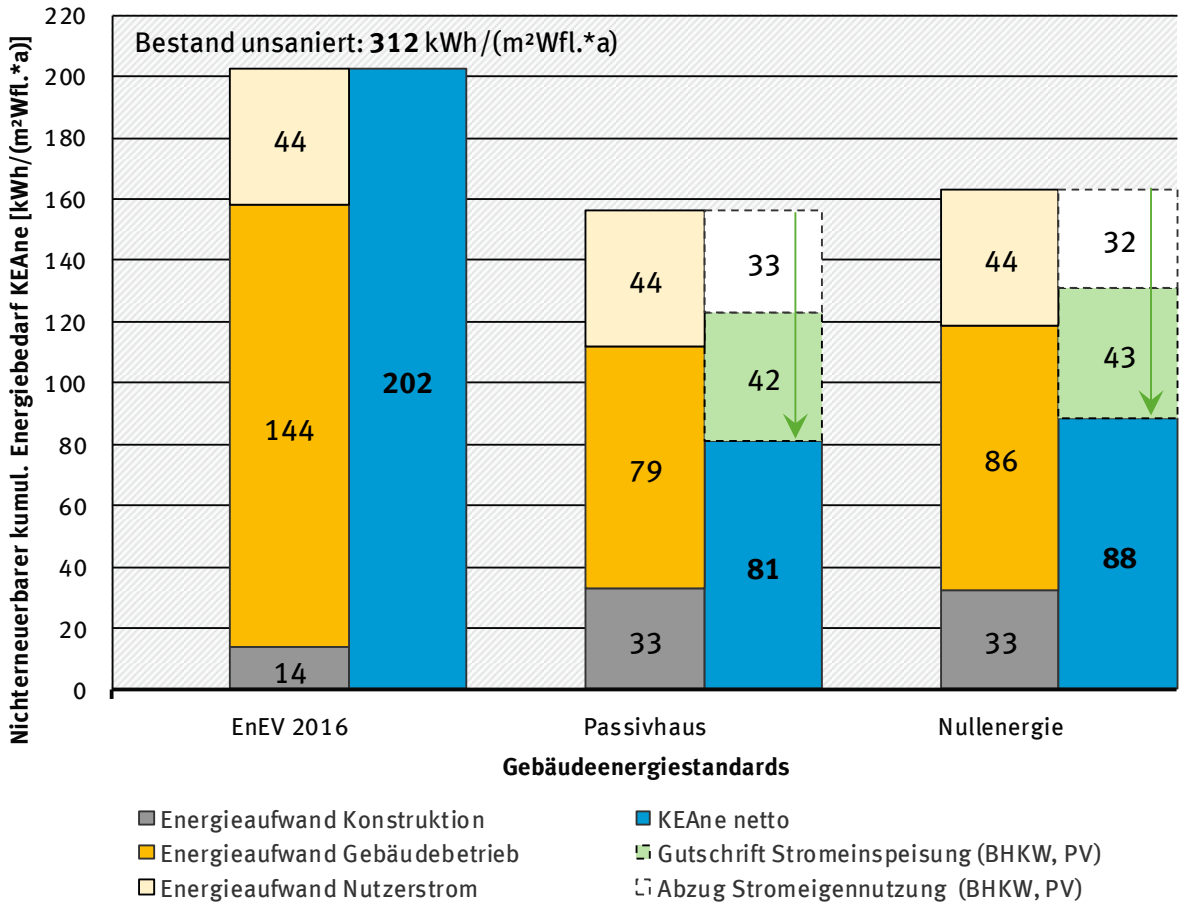
Abbildung 54: GWP der „üblichen Varianten“ Sanierung EFH E



Quelle: Eigene Berechnungen

Gemäß Abbildung 55 entfällt auf die Gebäudekonstruktion der üblichen Varianten“ insgesamt 14 – 33 kWh/(m²$_{Wfl.}$·a). Bei Sanierungen auf EnEV-2016-Neubauniveau entspricht der Konstruktionsanteil mehr als 5 % des KEAne. Bei einer üblichen Sanierung auf Passivhaus-Standard im Bestand und Nullenergieniveau steigt der Anteil Konstruktion auf etwa 20 % des KEAne.

Abbildung 55: KEAne der „üblichen Varianten“ Sanierung EFH E



Quelle: Eigene Berechnungen

3.5.3 Ökooptimierte Varianten

Im „EFH E“ wurden die „ökooptimierte Varianten“ gemäß Tabelle 48 abgeleitet.

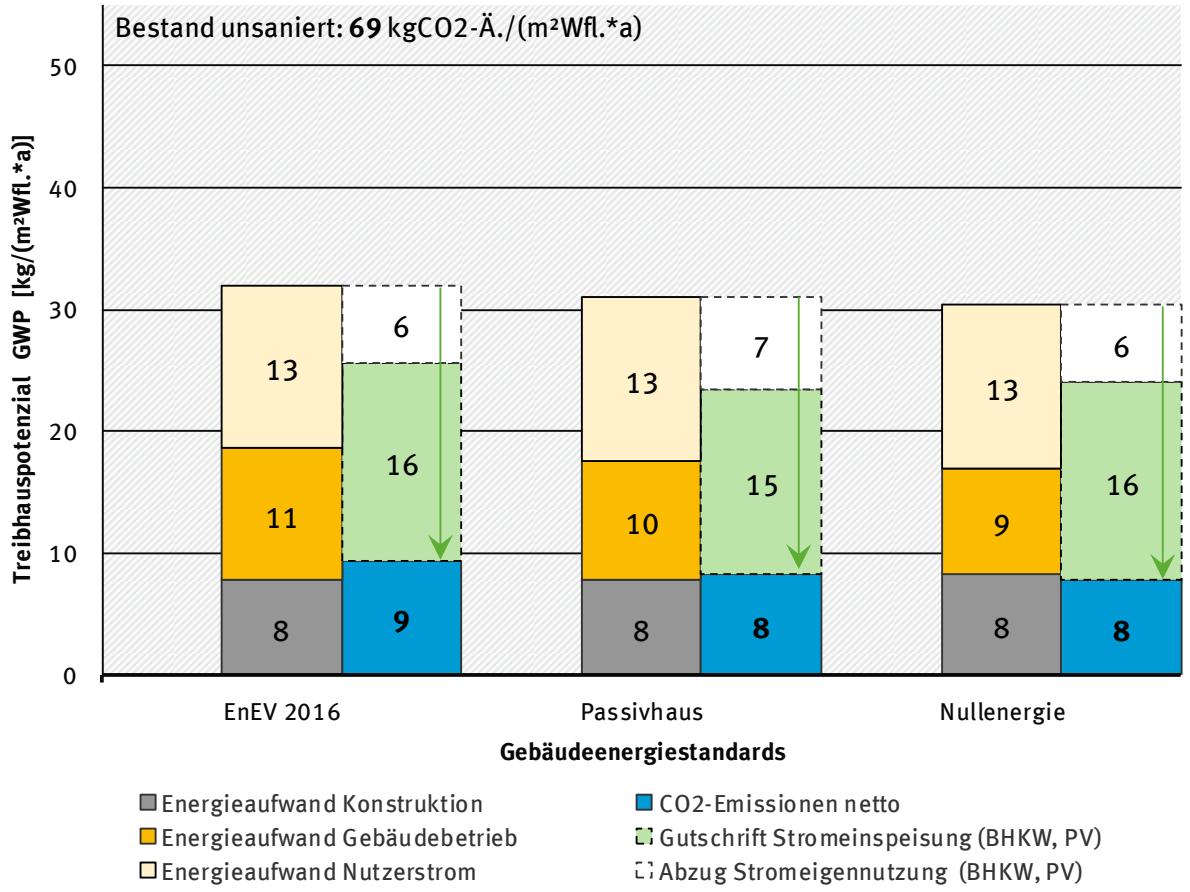
Tabelle 48: „Ökooptimierte Varianten“ Sanierung EFH E

EnEV 2016	Passivhaus	Nullenergie
Pellets	Pellets	Pellets
EnEV 2016 (HT´)	KfW 55 (HT´)	KfW 55 (HT´)
Abluftanlage	Lüftung mit WRG	Abluftanlage
mit PV	PV Dach	PV Dach

Quelle: Steinbeis-Transferzentrum EGS

In Abbildung 56 sind die Bilanzen der CO_2-Emissionen im Lebenszyklus der „ökooptimierten Varianten“ dargestellt. Auf die Gebäudekonstruktion entfallen hier 8 $kgCO_2/(m^2_{Wfl.} \cdot a)$. Dies entspricht einem Anteil von etwa 25 % der CO_2-Emissionen für die Konstruktion.

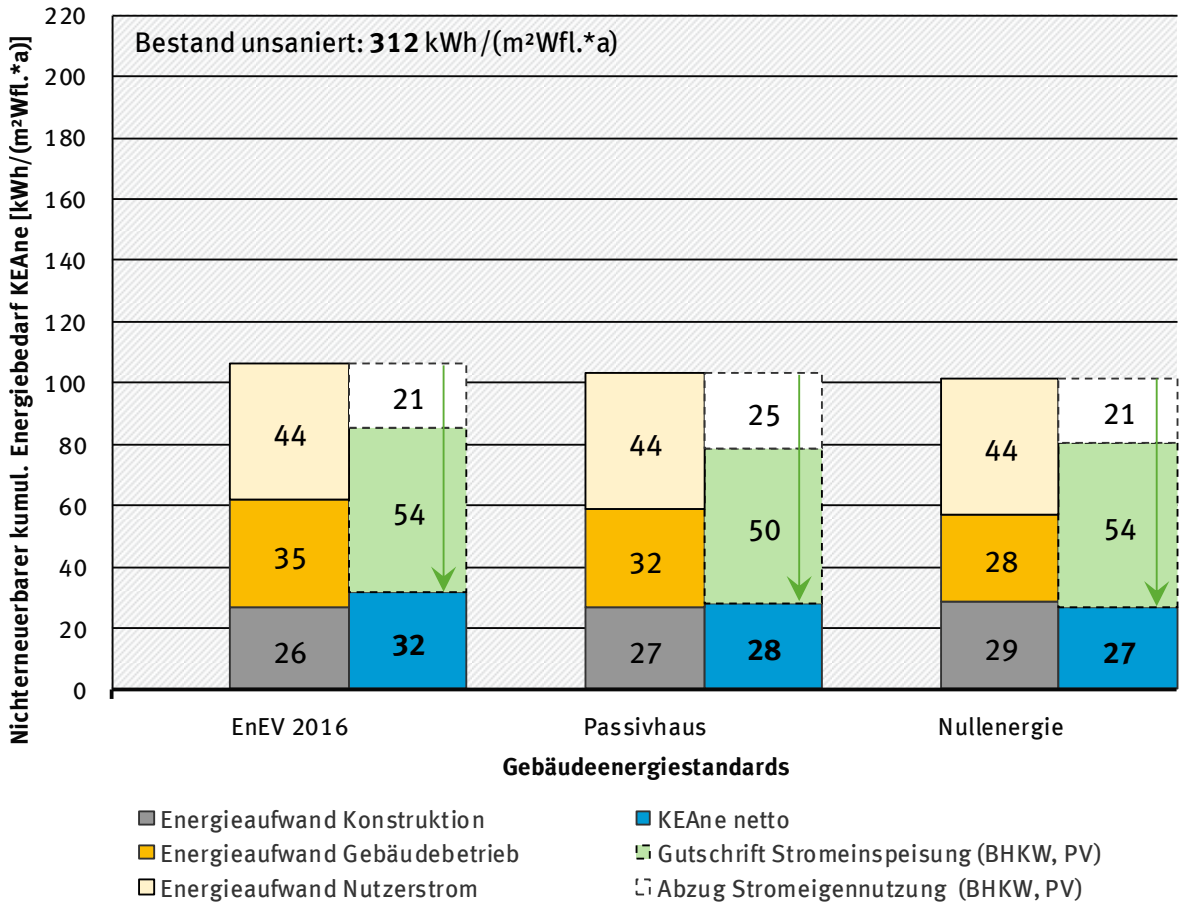
Abbildung 56: GWP der „ökooptimierten Varianten“ Sanierung EFH E



Quelle: Eigene Berechnungen

In Abbildung 57 wird der KEAne im Lebenszyklus der „ökooptimierten Varianten“ ausgewiesen. Der Anteil Konstruktion liegt bei 26 – 29 kWh/(m²$_{Wfl.}$·a). Dies entspricht einem Anteil von etwa 25 – 30 % des KEAne für die Konstruktion.

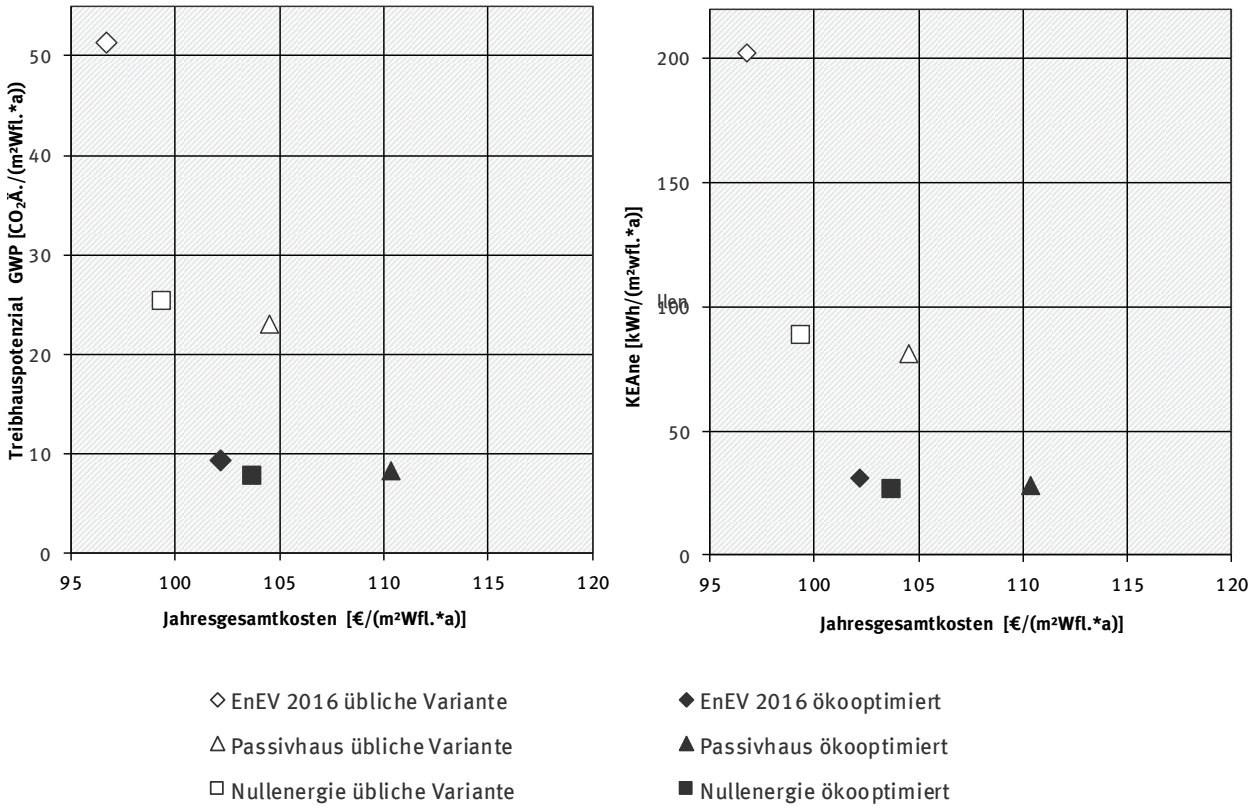
Abbildung 57: KEAne der „ökooptimierten Varianten“ Sanierung EFH E



Quelle: Eigene Berechnungen

Abbildung 58 zeigt zusammenfassend eine Gegenüberstellung der „üblichen“ und „ökooptimierten“ Varianten je Gebäudeenergiestandard hinsichtlich CO_2-Emissionen/ KEAne und Jahresgesamtkosten. Alle „ökooptimierten Varianten“ erreichen CO_2-Emissionen > 10 kgCO_2-Ä./(m²$_{Wfl.}$·a) bzw. etwa 30 kWh/(m²$_{Wfl.}$·a) und liegen damit in ähnlicher Größenordnung wie im Neubau Einfamilienhaus. Die Kostensteigerungen der „ökooptimierten Varianten“ gegenüber der „üblichen Ausführung“ sind auf die Wärmeversorgung mit Holzpellets zurückzuführen.

Abbildung 58: GWP/ JGK und KEAne/ JGK Sanierungsvarianten EFH E



Quelle: Eigene Berechnungen

4 Vergleichende Betrachtung

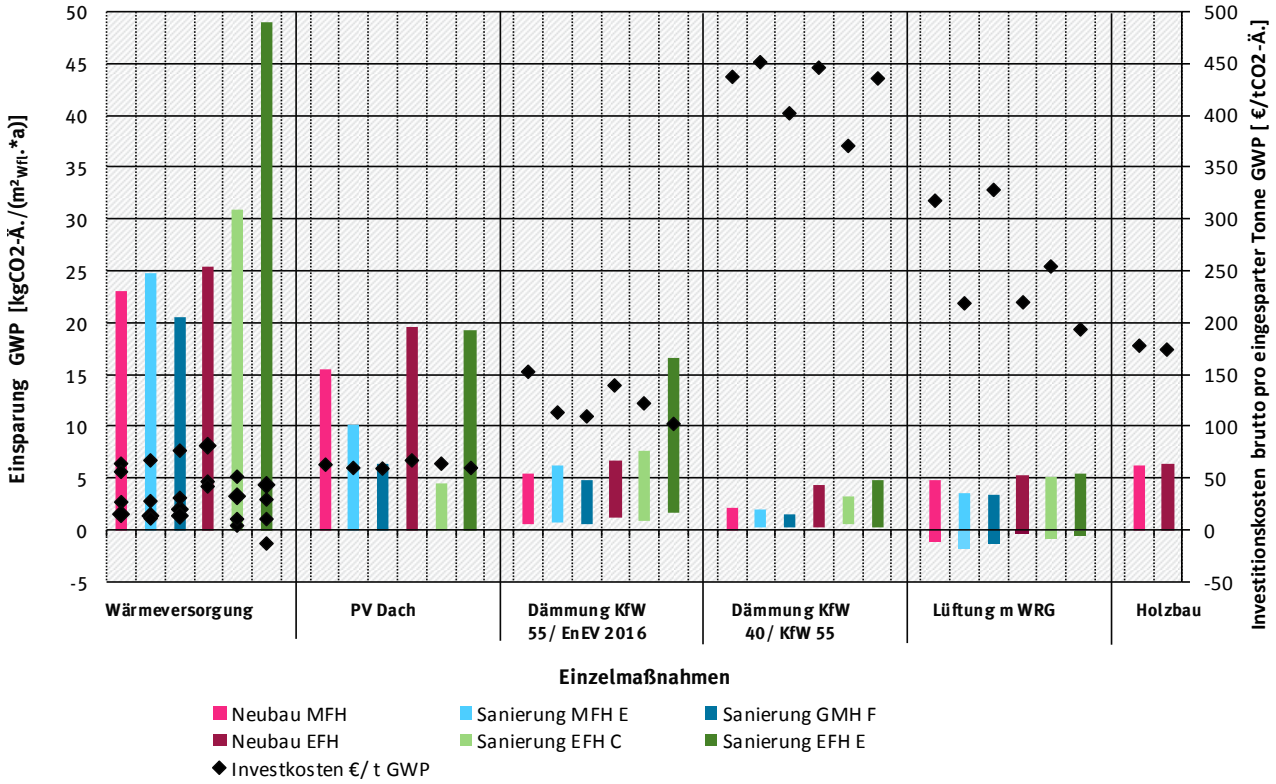
4.1 Einzelmaßnahmen

Die Wirksamkeit der Einzelmaßnahmen an allen untersuchten Typgebäuden wird anhand zweier Parameter, einer absoluten jährlichen Einsparung an CO_2-Emissionen pro m² Wohnfläche (Säulen) und einer monetären Bewertung über die Investitionskosten brutto (Rauten), bewertet (Abbildung 59). Hierbei werden folgende Maßnahmen verglichen:

- unterschiedlichen Wärmeversorgungsvarianten
- eine Ausführung mit PV-Dachanlage gegenüber einer Ausführung ohne PV-Dachanlage
- eine Dämmung gemäß KfW Effizienzhaus 55 gegenüber einer Dämmung nach EnEV-2016 Neubauniveau
- eine Dämmung gemäß KfW Effizienzhaus 40 gegenüber einer Dämmung nach EnEV-2016 Neubauniveau
- einer Ausführung mit Lüftungsanlage mit WRG gegenüber einer reinen Abluftanlage
- eine Ausführung in Holzbauweise gegenüber einer Massivbauweise

Bei der Wärmeversorgung wird die maximale CO_2-Einsparung durch Holzpellets im Vergleich zu der fossilen Fernwärme mit $f_p = 0{,}7$ erreicht. Diese liegen für alle Typgebäude bei etwa 20 – 50 kgCO_2-Ä./(m²$_{Wfl.}$·a). Die Einsparungen aller anderen Wärmeversorgungsvarianten untereinander befinden sich innerhalb dieser Spreizung. Die Bandbreite der Wirksamkeit unterschiedlicher Wärmeversorgungstechniken ist aufgrund der unterschiedlichen Investitionskosten und den erreichbaren CO_2-Einsparungen hoch und liegt bei allen Gebäuden zwischen -10 bis 80 €/tCO_2-Ä. Die Kosteneffizienz ist im Einfamilienhausbereich im Bestand höher als bei den anderen Typgebäuden. Die Wirksamkeit einer gebäudeintegrierten Photovoltaikanlage auf dem Gebäudedach sind stark abhängig vom verfügbaren Dachpotenzial und liegt im Neubau und Bestand bei 5 – 20 kgCO_2-Ä./(m²$_{Wfl.}$·a). Unabhängig von der Größe einer Photovoltaikanlage belaufen sich die Kosten auf 60 – 70 €/tCO_2-Ä.

Abbildung 59: Kosteneffizienz von Einzelmaßnahmen in Neubau und Sanierung



Quelle: Eigene Berechnungen

Die Wirksamkeit einer verbesserten Dämmung gemäß KfW Effizienzhaus 55 im Vergleich zu einer Dämmung nach EnEV-2016-Neubauniveau ist stark abhängig vom eingesetzten Energieträger in der Wärmeversorgung und liegt bei 0,5 kgCO_2-Ä./(m²$_{Wfl.}$·a) bei regenerativer Wärmeversorgung bis max. 17 kgCO_2-Ä./(m²$_{Wfl.}$·a) bei einem fossilen Energieträger. Im Einfamilienhausbereich wirkt sich die verbesserte Dämmung aufgrund des höheren A/V-Verhältnis stärker aus. Bei der maximal möglichen CO_2-Einsparung schwanken die Kosten für eine Dämmung nach KfW Effizienzhaus 55 im Vergleich zum EnEV-2016-Neubauniveau je nach Gebäude zwischen 100 – 150 €/tCO_2-Ä. Eine schrittweise Verbesserung der Dämmung gemäß KfW Effizienzhaus 55 auf eine Dämmung gemäß KfW Effizienzhaus 40 wirkt sich mit 0,2 – 5 kgCO_2-Ä./(m²$_{Wfl.}$·a) geringer aus. Eine Wirksamkeit ist im Einfamilienhausbereich mit fossiler Wärmeversorgung sichtbar und im Mehrfamilienhausbereich eher gering. Die resultierenden Mehrkosten gegenüber einer Dämmung gemäß KfW Effizienzhaus 55 basieren auch hier auf der maximal erreichbaren CO_2-Einsparung und liegen mit 370 – 450 €/tCO_2-Ä. am höchsten. Die Einsparungen an CO_2-Emissionen durch die Installation einer Lüftungsanlage mit WRG gegenüber einer Abluftanlage sind abhängig vom eingesetzten Energieträger. Bei einer regenerativen Wärmeversorgung führt die Maßnahme zu höheren CO_2-Emissionen und ist rein aus Komfortgründen zu argumentieren. Bei einer fossilen Wärmeversorgung kann eine Wärmerückgewinnung je nach Typgebäude 3 – 5 kgCO_2-Ä./(m²$_{Wfl.}$·a) einsparen. In diesem Fall liegen die Investitionsmehrkosten bei 200-330 €/tCO_2-Ä. Eine Holzbauweise im Neubau kann im Vergleich zum konventionellen Massivbau ca. 6 kgCO_2-Ä./(m²$_{Wfl.}$·a) einsparen. Die Investitionsmehrkosten sind mit ca. 175 – 180 €/tCO_2-Ä. etwas höher als eine verbesserte Wärmedämmung gemäß KfW Effizienzhaus 55.

Ein Szenario geht von einem Preisanstieg für CO_2-Zertifikate bis 124 €/tCO_2-Ä. im Jahr 2050 aus (vgl. BCG/Prognos 2018). Demnach sind Maßnahmen im Bereich Wärmeerzeugung, Photovoltaik, eine verbesserte Dämmung gemäß KfW Effizienzhaus 55 und alternative Bauweisen monetär betrachtet attraktiv.

4.2 Mehrfamilienhauskonzepte

Die Energiekonzepte für Neubau und Sanierung im Mehrfamilienhausbereich werden in Abbildung 60 und Abbildung 61 gegenübergestellt und in Bezug auf erreichbare CO_2-Emissionen und den damit verbundenen JGK verglichen. Die Ergebnisse der Variantenkombinationen werden je nach Erreichung der Gebäudeenergiestandards EnEV-2016, Passivhaus, Nullenergie und Plusenergie eingeordnet. In Magenta sind die Neubauvarianten in konventioneller Massivbauweise abgebildet und rosa markiert sind Neubauvarianten in Holzbauweise. Hell- und dunkelgrün stehen für die Sanierungsvarianten der Typgebäude „MFH E“ und „GMH F“. Die in dem jeweiligen Gebäudestandard üblicherweise ausgeführten Variantenkombinationen sind mit einem schwarzen Querbalken gekennzeichnet.

Wie aus Abbildung 60 hervorgeht, kann die Vorgabe eines Gebäudeenergiestandards zu CO_2-Einsparungen führen, sie ist jedoch kein genereller Garant dafür. Die bestehenden Gebäudeenergiestandards bewerten nur die Nutzungsphase der Gebäude. Dort sind die Art der Wärmeversorgung sowie der Einsatz einer Photovoltaikanlage und erst im weiteren Schritt eine verbesserte Dämmung gemäß KfW Effizienzhaus 55 oder KfW Effizienzhaus 40 entscheidend. Der Grenzwert für den einzuhaltenden Primärenergiefaktor der Wärme und Stromversorgung der Gebäude ist bei den Gebäudeenergiestandards EnEV-2016 und Passivhaus zu hoch um ausreichend Wirkung im Hinblick auf die Klimaschutzziele zu entfalten.

Übliche Varianten im EnEV-2016 und Passivhaus-Standard führen im Neubau zu CO_2-Emissionen in ähnlicher Höhe von etwa 40 $kgCO_2$-Ä./($m^2_{Wfl.}$·a). Die Vorgabe eines Nullenergiestandards führt im Neubau meist zum Einsatz einer Wärmepumpe mit Photovoltaik und hat zur Folge, dass die CO_2-Emissionen auf 20 $kgCO_2$-Ä./($m^2_{Wfl.}$·a) sinken. Die Vorgabe eines Plusenergiestandards führt zu einer weiteren Reduzierung der CO_2-Emissionen auf 15 $kgCO_2$-Ä./($m^2_{Wfl.}$·a). Werden Neubauten alternativ in Holzbauweise errichtet sind CO_2-Emissionswerte < 10 $kgCO_2$-Ä./($m^2_{Wfl.}$·a) erreichbar.

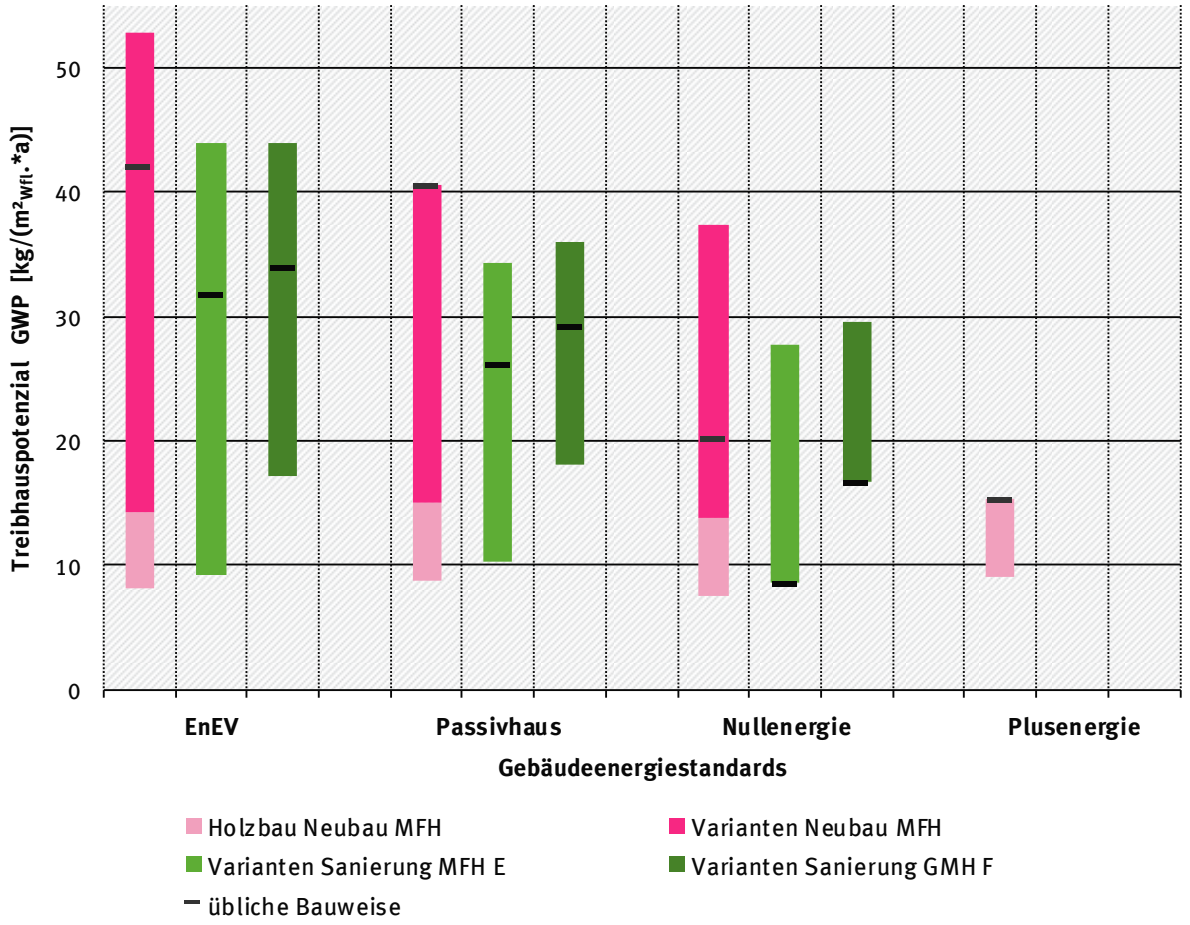
Die Spreizung von CO_2-Emissionen der Variantenkombinationen innerhalb der Gebäudeenergiestandards zeigt jedoch, dass es auch innerhalb eines Gebäudeenergiestandards große Unterschiede in der Umweltwirkung gibt. So können Nullenergiegebäude mit einer fossilen Wärmeerzeugung beinahe ähnlich hohe CO_2-Emissionen aufweisen wie übliche EnEV-2016 oder Passivhaus-Gebäude. Gleichzeitig können ökooptimierte EnEV-2016 oder Passivhaus-Gebäude mit regenerativer Wärmeerzeugung und Photovoltaik CO_2-Emissionen in Höhe eines Plusenergiegebäudes erreichen.

Im Bestand wird durch die Vorgabe eines Gebäudeenergiestandards mit den üblicherweise umgesetzten Varianten eine sinkende Tendenz der CO_2-Emissionen sichtbar. Gleichzeitig bleibt die Spannweite der Emissionen innerhalb der Gebäudeenergiestandards hoch.

Im Vergleich zum Neubau sind durch Sanierungskonzepte im Bestand durchgehend geringere CO_2-Emissionen ohne die Änderungen der Baukonstruktion erreichbar. Die CO_2-Emissionen der „üblichen Varianten“ liegen für den Bestand sogar um 20 – 50 % unter dem Neubau. Neubaugebäude im Plusenergiestandard und sanierte Nullenergiegebäude erreichen vergleichbare CO_2-Emissionswerte. Insgesamt sind im Mehrfamilienhausbereich für Neubau und Bestandssanierung CO_2-Emissionswerte von 10 bis 15 $kgCO_2$-Ä./($m^2_{Wfl.}$·a) erreichbar.

Im Anhang C ist die vergleichende Betrachtung hinsichtlich KEAne ergänzend dargestellt. Der im Mehrfamilienhausbereich für Neubau und Bestandssanierung erreichbare KEAne beträgt 30 – 50 kWh/($m^2_{Wfl.}$·a).

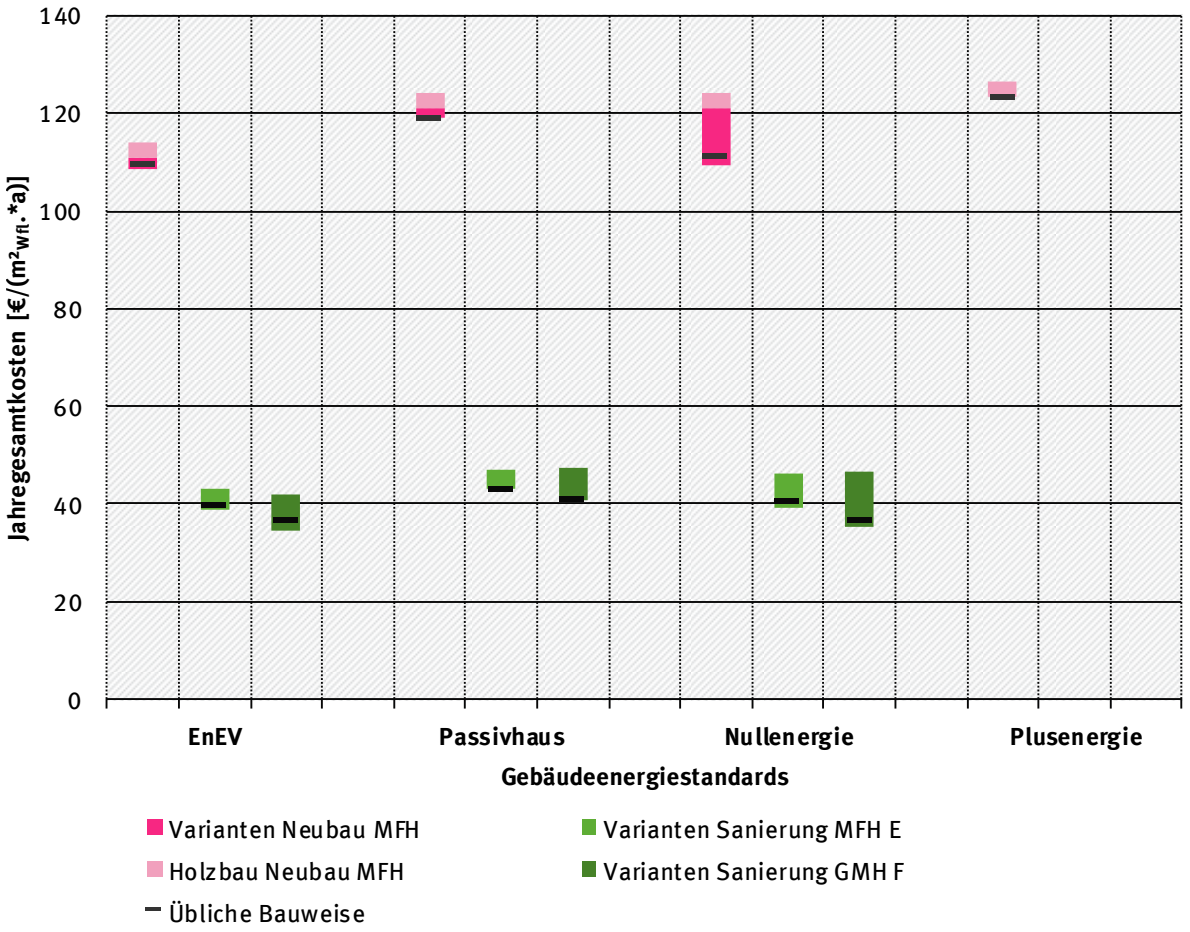
Abbildung 60: GWP der Energiekonzepte Mehrfamilienhaus Neubau und Sanierung



Quelle: Eigene Berechnungen

Die Jahresgesamtkosten für ein Neubaugebäude mit Berücksichtigung der kompletten KG 300 und KG 400 liegen bei etwa 110 – 120 €/(m²wfl.·a). Die Jahresgesamtkosten einer energetischen Sanierung betragen mit etwa 40 €/(m²wfl.·a) etwa ein Drittel der Neubaukosten. Bei einer Gegenüberstellung der Kosten für Neubau- und Sanierungskonzepte müssen die jeweiligen Bilanzgrenzen für die Erfassung der Investitionskosten berücksichtigt werden. Im Neubau ist die Gebäudekonstruktion der KG 300 von der KG 310 - 380 vollständig abgebildet. Für die Sanierungsvarianten wurden nur die Mehrkosten für eine energetische Sanierung der entsprechenden Außenbauteile der KG 320, 330, 350 und 360 sowie zusätzlicher Platzbedarf für ein Holzpelletlager (KG 390) erfasst. Es sind keine Investitionskosten für eine Komplettsanierung inklusive Innenwände (KG 340) und Fußböden erfasst. Neubau und Sanierungsvarianten sind daher nur in Bezug auf die erreichte energetische Qualität vergleichbar. Aus Abbildung 61 wird ersichtlich, dass die Kostenunterschiede trotz erheblichem Einfluss auf die CO_2-Emissionen innerhalb der Variantenkombinationen sehr gering sind. Die Bandbreite der Neubauvarianten in Massivbauweise liegt zwischen +/- 15 €/(m²wfl.·a) bzw. 1,20 €/(m²wfl.·Monat). Die Mehrkosten für ein Plusenergiegebäude gegenüber einem typischen EnEV-2016-Gebäude betragen +/- 14 €/(m²wfl.·a) bzw. 1,15 €/(m²wfl.·Monat). Eine Ausführung des Gebäudes in Holzbauweise führt zu Mehrkosten von 3,20 €/(m²wfl.·a) bzw. 0,25 €/(m²wfl.·M). Die Bandbreite der Jahresgesamtkosten der Sanierungsvarianten ist mit +/- 8 bis 13 €/(m²wfl.·a) bzw. 0,70 bis 1,10 €/(m²wfl.·Monat) etwas geringer.

Abbildung 61: JGK der Energiekonzepte Mehrfamilienhaus Neubau und Sanierung



Quelle: Eigene Berechnungen Steinbeis-Transferzentrum EGS

4.3 Einfamilienhauskonzepte

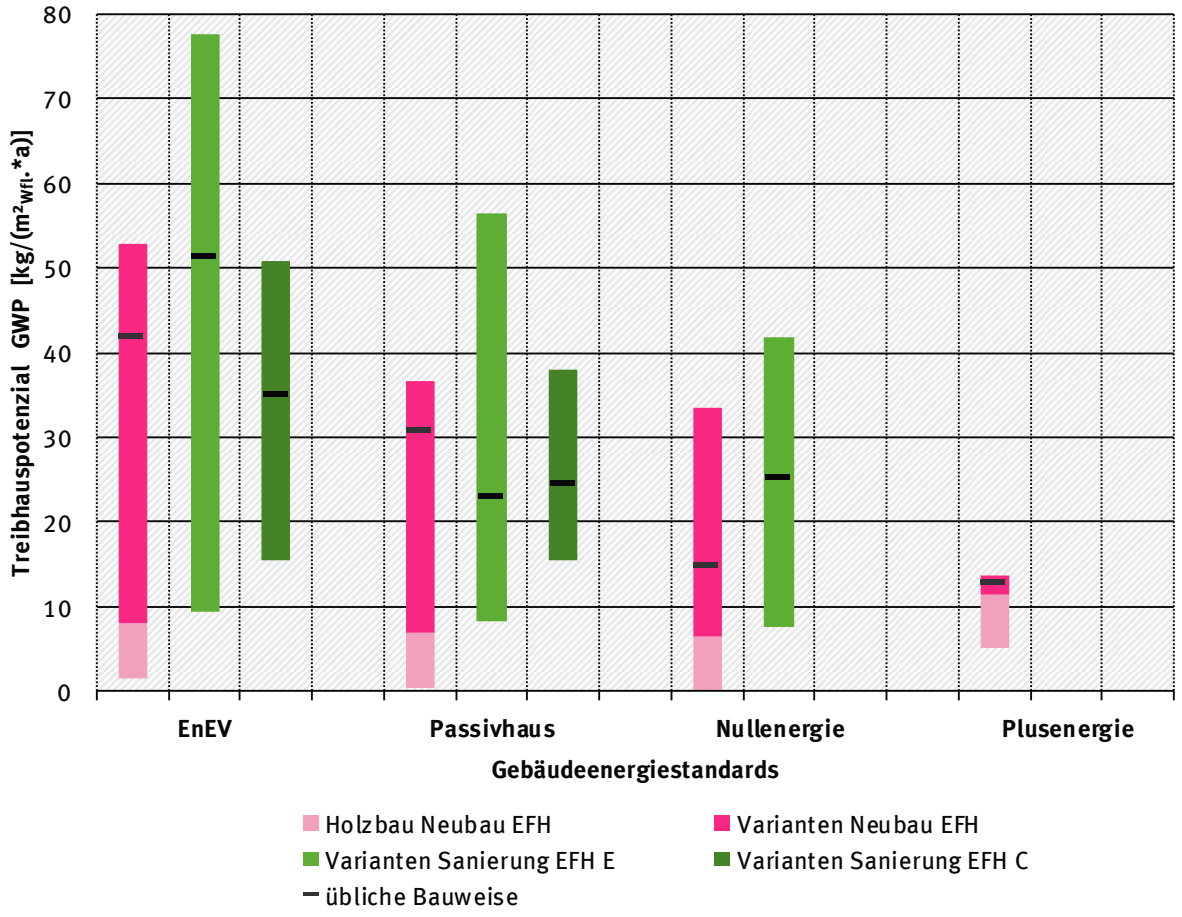
Für die Einfamilienhausgebäude werden analog zum Mehrfamilienhausbereich in Abbildung 62 und Abbildung 63 die Bandbreite der erreichten CO_2-Emissionen und die damit verbundenen JGK aller untersuchten Energiekonzepte dargestellt.

Wie aus Abbildung 62 hervorgeht, führt im Einfamilienhaus die Vorgabe eines Gebäudeenergiestandards im Vergleich zum Mehrfamilienhaus eher zu Einsparungen an CO_2-Emissionen, sie ist jedoch ebenfalls kein Garant dafür. Bei der Umsetzung der üblichen Varianten je Gebäudeenergiestandard zeichnet sich im Neubau eine Reduktion von EnEV-2016 bis hin zum Nullenergie-Standard mit CO_2-Emissionen von 40 bis 15 kgCO_2-Ä./(m²$_{Wfl.}$·a) ab. Die Emissionen für ein Plusenergiegebäude verringern sich nicht mehr.

Im Gegensatz zum Mehrfamilienhausbereich weisen die Sanierungskonzepte im Einfamilienhaus im Schnitt höhere flächenbezogene CO_2-Emissionen auf. In der Bestandssanierung führt die Vorgabe eines Gebäudeenergiestandards auch durch die üblicherweise umgesetzten Varianten nicht immer zu einer CO_2-Einsparung. Sowohl im Neubau als auch im Bestand ist die Bandbreite der CO_2-Emissionen der Variantenkombinationen innerhalb der Gebäudeenergiestandards hoch.

Insgesamt sind auch im Einfamilienhausbereich für Neubau und Bestandssanierung durch eine konventionelle Bauweise CO_2-Emissionen in Höhe von 10 bis 15 kgCO_2-Ä./(m²$_{Wfl.}$·a) erreichbar. Durch einen Neubau in Holzbauweise lassen sich im Einfamilienhausbereich klimaneutrale Gebäude mit CO_2-Emissionen fast 0 kg/(m²$_{Wfl.}$·a) realisieren.

Abbildung 62: GWP der Energiekonzepte Einfamilienhaus Neubau und Sanierung

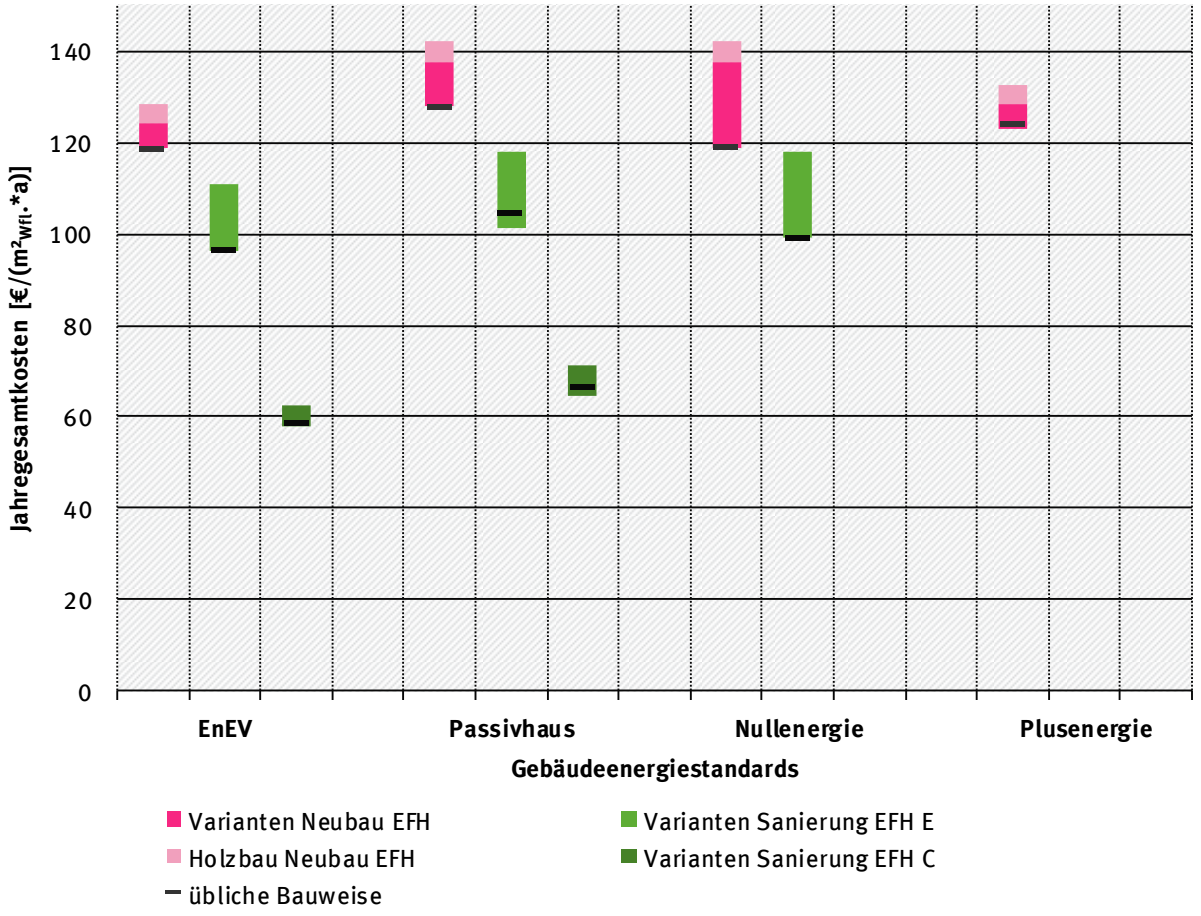


Quelle: Eigene Berechnungen

Im Anhang C ist die vergleichende Betrachtung hinsichtlich KEAne ergänzend dargestellt. Im Einfamilienhaus Neubau sind klimaneutrale Gebäude > 0 kWh/(m²$_{WFl.}$·a) erreichbar. Im Bestand ist der erreichbare KEAne abhängig vom verfügbaren Solarpotenzial und liegt mit 30 – 50 kWh/(m²$_{WFl.}$·a) in ähnlicher Höhe wie im Mehrfamilienhausbereich.

Die Jahresgesamtkosten für einen Neubau mit Berücksichtigung der kompletten KG 300 und KG 400 liegen bei etwa 120 – 140 €/(m²$_{WFl.}$·a). Im typischen Einfamilienhaus „EFH E“ mit einer Wohneinheit liegen die Kosten einer energetischen Sanierung mit 95 – 120 €/(m²$_{WFl.}$·a) bereits nahe an den Kosten für einen kompletten Neubau. Durch das höhere A/V-Verhältnis eines Einfamilienhauses ist eine energetische Sanierung aufwändiger und führt zu höheren spezifischen Kosten pro m² Wohnfläche. Da für den Bestand keine Vollsanierung, sondern nur die Kosten einer energetischen Sanierung erfasst wurden, liegt die Tendenz aufgrund des Kosten-Nutzen-Verhältnisses hier bei einem Neubau. Im etwas größeren „EFH C“ mit zwei Wohneinheiten sinken die Sanierungskosten bereits auf 60 – 70 €/(m²$_{WFl.}$·a) und eine energetische Sanierung wird attraktiver.

Abbildung 63: Jahresgesamtkosten der Energiekonzepte Einfamilienhaus Neubau und Sanierung



Quelle: Eigene Berechnungen Steinbeis-Transferzentrum EGS

Trotz erheblichen Einflusses auf die CO_2-Emissionen sind auch im Einfamilienhausbereich die Kostenunterschiede innerhalb der Variantenkombinationen relativ gering. Die Bandbreite der Neubauvarianten liegt zwischen +/- 19 €/(m²$_{WFl.}$·a) bzw. 1,60 €/(m²$_{WFl.}$·Monat). Die Mehrkosten für ein Plusenergiegebäude gegenüber einem typischen EnEV-2016-Gebäude betragen 6 €/(m²$_{WFl.}$·a) bzw. 0,50 €/(m²$_{WFl.}$·Monat). Eine Ausführung des Gebäudes in Holzbauweise führt zu Mehrkosten von 4,30 €/(m²$_{WFl.}$·a) bzw. 0,35 €/(m²$_{WFl.}$·Monat).

Die Bandbreite der Jahresgesamtkosten der Sanierungsvarianten im typischen Einfamilienhaus „EFH E“ ist mit +/- 22 €/(m²wfl.·a) bzw. 1,80 €/(m²wfl.·Monat) etwas höher. Im Typgebäude „EFH C“ verringert sich die Bandbreite der Kosten mit +/- 13 €/(m²wfl.·a) bzw. 1,10 €/(m²wfl.·Monat).

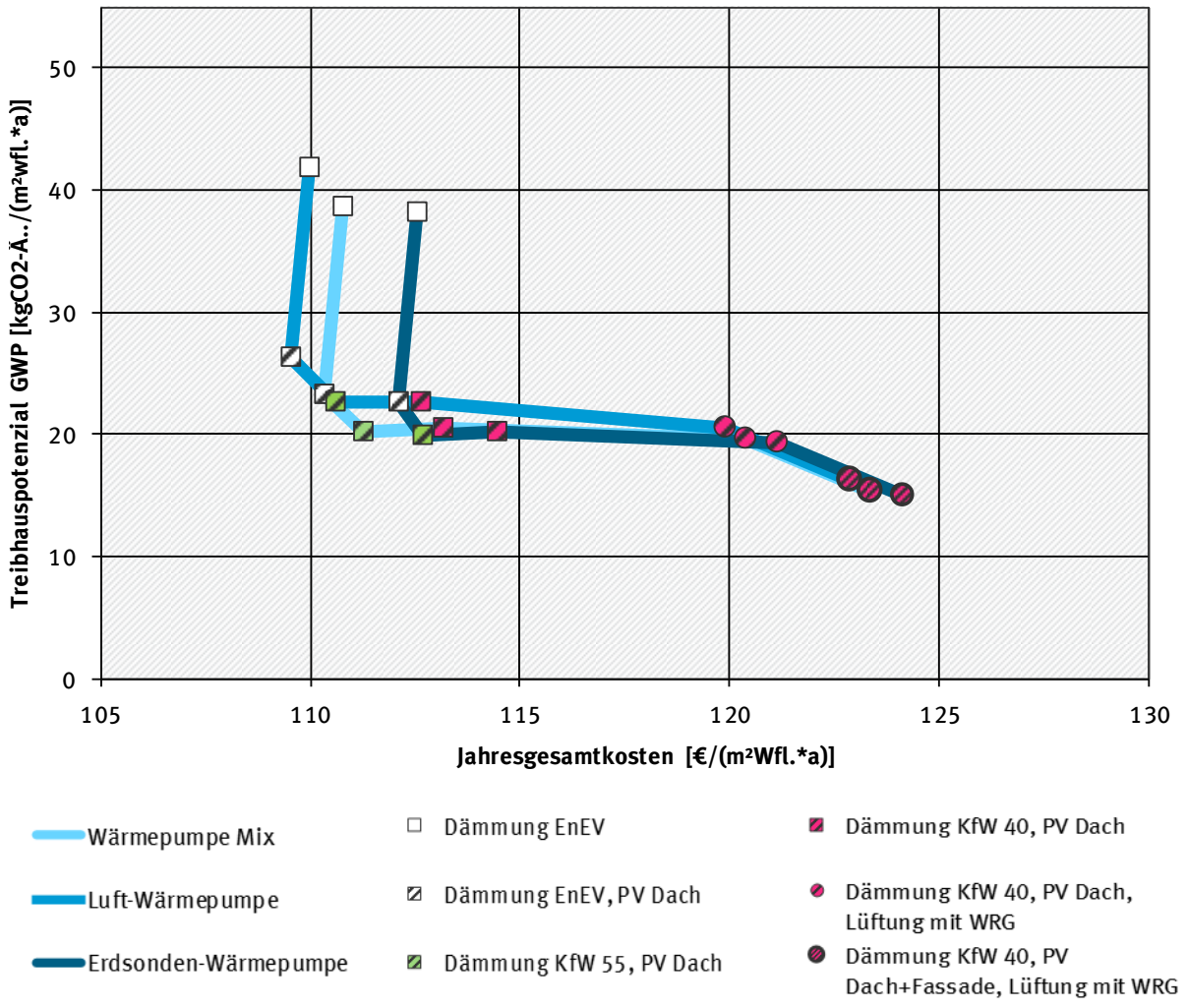
5 Sensitivitätsanalysen

Um den Einfluss unterschiedlicher Wärmequellen für Wärmepumpensysteme, einer autarken Gebäudeenergieversorgung, bestehender Förderprogramme und einer veränderten Energiebereitstellung im Jahr 2050 auf die vorgestellten Ergebnisse zu untersuchen werden Sensitivitätsanalysen durchgeführt.

5.1 Einfluss Wärmequelle Wärmepumpe

Bei einer Wärmeversorgung über Wärmepumpen sind verschiedene Wärmequellen wie z.B. Erdwärme, Grundwasser, Umweltwärme und Abwärme nutzbar. Dies wirkt sich auf die Effizienz der Anlage und die damit verbundenen Kosten aus. Um die Variantenanzahl zu begrenzen wurde für die Untersuchung der Anlagentechnik eine durchschnittliche Wärmepumpenvariante basierend auf einem Technik-Mix aus einer Sole/Wasser-Wärmepumpe mit Erdsonden und einer Luft-Wasser-Wärmepumpe mit Luftaußeneinheit gewählt. Der Einfluss der unterschiedlichen Wärmequellen Luft-Außeneinheit oder Erdsonden auf die CO_2-Emissionen und die Jahresgesamtkosten wird am Beispiel Neubau Mehrfamilienhaus untersucht (s. Abbildung 64).

Abbildung 64: GWP/ Jahresgesamtkosten Wärmepumpen-Konzepte Neubau Mehrfamilienhaus

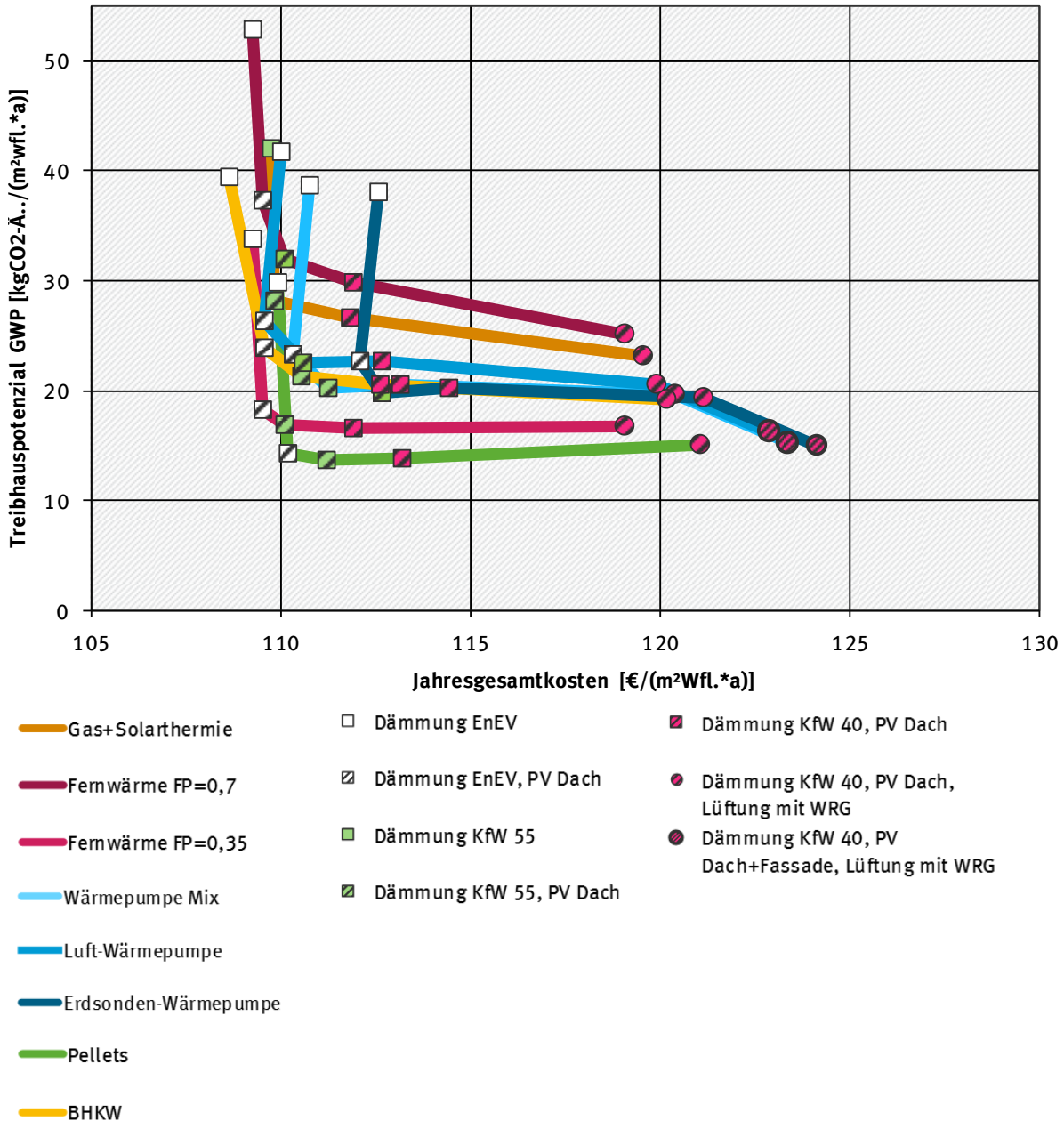


Quelle: Eigene Berechnungen

Die Varianten mit Sole/Wasser-Wärmepumpen und Erdsonden führen bei Varianten mit Abluftanlagen zu etwa 2 % Mehrkosten. Durch die Integration einer Lüftungsanlage mit WRG reduzieren sich die Mehrkosten auf < 1 %. Eine Wärmeversorgung über Luft-Wasser-Wärmepumpen führt zu geringen Mehrkosten von < 1 %. Durch die geringere Effizienz von Luft-Wasser-Wärmepumpen im Vergleich zum Technik-Mix erhöhen sich die CO_2-Emissionen der Varianten mit Abluftanlagen um etwa 10 % (2 – 3 kgCO_2-Ä./($m^2_{Wfl.}$·a)). Bei einer Integration einer Lüftungsanlage mit WRG erhöhen sich die die CO_2-Emissionen der Varianten mit Luft-Wasser-Wärmepumpen im Vergleich zum Technik-Mix nur um etwa 5 % (1 kgCO_2-Ä./($m^2_{Wfl.}$·a)). Durch eine reine Luft-Wasserwärmepumpe kann trotz Lüftung mit WRG, Dämmung gemäß KfW Effizienzhaus 40 und einer PV-Fassadenanlage bilanziell kein Plusenergie-Gebäude erreicht werden.

Im Vergleich mit den untersuchten Wärmeversorgungsvarianten wird durch die Variation der Energiequellen von Wärmepumpen kein großer Unterschied in Bezug auf die erreichten CO_2-Emissionen sichtbar. Die Wärmepumpenvarianten bleiben im Mittelfeld (s. Abbildung 65). Die Jahresgesamtmehrkosten von Sole-Wasser-Wärmepumpen-Varianten mit Wärmequelle Erdsonden sind vor allem bei Varianten mit Abluftanlagen sichtbar und verringern sich mit verbesserten Dämmstandards.

Abbildung 65: GWP/ Jahresgesamtkosten Energiekonzepte Neubau MFH (inkl. WP-Varianten)



Quelle: Eigene Berechnungen

Die resultierenden Jahresarbeitszahlen (JAZ) in Abhängigkeit der Gebäudeausführung und Lüftungsart sind in Tabelle 49 aufgeführt.

Tabelle 49: JAZ der Wärmepumpen-Varianten der Typgebäude

Wärmepumpe	Sole/Wasser-Wärme-pumpe	Luft-Wasser-Wärme-pumpe	Mix-Wärmepumpe
JAZ	3,5 - 4,6	3,0 – 3,3	3,4 - 4,4

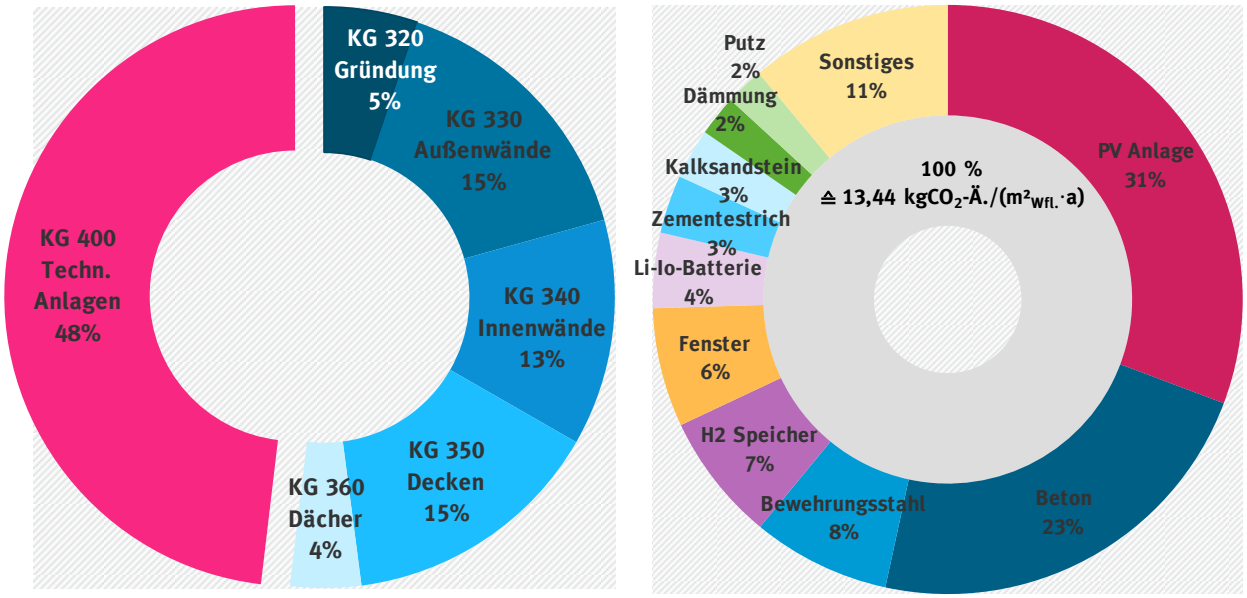
Quelle: Eigene Berechnungen des Steinbeis-Transferzentrum EGS basierend auf DIN V 18599

5.2 Szenario Mehrfamilienhaus autark

Ein autarkes Gebäude versorgt sich zu jeder Stunde des Jahres selbst mit Energie, ohne Energie von außen zu beziehen. Der Einfluss einer Autarkie auf Jahresgesamtkosten und Energieaufwand im Lebenszyklus wird anhand des Typgebäudes Neubau Mehrfamilienhaus mit Dämmung gemäß KfW Effizienzhaus 40, Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung und großflächiger Photovoltaikanlagen untersucht. Das Autarkie-Konzept basiert auf einer Wärmeversorgung über eine Wasserstoffbrennstoffzelle und einer Sole-Wasser-Wärmepumpe mit Erdsonden als Wärmequelle. Der Wasserstoff wird aus überschüssig erzeugtem Strom der Photovoltaikanlage auf Dach- und Fassade über Elektrolyse erzeugt und in einem Wasserstofftank gespeichert. Ein Batteriespeicher übernimmt die Kurzzeitspeicherung von Strom. Über einen Erdspeicher wird eine Langzeitwärmespeicherung der erzeugten Wärme möglich. Aufgrund des hohen Flächenbedarfs für die Photovoltaikanlage ist ein autarkes Gebäudekonzept anhand der Geometrie des untersuchten Typgebäudes Mehrfamilienhaus praktisch nicht realisierbar. Die Auswirkungen eines solchen Konzeptes sind auf Basis des Energieaufwandes für Gebäudekonstruktion (KG 300) und Anlagentechnik (KG 400) dennoch quantifizierbar.

Wie aus Abbildung 66 hervorgeht, entfallen fast 50 % der CO_2-Emissionen der Herstellungsphase auf die Anlagentechnik der KG 400. Dies ist maßgeblich auf die groß dimensionierte PV-Anlage (31%), den Wasserstoffspeicher (7 %) aufgrund des hohen Stahlanteils und die Lithium-Ionen-Batterie (4 %) zurückzuführen.

Abbildung 66: Anteile GWP an Herstellungsphase des autarken Mehrfamilienhauses

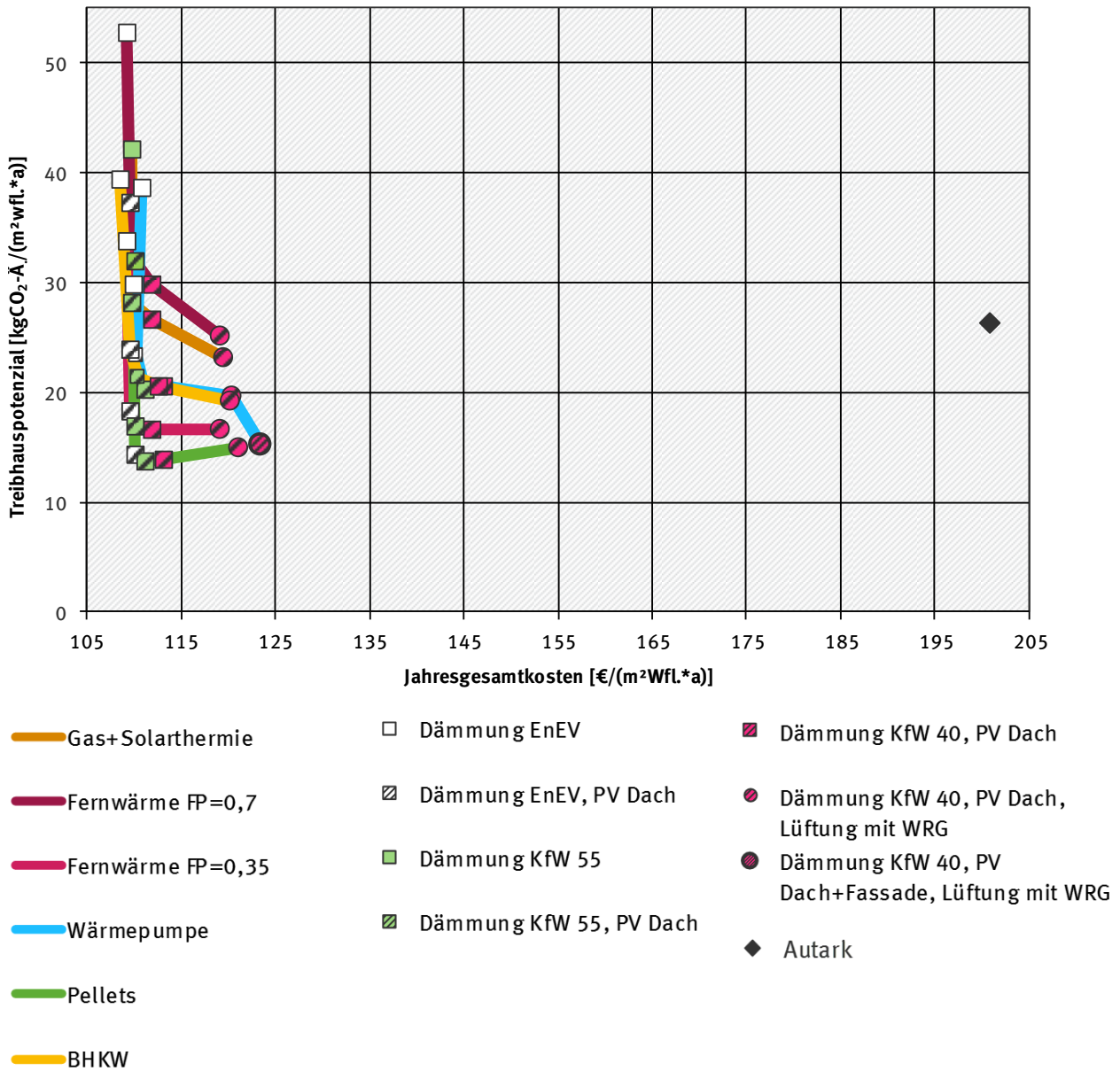


Quelle: Eigene Berechnungen Fraunhofer IBP

Die CO_2-Emissionen des autarken Gebäudekonzeptes im Lebenszyklus belaufen sich auf etwa 25 $kgCO_2$-Ä./($m^2_{Wfl.}$·a) netto und liegen dabei auf dem Niveau von Versorgungskonzepten mit Photovoltaik-Dachanlagen in Kombination mit einer Wärmeversorgung mit Gaskessel und Solarthermie und einer Dämmung gemäß KfW Effizienzhaus 55 oder Wärmepumpenvarianten mit einer Dämmung gemäß EnEV-2016-Niveau. Durch den hohen anlagentechnischen Aufwand einer autarken Gebäudeenergieversorgung entstehen hohe Investitions- und Wartungskosten. Da es sich vor allem in diesem Leistungsbereich nicht um marktgängige Techniken handelt, wurden die Investitionskosten basierend auf Meta-Studien und realisierten Projekten in anderen Leistungsklassen grob abgeschätzt. Das autarke Gebäude führt demnach zu geschätzten Jahresgesamtkosten von etwa 200 €/($m^2_{Wfl.}$·a)

und liegt damit bei 80 % höheren Jahresgesamtkosten verglichen mit Varianten mit ähnlichen CO_2-Emissionen im Lebenszyklus und 60 % höheren Jahresgesamtmehrkosten verglichen mit einem Mehrfamilienhaus im Plusenergiestandard. Der gebäudeseitig hohe technische Aufwand für die Umsetzung einer Autarkie ist weder kostenseitig noch durch Einsparungen an CO_2-Emissionen zu rechtfertigen.

Abbildung 67: GWP/ Jahresgesamtkosten Energiekonzepte Neubau MFH (inkl. autarke Variante)



Quelle: Eigene Berechnungen

5.3 Aktuelle Förderprogramme

Der Einfluss der aktuellen Förderungen im Gebäudebereich auf die Jahresgesamtkosten wird beispielhaft an den beiden Typgebäuden Neubau Mehrfamilienhaus und Sanierung „MFH E“ untersucht.

Im Neubau werden die KfW-Förderprogramme 153 (KfW Effizienzhaus 55 und KfW Effizienzhaus 40) und das KfW-Programm 433 Brennstoffzelle sowie die BAFA-Förderung von Solarthermie im Mehrfamilienhaus gemäß Tabelle 50 berücksichtigt. Die Förderprogramme der KfW und BAFA sind kombinierbar.

Tabelle 50: Förderprogramme Neubau (Stand 2018)

Förderung	EFH	MFH
KfW Effizienzhaus 55 (KfW 153)	Tilgungszuschuss 5.000 €/WE (max. 5 %)	
KfW Effizienzhaus 40 (KfW 153)	Tilgungszuschuss 10.000 €/WE (max. 10 %)	
BAFA-Förderung Solarthermie	-	3.098 €
Förderung Brennstoffzelle (KfW 433)	9.300 €	-

Quelle: KfW-Programm 153[9], KfW-Programm 433[10], BAFA[11]

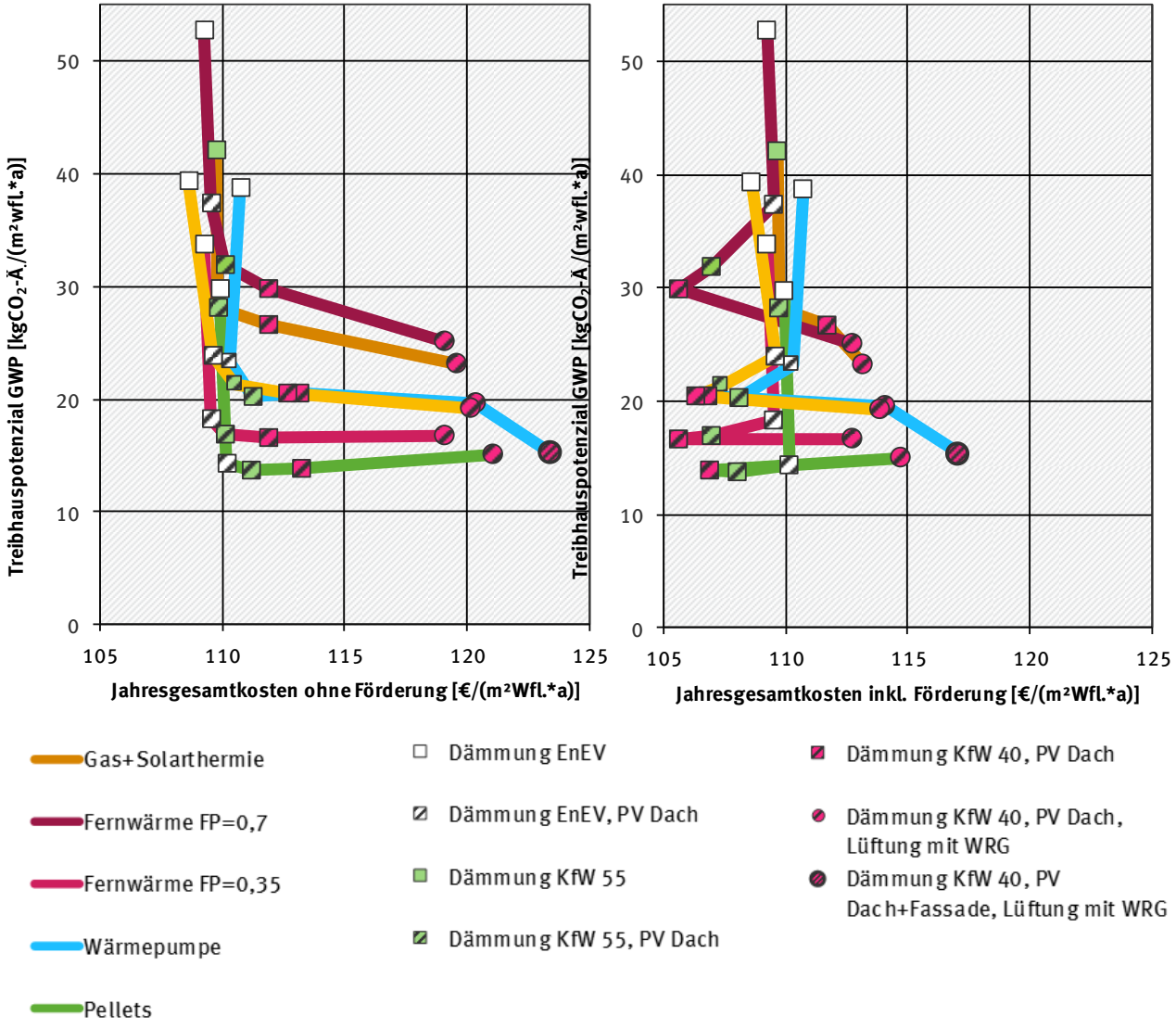
Wie aus der rechten Grafik der Abbildung 68 hervorgeht, kompensiert die KfW-Förderung die Mehrkosten für eine verbesserte Dämmung gemäß KfW Effizienzhaus 55 und KfW Effizienzhaus 40. Gebäude mit verbesserter Dämmung, welche aufgrund der Anlagentechnik (Wärmeerzeugung in Kombination mit Photovoltaik) die Effizienzhauskriterien erfüllen, weisen geringere Jahresgesamtkosten auf als Gebäude im EnEV-2016-Standard. Die Inanspruchnahme der KfW-Fördermittel bei der Erreichung eines KfW Effizienzhauses ist daher wirtschaftlich. Die anteilige Förderung der Investitionskosten für Solarthermie nach BAFA wirkt sich nicht nennenswert auf die Jahresgesamtkosten aus und hat demnach keinen Einfluss.

[9] Förderung KfW-Effizienzhaus 55, KfW-Effizienzhaus 40 gemäß KfW-Programm 153 Energieeffizient Bauen (Stand: April 2018)

[10] KfW-Programm 433 Brennstoffzelle (Stand: April 2018)

[11] BAFA-Innovationsförderung Solarthermie im MFH (Stand: 02.01.2018)

Abbildung 68: GWP/ Jahresgesamtkosten Energiekonzepte Neubau MFH ohne/ mit Förderung



Quelle: Eigene Berechnungen

Im Bestand wird eine Sanierung zum KfW Effizienzhaus 55 gefördert. Seitens der BAFA kann zusätzlich eine Förderung von Solarthermie, Pelletkessel, Wärmepumpen und Mini-KWK-Anlagen bis 20 kW_{el} in Anspruch genommen werden.

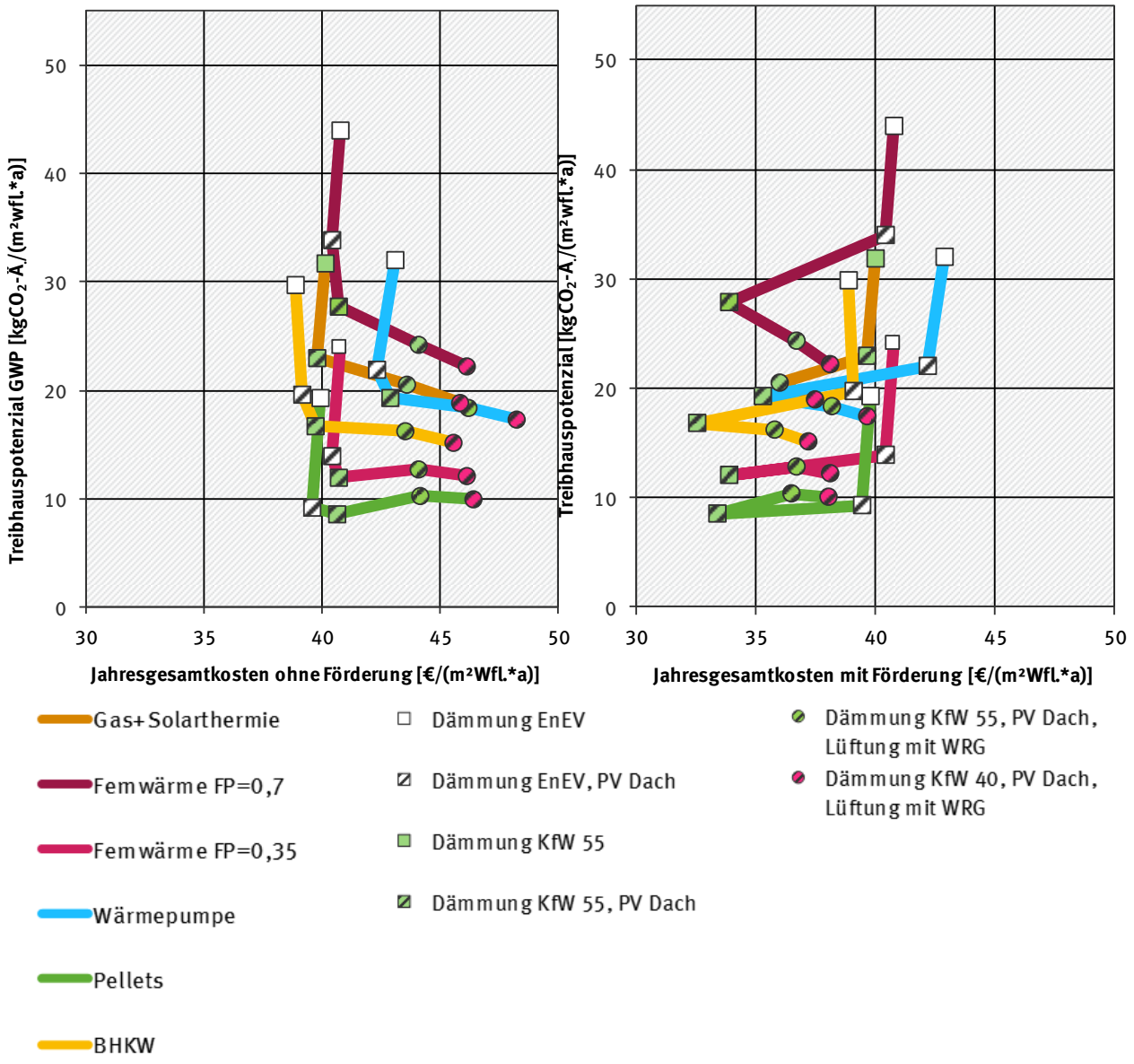
Tabelle 51: Förderprogramme Sanierung (Stand 2018)

Förderung	EFH	MFH
Sanierung Effizienzhaus KfW 55 (KfW 151)	Tilgungszuschuss 27.500 €/WE (max. 27,5 %)	
BAFA-Förderung Solarthermie	1.000 €	6.500 - 6.800 €
BAFA-Förderung Holzpellets	3.500 – 5.250 €	9.071 - 10.204 €
BAFA-Förderung Wärmepumpe	3.000 – 4.500 €	7.937 - 8.928 €
Förderung Brennstoffzelle (KfW 433)	9.300 €	-
BAFA-Förderung Mini-KWK	-	2.900 - 3.490 €

Quelle: KfW-Programm 15112, KfW-Programm 433, BAFA[13]

Die Auswirkungen der Fördermittel werden am Beispiel der Sanierung des „MFH E“ dargestellt. Wie aus dem Vergleich der beiden Grafiken in Abbildung 69 hervorgeht, kompensiert die KfW-Förderung im Bestand die Mehrkosten für eine verbesserte Dämmung und die Lüftungsanlagen mit WRG. Die Durchführung dieser Maßnahmen ist daher bei Inanspruchnahme der Fördermittel ebenfalls wirtschaftlich. Die BAFA-Förderungen im Bereich der Anlagentechnik wirkt sich hingegen kaum auf die Jahresgesamtkosten aus und erwirkt keine Kostenverschiebung zugunsten Wärmeversorgungstechniken mit niedrigen CO_2-Emissionen.

Abbildung 69: GWP/ Jahresgesamtkosten Sanierungskonzepte MFH E ohne/ mit Förderung



Quelle: Eigene Berechnungen

[12] Förderung KfW-Effizienzhaus 55 gemäß KfW-Programm 151 Energieeffizient Sanieren (Stand: April 2018)

[13] BAFA-Förderung Solarthermie, Biomasse, Wärmepumpe und KWK im Gebäudebestand (Stand: 02.01.2018)

Die untersuchten KfW-Förderungen und BAFA-Fördermittel sind im Neubau und im Bestand kombinierbar. Die derzeitige Förderlandschaft ist durch eine Vielzahl an Voraussetzungskriterien nicht immer transparent. Unterschiedliche Förderstellen und geforderte Nachweispflichten führen zu einem hohen Aufwand bei der Beantragung der Fördermittel und werden im Baualltag daher nicht immer in Anspruch genommen. Die Förderung von KfW-Effizienzhaus-Standards zielt auf Wärmeversorgungstechniken mit niedrigem Primärenergiebedarf und einem effizienten Gebäude mit entsprechender thermischen Qualität der Gebäudehülle. Da jedoch auch fossile Wärmeversorgungstechniken die Primärenergieanforderungen der Effizienzhäuser einhalten, bleibt die erhoffte Lenkungswirkung hinsichtlich niedrigen CO_2-Emissionen aus. Die punktuelle Förderung der BAFA von Anlagentechniken beabsichtigt die Verbreitung regenerativer Wärmeversorgung. Die Investitionszuschüsse haben jedoch kaum Auswirkung auf die Jahresgesamtkosten und verursachen keine Verschiebung der Kosten zugunsten einer regenerativer Versorgung.

5.4 Energiebereitstellung Szenario 2050

Der Einfluss einer veränderten künftigen Energiebereitstellung auf die Nutzungsphase wird am Beispiel der Bestandssanierung des Typgebäudes „MFH E“ untersucht. Als Szenario für einen künftigen Strommix im Jahr 2050 wird das Zielszenario nach IER (vgl. IER 2015) zugrunde gelegt. Dieses Szenario setzt eine Nutzung der solaren Energie durch Photovoltaik am Gebäude voraus. Für den Gasmix 2050 wurde ein Szenario mit 45 % regenerativem Anteil im Gasnetz durch Biomethan hinterlegt. Die verwendeten CO_2-Emissionsfaktoren der Energieträger heute und für das Szenario 2050 sind in Tabelle 52 aufgeführt.

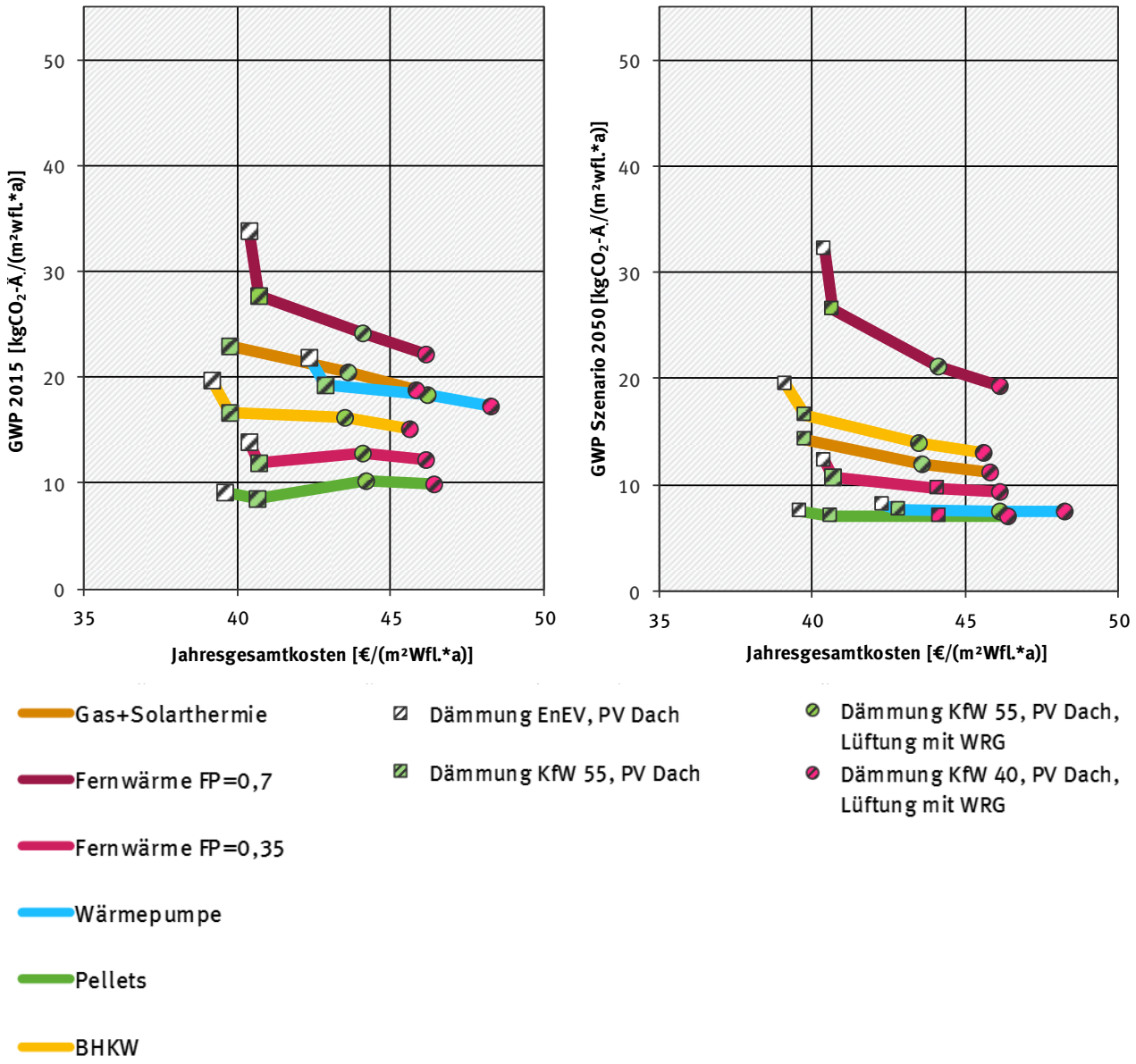
Tabelle 52: CO_2-Faktoren der Energieträger 2015 und Szenario 2050

	2015 [kg CO_2 Ä./kWh]	Szenario 2050 [kg CO_2 Ä./kWh]
Gasnetz	0,247	0,148
Strom	0,605	0,123
Verdrängungsstrommix (KWK/ PV)	0,605	0,123

Quelle: UBA 2016, IER 2015, STZ EGS

Wie aus dem Vergleich in Abbildung 70 hervorgeht, sinken die CO_2-Emissionen durch den Energiemix 2050 für alle Variantenkombinationen bis auf die BHKW-Varianten. Dies ist speziell auf die Reduktion des Nutzerstromanteils durch den Strommix 2050 zurückzuführen. Besonders auffällig ist die Verbesserung der Wärmepumpenvariante, welche sich nun dank des Strommix 2050 weit unterhalb der Zielwerte befindet und eine der besten Versorgungsvarianten darstellt. Aufgrund der sinkenden Stromgutschriften verschlechtern sich BHKW-Varianten im Szenario 2050 gegenüber 2015 leicht. Die Zusammensetzung des zukünftigen Energiemixes hat demnach großen Einfluss auf die Auswahl der Wärmeerzeugung. Eine untergeordnete Rolle für die Erreichung der Zielwerte spielen die Verbesserung der Dämmung über EnEV-Neubauniveau hinaus oder ob Lüftungsanlagen mit oder ohne Wärmerückgewinnung eingesetzt werden.

Abbildung 70: Szenario 2050 im Vergleich mit Basis 2015 für die Sanierung MFH E



Quelle: Eigene Berechnungen

6 Empfehlungen

6.1 Empfehlungen für Planer und Gebäudeeigentümer

Für die Umsetzung ressourcenschonender Gebäudekonzepte gilt das Grundprinzip „Efficiency First". Zuerst gilt es den gebäudeseitigen Energiebedarf durch eine effiziente Gebäudehülle und Anlagentechnik und durch ein energiebewusstes Nutzerverhalten zu minimieren. Im vorliegenden Vorhaben wurden ausschließlich Gebäudekonzepte untersucht, welche eine Mindestdämmung nach EnEV-2016-Neubauniveau einhalten, einen geringen Nutzerstrombedarf (EFH: 2.450 kWh/a; Wohneinheit im MFH: 1.850 kWh/a) und eine angemessene Belegungsdichte von durchschnittlich 39 m² Wohnfläche pro Person aufweisen.

Grundlagen nach dem Prinzip „Efficiency First"

- Gebäudehülle nach EnEV-Neubauniveau (sanieren)
- Effiziente Haushaltsgeräte
- Flächeneffizienz
- Energiebewusstes Nutzerverhalten

Neben einem geringen Energiebedarf ist der Einsatz von erneuerbaren Energien die wesentliche Komponente um CO_2-Emissionen im Gebäudesektor zu reduzieren. Um zielführende und kostengünstige Maßnahmen im Bestand und Neubau umzusetzen, sind konkrete Empfehlungen für Planer und Gebäudeeigentümer notwendig.

Weitere Maßnahmen, welche in großem Umfang zur Minderung von CO_2-Emissionen und KEAne beitragen und gleichzeitig kosteneffizient umzusetzen sind, werden im folgenden Ranking dargestellt:

Ranking weiterer Maßnahmen zur Erreichung der Klimaschutzziele

1. Dezentrale regenerative Stromerzeugung und Eigenstromnutzung
2. Regenerative Wärmeerzeugung
3. Ressourcenschonendes Bauen im Lebenszyklus durch Sanierung von Mehrfamiliengebäuden oder Neubau in Leicht-/Holzbaubauweise
4. Gebäudehülle verbessern auf KfW Effizienzhaus 55
5. Lüftung mit WRG

Dezentrale regenerative Stromerzeugung

Gebäudeintegrierte Photovoltaikanlagen tragen in großem Maße zur Minderung des Energieaufwands bei. Voraussetzung für die Nutzung der lokalen Solarenergie ist eine am Gebäude zur Verfügung stehende geeignete (Dach-) Fläche mit entsprechender Neigung und Ausrichtung. Bei der Realisierung von Gebäudeenergiestandards wie einem Passivhaus oder Effizienzhaus-Plus-Gebäuden ist die passive und aktive Nutzung von Solarenergie in der Planung bereits verankert. Dachformen wie nach Süden ausgerichtete Pultdächer oder Satteldächer mit möglichst großen aktivierbaren Flächen sind optimale Voraussetzungen zur Nutzung des Solarpotenzials durch Photovoltaikanlagen. Darüber hinaus sind auf dem Markt PV-Fassadensysteme verfügbar. Um das Potenzial wirtschaftlich zu heben, müssen bei Neubauvorhaben Photovoltaikanlagen bereits im Gebäudeentwurf eingeplant und berücksichtigt werden. Im Gebäudebestand ist das Solarpotenzial durch entsprechende Dachformen und –gauben häufig eingeschränkt. Dennoch empfiehlt es sich hier auch aus ökologischen und wirtschaftlichen Gründen das vorhandene Potenzial zu nutzen und nachträglich eine Anlage zu installieren. Bei einer anstehenden Dach- oder Fassadensanierung können auch hier gebäudeintegrierte Systeme oder vorgefertigte Fassadenmodule zum Einsatz kommen.

Eigenstromnutzung

Wird der erzeugte Strom im Gebäude selbst genutzt, wie es bei einer selbst genutzten Immobilie die gängige Praxis ist, sind Photovoltaikanlagen wirtschaftlich. Die direkte Versorgung von Mietwohnungen mit in unmittelbarer Nähe erzeugtem Solarstrom ohne Netzdurchleitung ist in der Vergangenheit häufig aufgrund wirtschaftlicher Rahmenbedingungen gescheitert. Mit dem neuen Mieterstromgesetz (vgl. EEG 2017) fördert die Bundesregierung nun Mieterstrom aus Solaranlagen direkt. Solarstrom wird dazu künftig nicht nur im Fall der Einspeisung ins Stromnetz gefördert, sondern auch, wenn er an Mieter in einem Wohngebäude geliefert wird. Die Förderung erfolgt wie bei der Einspeisung in das Netz der allgemeinen Versorgung pro Kilowattstunde und beträgt 2018 etwa 2,2 bis 3,8 Cent/kWh. Das Potenzial für Mieterstrom umfasst nach einem von BMWi in Auftrag gegebenen Gutachten bis zu 3,8 Millionen Wohnungen in Deutschland (vgl. Krampe et al. 2017). Um neben Privathaushalten auch Mieter am Ausbau der erneuerbaren Energien zu beteiligen, liegt es nun an Planern und Akteuren aus der Wohnungswirtschaft dieses Angebot in Anspruch zu nehmen und einen wirtschaftlichen Betrieb von Mieterstrommodellen zu realisieren. Neue Geschäftsmodelle in der Wohnungswirtschaft sind dabei gefordert. Das im Aktiv-Stadthaus in Frankfurt durch die AGB Frankfurt HOLDING umgesetzte „Warmmietkonzept“ (vgl. Hegger 2014) stellt dem Mieter ein Freikontingent an Wärme und Strom zur Verfügung und fördert das Energiebewusstsein der Nutzer, da nur die darüber hinaus verbrauchte Energie in Rechnung gestellt wird. Bei der Planung oder Sanierung größerer Liegenschaften bis hin zu Quartieren sollte bereits heute ein Mindestangebot an Ladeinfrastruktur für Elektromobilität berücksichtigt werden (vgl. IPBD Update 2018). Im Gesamtsystem können diese als weitere Stromabnehmer und –speicher die Eigenstromnutzung erhöhen.

Regenerative Wärmeversorgung und Nutzung lokal verfügbarer erneuerbarer Energien

Ein weiterer zentraler Baustein zur Senkung des Energieaufwands ist die Nutzung regenerativer Energieträger für die Wärmeerzeugung. Bereits heute werden in 40 % der nach KfW Effizienzhaus 55 geförderten Gebäudesanierungen Holzpelletheizungen eingebaut. Das nachhaltig verfügbare Biomassepotenzial ist jedoch stark begrenzt. Die Beschränkung betrifft vor allem den Gebäudesektor, da die Dekarbonisierung in anderen Bereichen schwerer zu realisieren ist und deshalb z.B. nach BCG/Prognos (2018) von einem steigenden Biomasse-Einsatz im Industriesektor auszugehen ist. Durch Wärmepumpensysteme können lokal verfügbare regenerative Energiequellen wie Erd-, Abwasser- und Umgebungswärme nutzbar gemacht werden. In Kombination mit einer regenerativen Stromquelle (dezentrale Photovoltaik) und Niedertemperatursystemen ist die Wärmepumpe eine Schlüsseltechnik der zukünftigen Wärmeversorgung. Das Auftreten einer Dunkelflaute ist ein häufiges Argument gegen eine großflächige Wärmepumpenversorgung. Der Begriff Dunkelflaute bezeichnet einen Zeitraum in dem, aufgrund von Dunkelheit und Windflauten, kaum bis keine Energie über Wind- und Solaranlagen bereitgestellt werden kann. Innerhalb der letzten 10 Jahren trat etwa alle zwei Jahre eine extreme Dunkelflaute auf, welche bis zu zwei Wochen andauerte. Die letzte extreme Dunkelflaute erlitt Deutschland im Januar 2017 (vgl. NEXT Kraftwerke 2018). Nach BCG/Prognos (vgl. BCG/Prognos 2018) verändert sich die Stromnachfrage im Gebäudesektor trotz 14 Mio. neuer Wärmepumpen bis 2050 nicht, da parallel 4 Mio. elektrische Direktheizungen in derzeit schlecht gedämmten Gebäuden ersetzt werden. Dennoch muss die Versorgungssicherheit einer regenerativen Energieversorgung durch entsprechende Infrastrukturmaßnahmen gewährleistet sein, siehe hierzu Kapitel 6.2.

Eine weitere Schlüsseltechnik für die Umsetzung der „Wärmewende“ ist die Bereitstellung von Fernwärme mit hohem regenerativen Anteil oder der Nutzung von Abwärme oder Sekundärbrennstoffen. Vor allem im verdichteten innerstädtischen Bereich kann Fernwärme aus Sekundärbrennstoffen in Kombination mit KWK oder industrieller Abwärme bzw. Abwasserwärme in Kombination mit Wärmepumpensystemen ganzjährig zur Verfügung stehen. Regenerative Energiequellen wie Erd- und Umge-

bungswärme können über Wärmepumpensysteme in Kombination mit Solarthermie und Photovoltaik und einer Langzeit-Wärmespeicherung für eine Nahwärmeversorgung nutzbar gemacht werden. Solare Nahwärmesysteme mit Langzeitwärmespeicher, wie sie bereits in den 90er Jahren in Deutschland realisiert wurden und heute eine Renaissance in Dänemark erleben, stellen Lösungen für ländlich geprägte Regionen dar. Der Platzbedarf für Wärmequellen wie Solarthermieanlagen oder Erdkollektoren bzw. –sonden und Wärmespeichersysteme nimmt städtebauliche Dimensionen ein und kann ein Hindernis für innerstädtische Gebiete darstellen. Der Platzbedarf für unterirdische Speichersysteme kann jedoch auch städteplanerisch für Grün- und Regenerationsflächen genutzt werden. Ein Vorteil solcher Systeme ist die Langzeitspeicherung von Solarerträgen im Sommer und die Nutzung der Wärmeerträge im Winter und damit eine Entlastung der Netze. Erdwärme kann neben einer oberflächennahen Nutzung auch über Tiefengeothermie durch die Nutzung heißer Thermalquellen zur Strom- und Wärmeversorgung erfolgen. Neben konventionellen „warmen“ Fernwärmesystemen mit hohen Vorlauftemperaturen für eine direkte Wärmeversorgung und einer zentralen Wärmeerzeugung gibt es „kalte“ Nahwärmeversorgungen mit niedrigen Vorlauftemperaturen entsprechend der regenerativen Wärmequellen und dezentralen Wärmepumpen in den Gebäuden.

Dezentrale KWK auf fossiler Basis ist eine wichtige Übergangstechnik. Die erreichbaren CO_2-Einsparungen im Jahr 2050 sind jedoch abhängig vom künftigen Energieträger, d.h. dem Anteil „Windgas“ oder Biomethan im künftigen Gasnetz, und der Entwicklung der Stromerzeugung.

Ressourcenschonendes Bauen im Lebenszyklus

Eine energetische Gebäudesanierung ist aufgrund des guten Kosten-/Nutzen-Verhältnisses vor allem im Mehrfamilienhausbereich sinnvoll. Durch die untersuchten Sanierungskonzepte lassen sich mit einem Neubau vergleichbare CO_2-Emissionen von 10 – 15 kgCO_2-Ä./(m²$_{Wfl.}$·a) erreichen. Durch den Bestandserhalt und ein niedriges A/V-Verhältnis sind die Maßnahmen mit weitaus niedrigeren Kosten im Vergleich zu einem Neubau verbunden. Die Erreichung eines Nullenergiestandards ist abhängig vom Solarpotenzial und konnte bei den untersuchten Typgebäuden im mittleren und größeren Mehrfamilienhausbereich gut erreicht werden. Die Erreichung eines Plusenergiestandards im Bestand wurde im vorliegenden Vorhaben nicht untersucht. Im Hinblick auf die Klimaschutzziele und eine sich verändernde Energiebereitstellung ist auch im Bestand der Einsatz von Wärmepumpen in Kombination mit Photovoltaik, die Voraussetzung für Plusenergie, ein zukunftsfähiges Konzept.

Im Einfamilienhausbereich sind die Kosten für einen Neubau um etwa 20 €/(m²$_{Wfl.}$·a) höher, aber fast in ähnlicher Größenordnung wie bei einer Sanierung. Durch alternative Leicht- oder Holzbauweisen in Kombination mit regenerativer Wärmeversorgung und Photovoltaik lassen sich bei Neubauten im Einfamilienhausbereich schon heute klimaneutrale Gebäudekonzepte realisieren. Eine Bestandssanierung im Einfamilienhausbereich kann die energetische Qualität eines Neubaus oder sanierter Mehrfamilienhausgebäude nicht immer erreichen. Im Neubau von Ein- oder kleinen Mehrfamilienhäusern sind daher Alternativen zur konventionellen Massivbauweise gefordert. Das Potenzial CO_2-Emissionen durch Leichtbau- oder Holzbauweisen zu senken ist je nach Region mit keinen Mehrkosten verbunden.

Thermische Qualität der Gebäudehülle

Ein effizientes Gebäude mit entsprechender thermischer Qualität und Luftdichtheit der Gebäudehülle ist eine wichtige Voraussetzung zur Realisierung einer ressourcensparenden Wärmeversorgung. Im vorliegenden Forschungsvorhaben werden zukünftige Energieversorgungskonzepte untersucht. Eine Mindestdämmung nach EnEV-2016-Standard wird im Neubau und in der Bestandssanierung vorausgesetzt. Für die in diesem Bericht untersuchten Gebäudetypen sind folgende Aussagen möglich: Eine verbesserte Gebäudehülle gemäß KfW Effizienzhaus 55 ist im Einfamilienhausbereich kostenneutral und führt bei fossilen Energieträgern zu einer CO_2-Reduktion von bis zu 20 % im Neubau und bis zu 35 % bei einer Gebäudesanierung. Im Mehrfamilienhausbereich spart eine verbesserte Gebäudehülle

gemäß KfW Effizienzhaus 55 max. 15 - 20 % an CO_2-Emissionen ein und ist mit 1 – 2 % Mehrkosten verbunden. Eine weitere Verbesserung der Dämmung von KfW Effizienzhaus 55 auf KfW Effizienzhaus 40 führt im typischen Einfamilienhaus aufgrund des hohen A/V-Verhältnisses zu einer weiteren CO_2-Einsparung von max. 15 % bei etwa 5 % Jahresgesamtmehrkosten. Im Mehrfamilienhausbereich kann eine Verbesserung der Dämmung von KfW Effizienzhaus 55 auf KfW Effizienzhaus 40 bei einer fossilen Wärmeerzeugung max. weitere 2 $kgCO_2$-Ä./($m^2_{Wfl.}$·a)) einsparen und ist im Neubau mit etwa 2 % Mehrkosten und in der Sanierung mit 5 % Mehrkosten verbunden. Bei einer regenerativen Energieversorgung führt eine Dämmung gemäß KfW Effizienzhaus 40 gegenüber KfW Effizienzhaus 55 jedoch zu keinen weiteren CO_2-Einsparungen mehr bzw. führt sogar zu einer Erhöhung der CO_2-Emissionen im Lebenszyklus. Hierbei ist allerdings zu beachten, dass eine flächendeckende regenerative Energieversorgung erst in der Zukunft realisierbar sein wird und daher in der überwiegenden Zahl der Fälle mit den gegenwertigen Randbedingungen einer fossilen Energieversorgung zu rechnen ist. Können bei Wärmeversorgungskonzepten mit regenerativem Anteil entsprechende KfW-Fördermittel in Anspruch genommen werden, ist eine Mehrdämmung unter aktuellen Bedingungen sowohl im Ein- als auch im Mehrfamilienhausbereich wirtschaftlich und daher zu empfehlen. Im Gebäudebestand kann eine verbesserte Dämmung gemäß KfW Effizienzhaus 55 mit größerem Aufwand verbunden sein. Dickere Wandaufbauten können zu weiteren Maßnahmen am Gebäudedach führen oder sind aufgrund der baulichen Grenzen nicht umsetzbar.

Lüftung mit Wärmerückgewinnung

Die Integration von Lüftungsanlagen mit WRG anstelle von reinen Abluftanlagen ist in erster Linie aus Komfortgründen zu rechtfertigen. Liegen beispielsweise Schallschutzanforderungen im innerstädtischen Bereich in Kombination mit einer fossil geprägten Wärmeversorgung vor, bringen Wärmerückgewinnungssysteme doppelten Nutzen.

Flächeneffizienz

Ein weiterer nicht zu vernachlässigender Faktor ist ein steigender Wohnflächenbedarf und der vom Nutzerverhalten abhängende individuelle Energiebedarf. Die Inanspruchnahme einer größeren Wohnfläche pro Person hat in den letzten Jahren die Energieeinsparungen pro m² Wohnfläche wieder zunichtegemacht (vgl. Statistisches Bundesamt 2018d). Nachhaltige Neubaukonzepte sollten durch flexible Gebäudekonzepte variable Belegungsdichten zulassen. Konventionelle Einfamilienhäuser sind für klassischen Familienkonzepte ausgelegt. Eine sowohl sozial als auch klimaoptimierte Architektur muss auf verschiedene Wohnbedürfnisse durch Familien-, Paar- und Singlehaushalte sowie Wohngemeinschaften eingehen. Eine flexible Architektur und die damit verbundene Reduzierung des Wärme- und Stromverbrauchs kann auch einer Energiearmut entgegenwirken.

Energiebewusstes Nutzerverhalten

Der durchschnittliche Stromverbrauch eines deutschen 2,3 Personenhaushaltes mit 2.410 kWh pro Jahr (vgl. BMUB 2016) liegt 30 % über dem in der Studie gewählten reduzierten Stromverbrauch mit effizienten Haushaltsgeräten. Eine Ausstattung mit hocheffizienten Haushaltsgeräten, Heizungspumpen und einer LED-Beleuchtung trägt maßgeblich zur Reduzierung des Nutzerstrombedarfs bei. Das Nutzerverhalten kann durch die Visualisierung der Energieverbräuche sensibilisiert werden. Das im Aktiv-Stadthaus in Frankfurt umgesetzte digitale „Nutzerinterface“ (Nutzerinterface 2017) informiert den Mieter zeitnah über den eigenen Strom- und Wärmeverbrauch und gibt die Möglichkeit diesen interaktiv zu steuern.

6.2 Empfehlungen für künftiges politisches Handeln

Erklärtes Ziel der Europäischen Union ist die Entwicklung eines sicheren, nachhaltigen und wettbewerbsfähigen Energiesystems bis 2050. Die Mitgliedstaaten sind gefordert einen langfristigen nationalen Fahrplan zu entwickeln, um die kurz, mittel- und langfristigen Ziele zur Reduktion der Treibhausgasemissionen zu erreichen. Meilensteine mit entsprechend umzusetzenden Maßnahmen sind zu definieren und mit messbaren Fortschrittsindikatoren zu belegen (vgl. EPBD Update 2018).

Aus den Ergebnissen der vorliegenden Studie lassen sich Themenfelder für künftige umweltpolitische Schwerpunkte ableiten. Die zur Umsetzung empfohlenen Maßnahmen und Instrumente mit entsprechender Lenkungswirkung werden dargestellt.

Künftige politische Schwerpunkte und geeignete Instrumente für die Umsetzung

1. Ressourcenschonendes Bauen im Lebenszyklus
   - Ganzheitliche Bilanzierung von Gebäuden einführen (inkl. graue Energie)
   - Förderprogramme aufstellen
2. Neuausrichtung der Gebäudebewertung an Klimaschutzzielen
   - CO_2-Label für Gebäude einführen
   - Bilanzgrenzen für Gebäudebewertung erweitern (Graue Energie, Nutzerstrom)
   - Quartiers-Ansätze entwickeln und Kompensationsmaßnahmen ermöglichen
   - Individuelle Sanierungsfahrpläne für Gebäude fordern
   - Förderung für CO_2-Einsparungen in Planung und Betrieb
3. Dekarbonisierung der „Energie-Infrastruktur“
   - Ausbau der Förderung von Eigenstromnutzung
   - Abbau von Hürden bei Sektorkopplung
   - Flexible Erzeugungs- und Verbraucherinfrastruktur mit variablen Stromtarifen
   - Infrastrukturmaßnahmen für ein flexibles Stromsystem
   - Einführung einer CO_2-Bepreisung über alle Sektoren

Ressourcenschonendes Bauen im Lebenszyklus

Ein Bestandserhalt durch die energetische Sanierung von Mehrfamiliengebäuden nimmt eine zentrale Rolle im ressourcenschonenden und kosteneffizienten Bauen ein. Aufgrund des guten Kosten-/Nutzen-Verhältnisses hat eine Sanierung von großen Mehrfamiliengebäuden Priorität vor einem Neubau. Im Neubaubereich müssen alternative Leicht- und Holzbauweisen mit niedrigem Anteil an grauer Energie für die Gebäudekonstruktion verbreitet umgesetzt werden.

- Ganzheitliche Bilanzierung von Gebäuden einführen

Um Sanierungsvorhaben und im Neubau Bauweisen mit niedrigem Einsatz an grauer Energie zu forcieren, ist eine Bilanzierung über den gesamten Lebenszyklus (inkl. Herstellphase und EoL) notwendig. Entsprechende bausoftwaretechnischen Lösungen zur technischen Umsetzung sind auf dem Markt vorhanden. Eine standardisierte Nachweismethode mit geeignetem vereinfachtem Verfahren muss erarbeitet und die Rahmenbedingungen für eine mittelfristige Verankerung ins Ordnungsrecht geklärt werden (vgl. Mahler 2018).

- Förderprogramme für Bauweisen mit niedrigem Energieaufwand

Eine kurzfristige Möglichkeit zur Berücksichtigung der „grauen Energie“ ist eine Ergänzung der bereits bestehenden KfW–Effizienzhäuser durch eine zusätzliche Anforderung. In der Schweiz wird die „graue Energie“ durch die zusätzlichen Kriterien im Standard Minergie Eco (MINERGIE 2018) bereits berücksichtigt. Förderungen können entsprechend der erreichten CO_2-Einsparungen in der Konstruktion im Vergleich zu einer konventionellen Bauweise erfolgen. Eine angemessene Höhe ist im Abgleich mit CO_2-Vermeidungskosten in €/tCO_2 und den Kosten für den Mehraufwand für eine Lebenszyklus-Planung, der Ausschreibung und dem Nachweis von Mehrinvestitionskosten für "bessere" Produkte zu bestimmen (vgl. Mahler 2018).

Neuausrichtung der Gebäudebewertung an Klimaschutzzielen

Im Kontext der Klimaschutzziele ist dringend eine Neuorientierung zur Beurteilung der ganzheitlichen Gebäudeperformance erforderlich. Dazu sind bestehende Gesetze, Verordnungen und die Nachweisverfahren zum nachhaltigen Bauen zu vereinfachen und in Richtung eines holistischen Ansatzes für mehr Klimaschutz zu entwickeln.

- Label mit CO_2-Zielwert für Gebäude im Bestand und Neubau einführen

Der Energieaufwand der Nutzungsphase prägt mehrheitlich den Gebäudeenergieaufwand im Lebenszyklus und kann kosteneffizient reduziert werden. Instrumente mit Lenkungswirkung hinsichtlich Reduzierung des Gesamtenergieaufwandes sind gefordert. Zur Vereinfachung und Transparenz wird die Einführung eines CO_2-Labels empfohlen. Konkret wird vorgeschlagen, einen festen CO_2-Zielwert für heutige Neubauten und für Bestandssanierungen festzulegen, anstatt eine Bewertung über Referenzgebäude und den Primärenergiebedarf vorzunehmen (vgl. Mahler 2018). Das Referenzgebäudeverfahren ist nicht an einer für den Klima- und Ressourcenschutz ausgerichteten absoluten Zielgröße orientiert. Das derzeitige Verfahren ist nicht transparent und daher ohne Lenkungswirkung. Der Ausweis von CO_2-Emissionen ist ein wichtiger Aspekt für die Berichterstattung und das Monitoring der Fortschritte hinsichtlich erreichter Klimaschutzziele im Gebäudebereich (vgl. EPBD Entwurf 2018). Förderprogramme sollten deshalb künftig nicht nur effiziente Gebäudehüllen, sondern auch Investitionen in eine Verbesserung der energetischen Infrastruktur (z.B. regenerative Wärmenetze, Photovoltaik-„Eigenstromnutzung“) adressieren.

- Bilanzgrenzen für Gebäudebewertung erweitern (Graue Energie, Nutzerstrom, E-Mobilität)

Die Bilanzgrenzen für die Gebäudebewertung sollen durch den Anteil grauer Energie für die Gebäudekonstruktion und den Energiebedarf für den Gebäudebetrieb, inklusive Nutzerstrom, erweitert werden. Ein künftiger CO_2-Zielwert für Wohngebäude muss diese Bilanzgrenze umfassen. Um die Eigenstromnutzung weiter auszubauen und die Sektorkopplung durch den Aufbau der Infrastruktur voranzutreiben, ist mittelfristig die Bilanzierung von Elektromobilität sinnvoll.

- Individuelle Klimapläne für Gebäude

Auf Basis des erarbeiteten CO_2-Zielwertes für das Jahr 2050 kann ein individueller Klimaschutzplan für Gebäude gefordert werden. Die deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen (vgl. DGNB 2018) hat bereits einen Vorschlag für einen individuellen Klimaschutzplan für Gebäude vorgelegt, indem eine stufenweise Absenkung der CO_2-Werte gemäß definierter Zwischenziele bis zur Klimaneutralität im Jahr 2050 erfolgt. Bestandteil ist die Identifizierung von kosteneffizienten Maßnahmen und ein aus kosten- und praktischen Gründen geeigneter Zeitpunkt zur Umsetzung der Maßnahmen. Die Kostenbewertung der Maßnahmen und die Erstellung von individuellen Sanierungsfahrplänen durch entsprechende finanzielle bzw. steuerliche Anreize hängt von weiteren Aspekten, wie beispielsweise der Einführung einer CO_2-Abgabe oder CO_2-Bepreisung, ab.

- Quartiers-Ansätze entwickeln und Kompensationsmaßnahmen ermöglichen

Quartiersansätze müssen auf energieeffizienten Gebäuden gemäß dem Prinzip „Efficiency First“ basieren und darüber hinaus eine Anrechnung von übergeordneten Maßnahmen ermöglichen. Für die gewünschte Kopplung der Sektoren Strom, Wärme und Mobilität ist dies ein entscheidender Aspekt. Durch die Realisierung von Energiesystemen für Quartiere mit Erzeugung und Speicherung regenerativer Energien sowie einer Bereitstellung von Nahwärme und Strom für Gebäude und Mobilität können CO_2-Einsparungen erreicht werden, welche über den Einzelgebäudeansatz hinausgehen. Zudem werden durch einen Quartiersansatz weitere wichtige Aspekte, wie Energiespeicherung und Flexibilisierung der Nachfrage- und Erzeugungsleistung und damit ein Beitrag zur Netzstabilisierung möglich. Die Einführung eines zusätzlichen Indikators („Smart Readiness“, vgl. EPBD Update 2018), welcher diese Vorteile abbildet, kann derartige Konzepte verbreiten.

Niedrige Emissionen bis hin zur Klimaneutralität innerhalb der Bilanzgrenze Gebäudegrundstück zu erreichen, kann für Bestandsgebäude und verdichtete innerstädtische Quartiere eine Herausforderung darstellen. Kompensationsmöglichkeiten durch den Bezug von Ökostrom, regenerativ erzeugtem Gas oder CO_2-Senken innerhalb der Bilanzgrenze müssen in begrenztem Rahmen erlaubt und durch nachvollziehbare Zertifikate bestätigt werden. In der momentanen ökobilanziellen Gebäudebewertung wird der überschüssig dezentral erzeugte erneuerbare Strom nur teilweise in die Gebäudebilanz einberechnet. Um den Einfluss einer dezentralen Energieerzeugung zu bilanzieren, muss eine einheitliche Gutschrift für den Anteil des ins Netz eingespeisten Stroms erfolgen. Die Möglichkeit einer Doppelbilanzierung des regenerativen Stromanteils muss dabei ausgeschlossen werden.

- Förderung für CO_2-Einsparungen in Planung und Betrieb

Die Effizienz der bisherigen staatlichen Subventionen für vorwiegend investive Maßnahmen zur Energieeinsparung und der technischen Nutzung von Erneuerbaren Energien ist im Kontext der erzielten CO_2-Reduzierungen fraglich. Künftige Förderprogramme sollen so konzipiert sein, dass sie nicht Gebäudeenergiestandards oder Einzelmaßnahmen nach dem Gießkannen-Prinzip fördern, sondern CO_2-sparende Energiekonzepte bezuschussen. Eine weitere Möglichkeit besteht in der monetären Bewertung von tatsächlich nachgewiesenen Emissionen im realen Gebäudebetrieb. Bei Nichterfüllung der Zielvorgaben gemäß individueller Klimaschutzplan wären CO_2-Abgaben zu leisten (vgl. DGNB 2018). Eine alternative Möglichkeit wäre die Bezuschussung der realen CO_2-Einsparungen, wenn sie bereits heute über die Zielvorgaben hinaus erfüllt werden.

Dekarbonisierung der „Energie-Infrastruktur“

Um die mittel- und langfristig gesteckten Klimaschutzziele im Gebäudesektor zu erreichen, ist eine beschleunigte Dekarbonisierung der Energieinfrastruktur erforderlich. Der Anteil kohlenstoffarmer und erneuerbarer Energieträger in den Strom-, Gas- und Wärmenetzen muss deutlich erhöht werden. Die dezentrale und zentrale Strombereitstellung aus Sonnen- und Windenergie hat dabei eine Schlüsselrolle. Für die Umsetzung der „Wärmewende“ ist die Verbreitung von Nahwärmeversorgungssystemen mit hohem regenerativen Anteil oder der Nutzung von industrieller Abwärme ein wesentlicher Aspekt.

- Forderung von erneuerbaren Stromerzeugungsanlagen

Die Forderung bzw. Ermöglichung von erneuerbaren Stromerzeugungsanlagen muss bei Neubau- und Sanierungsvorhaben im Baurecht verankert sein.

- Ausbau der Förderung von Eigenstromnutzung

Mit dem Mieterstromgesetz (vgl. EEG 2017) sind wichtige Voraussetzung für die Nutzung der Solarenergie durch Mieterstrommodelle geschaffen. Das Mieterstrommodell für die Direktnutzung des erzeugten Solarstroms muss jedoch auf weitere dezentrale Energieerzeuger, wie den durch KWK oder Kleinstwindkraftanlagen erzeugten Strom, ausgeweitet werden. Die derzeitigen rechtlichen Hemmnisse in Verbindung mit wirtschaftlichen Nachteilen durch die EEG-Umlage verhindern großflächig die Umsetzung von KWK-Anlagen. Kleinstwindkraftanlagen sind im Gebäudebereich noch nicht verbreitet.

- Abbau von Hürden bei Sektorkopplung

Die Sektorkopplung zwischen Strom, Wärme und Verkehr ist ein wichtiger Baustein zur Erreichung der Klimaschutzziele. Hier stellt das bestehende Umlagen- und Abgabensystem bei der Umsetzung von Maßnahmen wie Power2Gas, Speichersystemen oder der Integration von Elektromobilität eine Hürde dar. Bei Bezug von erneuerbarem „Überschussstrom“ aus dem öffentlichen Netz für Elektrolyse muss derzeit die EEG-Umlage gezahlt werden. Die Entnahme von Strom aus Stromspeichern wird z.T. wie normaler Netzstrom behandelt und ist ebenso mit der EEG-Umlage belegt. Mittels dem zusätzlichen Angebot durch Bereitstellung von Speichersystemen, welche zur Netzentlastung und –flexibilisierung beitragen, entsteht ein finanzieller Nachteil. Ein weiteres Hemmnis für die Umsetzung derartiger Vorhaben ist der Wegfall der Gewerbesteuerbefreiung für die Wohnungswirtschaft sobald sie als Energieversorger fungiert.

- Flexible Erzeugungs- und Verbraucherinfrastruktur mit variablen Stromtarifen

Verbraucherseitig kann eine regenerative Energiebereitstellung durch eine flexible Erzeugungs- und Verbraucherinfrastruktur mit variablen Stromtarifen unterstützt werden. Ein solches Preissystem zielt darauf Lastspitzen zu reduzieren, regenerative Energien besser zu nutzen und die Energiekosten des Verbrauchers zu reduzieren. Viele Stromanbieter bieten bereits einen variablen Stromtarif an, der in 2 - 3 Tarifstufen (Tag-, Nacht- und Wochenend-Tarif) unterteilt ist (vgl. Verbraucherzentrale 2016). Jedoch schwankt innerhalb eines Tages das Energieangebot, bereitgestellt durch Wind- und Sonnenanlagen, sehr stark, weshalb der davon abhängige Strompreis pro Megawattstunde sich in 24 Stunden mehrfach im zweistelligen Eurobereich ändert (vgl. NEXT 2018b). Experten fordern deshalb Tarife, welche die Stromkosten aus den momentanen Strompreisen berechnen (Agora Energiewende 2017).

Studien zeigen, dass sich der Umstieg auf variable Stromtarife für den Privathaushalt derzeit aus finanzieller Sicht noch nicht lohnt, da die Investitionen durch den Einbau eines Smart Meters die Kosteneinsparungen noch übersteigen (vgl. WIK 2015).

Für die Flexibilisierung weiterer Verbraucher, wie Wärmepumpen und Elektromobilität, sind variable Stromtarife Voraussetzung. Durch ein Nachfrage- und Erzeugungsmanagement können beispielsweise die Betriebszeiten von Wärmepumpensystemen in Abhängigkeit von Speicherzuständen, Wärmenachfrage und Wetterprognosen geregelt und ggf. die Wärmeerzeugung verschoben werden. Bei strombasierten Nahwärmeversorgungen können variable Stromtarife die Wärmekosten für den Endverbraucher senken und einen Anreiz für das Angebot von Regelenergie bieten. Elektrofahrzeugflotten können in Zeiten von überschüssig verfügbarem regenerativem Strom geladen werden.

Die Wirtschaftlichkeit und damit eine breite Umsetzung virtueller Kraftwerke in größerem Maßstab durch den Zusammenschluss von Erzeugungs- und Speichersystem zur Teilnahme am Regelenergiemarkt erhöht sich ebenfalls. Mit VHPready (Virtual Heat and Power Ready) ist ein offener Industriestandard für die Steuerung und den Zusammenschluss von dezentralen Strom- und Wärmeerzeugungsanlagen, Verbrauchern und Energiespeichern zu Virtuellen Kraftwerken verfügbar (vgl. VHP ready 2018).

- Infrastrukturmaßnahmen für ein flexibles Stromsystem

Eine dekarbonisierte „Energie-Infrastruktur“ setzt voraus, dass die Versorgungsnetze einen hohen Anteil erneuerbarer Energien leisten können. Dies bedeutet volatile Erzeugung auszugleichen und auch in Zeiten einer Dunkelflaute die Versorgungssicherheit zu gewährleisten. Neben der Flexibilisierung von Verbrauchern sind Investitionen in die Energieinfrastruktur durch Netzertüchtigung und Netzausbau notwendig. Dies betrifft Übertragungs- und Verteilnetze in Deutschland, aber auch einen überstaatlichen Netzausbau. Der Bereitstellung flexibler Leistung durch Zubau von Gaskraftwerken kommt eine größere Rolle zu und zusätzliche Speicherkapazitäten müssen bereitgestellt werden. Nach BCG/Prognos (vgl. BCG, Prognos 2018) werden verschiedene Techniken von dezentralen Batteriespeichern und größeren Pump- und Kavernenspeichern bis Redox-Flow-Batterien benötigt und durch Power-to-X-Anwendungen können CO_2-Einsparungen von mehr als 80 % erreicht werden.

- Einführung einer CO_2-Bepreisung über alle Sektoren

Das derzeitige EU-Emissionshandelssystem umfasst lediglich Stromerzeuger und Industrie. Die Sektoren Verkehr, Wärmeverbrauch für Wohnen und Landwirtschaft sind davon ausgenommen. Um eine Richtung vorzugeben und eine Lenkungswirkung hinsichtlich Reduktion der CO_2-Emissionen zu erreichen, fordern Akteure aus dem Energieforschungsbereich eine CO_2-Bepreisung von Energieträgern über alle Sektoren (vgl. Lange 2017/ Mihm 2017/ Bals 2018). Nach dem Verursacherprinzip werden die externen Kosten dort getragen, wo sie verursacht werden und die Verbraucher entlastet. Wind- und Photovoltaikanlagen mit niedrigen Stromgestehungskosten würden gegenüber bereits abgeschriebenen Kohlekraftwerken wettbewerbsfähig. Gebäudeeigentümer und -nutzer würden aus eigenem Interesse klimafreundlich handeln, weil die Kosten für die Nutzung fossiler Energieträger stark stiegen. Vorgaben und Subventionen wie den Kohleausstieg über Restlaufzeiten zu regeln und Ökostrom, Heizungssysteme, Gebäudestandards und Elektromobilität zu fördern, wären nicht mehr notwendig. Großbritannien hat bereits eine CO_2-Bepreisung eingeführt und China plant sie. Das Gegenargument der Benachteiligung des Standorts mit Abwanderung der Industrie wird somit hinfällig. Im Impulspapier (vgl. Bals 2018) werden Vorschläge für die Umsetzung einer CO_2-Bepreisung über einen hohen Basispreis oder als gleitenden Ansatz mit schrittweisem Kostenaufschlag gemäß klimapolitischer Ziele genannt.

7 Ausblick

Die Novelle der EU-Gebäuderichtlinie zielt auf die Erhöhung des Bestands an emissionsarmen und -freien Gebäuden bis 2050 und fordert von den Mitgliedsstaaten nationale Fahrpläne zur Senkung der CO_2-Emissionen im eigenen Gebäudesektor. Gefordert werden Niedrigstenergiegebäude mit einem Energiebedarf nahe Null, der dann möglichst durch lokale erneuerbare Energien zu decken ist. Die vorliegende Studie zeigt die notwendigen umweltpolitischen Schwerpunkte und umzusetzenden Maßnahmen im Wohnungsbereich auf.

In einem weiteren Schritt müssen die energetischen Anforderungen an Gebäude, ob „klimaneutral“ oder „emissionsarm“, und deren Bilanzierung zielorientiert definiert werden. Klimaneutrale Gebäude haben verbleibende CO_2-Emissionen von <= 0 $kgCO_2$-Ä./($m^2_{Wfl.}$·a). Nach derzeitiger Gebäudeenergiebewertung nach DIN V 18599 wird bei Wohngebäuden nur der Gebäudebetrieb ohne den anfallenden Nutzerstrom oder die verbaute „graue Energie“ bilanziert. Wird die Bilanzgrenze auf den tatsächlich innerhalb der Bilanzgrenze Grundstück anfallenden Energiebedarf erweitert, fallen zusätzliche CO_2-Emissionen an. Eine Alternative für die ganzheitliche Betrachtung ist ein klimaverträglicher Ansatz, basierend auf pro Kopf Emissionen für Wohnen in 2050, mit einem CO_2-Zielwert von beispielsweise 12 – 17 $kgCO_2$-Ä./($m^2_{Wfl.}$·a) (vgl. Mahler 2018). Für die Validierung eines solchen Zielwertes ist ein Szenario für die künftige Ressourcenverteilung auf Sektoren und Nutzungsstrukturen in Deutschland notwendig, wie es für die 2000-Watt-Gesellschaft in der Schweiz bereits erarbeitet wurde (vgl. SIA 2011).

Die Verankerung von Lebenszyklusbetrachtungen in Planungsabläufen und im Ordnungsrecht ist ein mittelfristiges Ziel. Dafür ist es notwendig die Datenbasis ÖKOBAUDAT und Produktdeklarationen von Herstellern (EPDs) auszubauen. Eine vertiefte Betrachtung der zeitlichen Weiterentwicklung der Infrastruktur und Szenarien zur Entwicklung eines Energiemixes in Deutschland muss erfolgen und deren Auswirkung auf Bauprodukte und den Gebäudebetrieb untersucht werden. Die Umstellung auf CO_2 als Bewertungsgröße im Gebäudebereich hängt von diesen Grundlagen ab, da eine statische Bewertung auf momentanen Faktoren nicht die zeitliche Weiterentwicklung der Energiebereitstellung berücksichtigt. Kurzfristig ist es dennoch sinnvoll, die Ausweisung von CO_2-Emissionen als weitere Größe im gesetzlichen Nachweis zu fordern (vgl. Mahler 2018).

Um die angestrebten Klimaschutzziele im gesamten Gebäudebereich zu erreichen, ist eine Ausweitung der Untersuchungen auf Nichtwohngebäude und Quartiere notwendig. Es ist zu untersuchen, welchen Einfluss andere Nutzungsstrukturen und die verstärkte Sektorkopplung im Quartier auf die Wahl und Priorisierung von Maßnahmen haben.

8 Literaturverzeichnis

Agora Energiewende (2017): Neue Preismodelle für Energie: Grundlagen einer Reform der Entgelte, Steuern, Abgaben und Umlagen auf Strom und fossile Energieträger. Berlin

Bals, Christoph et al. (2018): Stärkere CO2-Bepreisung: Neuer Schwung für die Klimapolitik. dena. https://www.dena.de/fileadmin/dena/Dokumente/Meldungen/dena_neuer_schwung_fuer_die_klimapolitik.pdf. aufgerufen am 26.02.2019

BCG/ Prognos (2018): Klimapfade für Deutschland. BDI. Januar 2018

BKI (2015): BKI Baukosten Gebäude – Neubau, statistische Kostenkennwerte. BKI Baukosteninformationszentrum Deutscher Architektenkammern

BMUB (2016): Stromspiegel für Deutschland 2016. April 2016

BMWi (2015): Entwicklung von Energiepreisen und Preisindizes und Entwicklung von monatlichen Energiepreisen, Tabellen 26 und 26a der Gesamtausgabe Energiedaten. https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Infografiken/Energie/Energiedaten/Energiepreise-und-Energiekosten/energiedaten-energiepreise-35.html. aufgerufen am 17.02.2016

BNB (2017): Nutzungsdauern von Bauteilen für Lebenszyklusanalysen nach Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen (BNB). Stand 24.02.2017

Bürger, Veit/Hesse, Tilman/ Palzer, Andreas/Köhler, Benjamin/Herkel, Sebastian/Engelmann, Peter/ Quack, Dietlinde (2015): Klimaneutraler Gebäudebestand 2050. Öko-Institut, Freiburg/Fraunhofer ISE, Freiburg. BMUB im Auftrag des Umweltbundesamtes

C.A.R.M.E.N. (2015): Der Holzpellet-Preis-Index, Jahresmittelwerte, Preisentwicklung bei Holzpellets. https://www.carmen-ev.de/infothek/preisindizes/holzpellets/jahresmittelwerte/121-der-pellet-preis-index-jahresmittelwerte. aufgerufen am 17.02.2016

Diefenbach, Nikolaus/ Stein, Britta/ Loga, Tobias/ Rodenfels Markus/ Gabriel, Jürgen/ Jahn, Karin (2016): Monitoring der KfW-Programme „Energieeffizient Sanieren“ und „Energieeffizient Bauen“ 2015. KfW Bankengruppe

DGNB (2018): DGNB Rahmenwerk für „Klimaneutrale Gebäude und Standorte“. Beta Version. Stand 3.März 2018

EEG (2017): Gesetz für den Ausbau erneuerbarer Energien. Stand 17.07.2017

Eble Messerschmidt Partner, EGS-plan GmbH, IER Universität Stuttgart (2016): Energiekonzept & Empfehlungen zum städtebaulichen Wettbewerb Freiburg Dietenbach. Ökonomische Analyse und Bewertung baulich-energetischer Standards. April 2016

EPBD Update (2018): Energy Performance of Buildings Directive Update: Entwurf. Stand 25.01.2018

Held, M. (2011): Ökobilanz von Dünnschicht Photovoltaiksystemen und deren Recycling am Beispiel von CdTe Modulen. In 7. Anwenderforum Grundlagen Dünnschicht-Photovoltaik: Materialien – Module – Systeme. Regensburg: Ostbayerisches Technologie-Transfer-Institut.

Held, M. (2010): Photovoltaik aus Sicht der Ökobilanz (Presentation). Munich

Held, M. (2009): Life Cycle Assessment of CdTe PV Module Recycling. In The compiled state-of-the-art of PV solar technology and deployment: 24th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition (pp. pp. 2370–2375). Hamburg

Held, M., & Albrecht, S. (2008): Ökologische Betrachtung von Photovoltaikapplikationen für den Baubereich. Kassel

Hegger, Manfred/ Fisch, Norbert/ Jenner, Natalie/ Gehrmann, Simone/ Hassemer, Friederike/ Hartwig, Joost/ Mück, Christopher/ Mahler, Boris/ Nusser, Tobias/ Idler, Simone/ Wiege, Andreas/ Erlenkämper, Kai (2014): Aktiv-Stadthaus: Entwicklungsgrundlage für städtische Mehrfamilienhäuser in Plus-Energie-Bauweise nach EU 2020 und zur Vorbereitung eines Demonstrativ-Bauvorhabens in Frankfurt am Main“. Fraunhofer IRB Verlag

Hinz, Eberhard (2015): Kosten energierelevanter Bau- und Anlagenteile bei der energetischen Modernisierung von Altbauten. Institut Wohnen und Umwelt. BMUB. August 2015

Holzbau Deutschland (2017): Lagebericht. http://www.holzbau-deutschland.de/fileadmin/user_upload/eingebundene_Downloads/Lagebericht_2017.pdf. abgerufen am 18.12.2017

IER (2015) auf Basis der Studie Prognos, EWI, GWS (2014): Entwicklung der Energiemärkte – Energiereferenzprognose. Basel – Köln – Osnabrück. Juni 2014

IWU Institut Wohnen und Umwelt (2015): Deutsche Wohngebäudetypologie. 2. Auflage. Darmstadt

Jahresmarktwert Solar (2015). https://www.netztransparenz.de/EEG/Marktpraemie/Marktwerte. aufgerufen am 18.08.2015

Krampe, Leo/Wünsch, Marco/ Dr. Schalle, Heidrun (2017): Mieterstrom. Rechtliche Einordnung, Organisationsformen, Potenziale und Wirtschaftlichkeit von Mieterstrommodellen (MSM). Prognos/BH&W im Auftrag des BMWi. Berlin

KWKG Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz (2012): Gesetz für die Erhaltung, die Modernisierung und den Ausbau der Kraft-Wärme-Kopplung

Lange, Nitsch, Becker: Plädoyer für eine wirksame CO_2-Bepreisung in dieser Legislaturperiode! ZNER 2017. Heft 6

Lozanovski, A., & Held, M. (2010): Update of the environmental indicators and Energy Payback Time (EPBT) of CIS Modules and scenario analysis of solar cell printing. In EU PVSEC proceedings: 25th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition / 5th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, 6-10 September 2010, Valencia, Spain (pp. pp. 4569–4574). Munich: WIP-Renewable Energies.

NEXT Kraftwerke (2018a): Was ist die Dunkelflaute? https://www.next-kraftwerke.de/wissen/strommarkt/dunkelflaute. aufgerufen am 12.04.2018. aufgerufen am 12.04.2018

NEXT Kraftwerke (2018b): Ein variabler Stromtarif für Industrie und Gewerbe. https://www.next-kraftwerke.de/virtuelles-kraftwerk/stromverbraucher/variabler-stromtarif. aufgerufen am 16.04.2018

Nutzerinterface (2017): Nutzerinterface für Plus Energie Mehrfamilienhäuser. https://nutzerinterface.com/. aufgerufen am 26.04.2018

Dr. Mahler, Boris / Idler, Simone / Dr. Gantner, Johannes (2019): Mögliche Optionen für eine Berücksichtigung von grauer Energie im Ordnungsrecht oder im Bereich der Förderung. BBRS. Zukunft Bau. https://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/FP/ZB/Auftragsforschung/5EnergieKlimaBauen/2017/graue-energie/Endbericht.pdf?__blob=publicationFile&v=3. aufgerufen am 26.02.2019

Mihm, Andreas (2017): Energiepolitik: Vorzüge einer Klimasteuer. FAZ. 30.09.2017

MINERGIE (2018): Baustandard MINERGIE-ECO. https://www.minergie.ch/de/zertifizieren/eco/. aufgerufen am 20.03.2018

Passivhaus Datenbank (2017): http://whttps://www.next-kraftwerke.de/wissen/strommarkt/dunkelflauteww.passivhausprojekte.de/index.php. aufgerufen am 22.11.2017

Passivhaus Institut (2016): Lüftungskonzepte für die Sanierung. https://europhit.eu/sites/europhit.eu/files/2016_Component-Award_Broschuere.pdf. aufgerufen am 21.11.2017

SIA (2011): SIA-Effizienzpfad Energie, SIA Merkblatt 2040

sirAdos-Baukostenberater (2015). Version 1.2.631. Stand 01.05.2015

Statistisches Bundesamt (2015)a: Baugenehmigungen neuer Gebäude: Deutschland, Jahre, Gebäudeart, Energieverwendung, Energieart. https://www-genesis.destatis.de/genesis/online/data;jsessionid=CCA3A595480EC6ECCB95B9296FE9D67F.tomcat_GO_1_3?operation=abruftabelleBearbeiten&levelindex=1&levelid=1511344469205&auswahloperation=abruftabelleAuspraegungAuswaehlen&auswahlverzeichnis=ordnungsstruktur&auswahlziel=werteabruf&selectionname=31111-0008&auswahltext=%23Z-01.01.2016%2C01.01.2015&werteabruf=Werteabruf. aufgerufen am 21.11.2017

Statistisches Bundesamt (2015)b: Baufertigstellungen neuer Gebäude: Deutschland, Jahre, Gebäudeart, Energieverwendung, Energieart. https://www-genesis.destatis.de/genesis/online/data;jsessionid=42DA6770B365FF914EEF234C6692D12C.tomcat_GO_1_2?operation=abruftabelleBearbeiten&levelindex=1&levelid=1511344246575&auswahloperation=abruftabelleAuspraegungAuswaehlen&auswahlverzeichnis=ordnungsstruktur&auswahlziel=werteabruf&selectionname=31121-0004&auswahltext=%23Z-01.01.2016%2C01.01.2015&werteabruf=Werteabruf. aufgerufen am 21.11.2017

Statistisches Bundesamt (2017)c: Pressemitteilung Nr. 220. https://www.destatis.de/DE/PresseService/Presse/Pressemitteilungen/2017/06/PD17_220_31121.html. aufgerufen am 21.11.2017

Statistisches Bundesamt (2018)d: Gesellschaft und Staat. Wohnen. Wohnungsbestand in Deutschland. https://www.destatis.de/DE/ZahlenFakten/GesellschaftStaat/EinkommenKonsumLebensbedingungen/Wohnen/Tabellen/Wohnungsbestand.html. aufgerufen am 12.04.2018

UBA Umweltbundesamt (2017): Emissionsbilanz erneuerbarer Energieträger 2016

Verbraucherzentrale Bundesverband e.V. (2016): Variable Stromtarife aus Verbrauchersicht. Digitalisierung des Energiesystems. Berliner Energietage 2016

VDI 2067 (2012): Wirtschaftlichkeit gebäudetechnischer Anlagen, Grundlagen und Kostenberechnung. Blatt 1

WIK Wissenschaftliches Institut für Infrastruktur und Kommunikationsdienste GmbH (2015): Quantitative Auswirkungen variabler Stromtarife auf die Stromkosten von Haushalten. Kurzstudie für Verbraucherzentrale Bundesverband e.V. (vzbv)

König (2015): Investitionsmehrkosten für Ein- und Mehrfamiliengebäude in Holzbauweisen gegenüber Massivbauweisen auf Basis der SirAdos-Baudatenbank. Januar 2018

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Untersuchte Variantenmatrix am Beispiel Bestandssanierung 9

Abbildung 2: Typgebäude Neubau Mehrfamilienhaus 21

Abbildung 3: Typgebäude Neubau Einfamilienhaus 21

Abbildung 4: Typgebäude Sanierung 22

Abbildung 5: Anteil Gebäude (links) und Wohnfläche (rechts).....23

Abbildung 6: Anteil Heizenergieverbrauch 23

Abbildung 7: Übersicht Variantenmatrix Neubau 24

Abbildung 8: Übersicht Variantenmatrix Sanierung im Bestand 25

Abbildung 9: Bilanzgrenzen Gebäudeenergiestandards EnEV-2016 und Nullenergie 28

Abbildung 10: Bilanzgrenzen Gebäudeenergiestandard Passivhaus, Plusenergie und Autark 28

Abbildung 11: Lebenszyklusanalyse in der Ökobilanz.....33

Abbildung 12: CO_2-Emissionen von Außenwandkonstruktionen (Bezug: Außenwandfläche) 43

Abbildung 13: Ökobilanz Ranking Wärmedämmmaterialien links, Perimeter-Dämmmaterialien rechts.....43

Abbildung 14: GWP/ Jahresgesamtkosten der Energiekonzepte Neubau MFH ..47

Abbildung 15: KEAne/ Jahresgesamtkosten der Energiekonzepte Neubau MFH48

Abbildung 16: GWP der „üblichen Varianten“ Neubau MFH 49

Abbildung 17: KEAne der „üblichen Varianten“ Neubau MFH.....50

Abbildung 18: Anteile GWP an Herstellungsphase am Bsp. der „üblichen Variante“ Neubau Mehrfamilienhaus Plusenergie (Massivbauweise) 51

Abbildung 19: Anteile GWP an Herstellungsphase am Bsp. Neubau Mehrfamilienhaus Plusenergie in Holzbauweise 52

Abbildung 20: GWP der „ökooptimierten Varianten“ Neubau MFH 53

Abbildung 21: KEAne der „ökooptimierten Varianten“ Neubau MFH 54

Abbildung 22: GWP/ JGK und KEAne/ JGK der Neubauvarianten MFH.....55

Abbildung 23: GWP/ Jahresgesamtkosten der Energiekonzepte Neubau EFH ...58

Abbildung 24: KEAne/ Jahresgesamtkosten der Energiekonzepte Neubau EFH.59

Abbildung 25: GWP der „üblichen Varianten“ Neubau EFH 60

Abbildung 26: KEAne der „üblichen Varianten“ Neubau EFH.....61

Abbildung 27: Anteile GWP an Herstellung am Bsp. Neubau Einfamilienhaus Plusenergie 62

Abbildung 28: GWP der „ökooptimierten Varianten“ Neubau EFH 63

Abbildung 29: KEAne der „ökooptimierten Varianten“ Neubau EFH 64
Abbildung 30: GWP/ JGK und KEAne/ JGK Neubauvarianten EFH 65
Abbildung 31: GWP/ Jahresgesamtkosten Energiekonzepte Sanierung MFH E .69
Abbildung 32: KEAne/ Jahresgesamtkosten der Energiekonzepte Sanierung MFH E 70
Abbildung 33: GWP der „üblichen Varianten“ Sanierung MFH E 71
Abbildung 34: KEAne der „üblichen Varianten“ Sanierung MFH E 72
Abbildung 35: GWP der „ökooptimierten Varianten“ Sanierung MFH E 73
Abbildung 36: KEAne der „ökooptimierten Varianten“ Sanierung MFH E.....74
Abbildung 37: GWP/ JGK und KEAne/ JGK Sanierungsvarianten MFH E 75
Abbildung 38: GWP/ Jahresgesamtkosten Energiekonzepte Sanierung GMH F.78
Abbildung 39: KEAne/ JGK der Energiekonzepte Sanierung GMH F 79
Abbildung 40: GWP der „üblichen Varianten“ Sanierung GMH F 80
Abbildung 41: KEAne der „üblichen Varianten“ Sanierung GMH F 81
Abbildung 42: GWP der „ökooptimierten Varianten“ Sanierung GMH F.....82
Abbildung 43: KEAne der „ökooptimierten Varianten“ Sanierung GMH F 83
Abbildung 44: GWP/ JGK und KEAne/ JGK der Sanierungsvarianten GMH F 84
Abbildung 45: GWP/ Jahresgesamtkosten Energiekonzepte Sanierung EFH C ..87
Abbildung 46: KEAne/ Jahresgesamtkosten der Energiekonzepte Sanierung EFH C 88
Abbildung 47: GWP der „üblichen Varianten“ Sanierung EFH C.....89
Abbildung 48: KEAne der „üblichen Varianten“ Sanierung EFH C 90
Abbildung 49: GWP der „ökooptimierten Varianten“ Sanierung EFH C 91
Abbildung 50: KEAne der „ökooptimierten Varianten“ Sanierung EFH C 92
Abbildung 51: GWP/ JKG und KEAne/ JGK Sanierungsvarianten EFH C 93
Abbildung 52: GWP/ Jahresgesamtkosten Energiekonzepte Sanierung EFH E ..96
Abbildung 53: KEAne/ Jahresgesamtkosten der Energiekonzepte Sanierung EFH E 97
Abbildung 54: GWP der „üblichen Varianten“ Sanierung EFH E 98
Abbildung 55: KEAne der „üblichen Varianten“ Sanierung EFH E 99
Abbildung 56: GWP der „ökooptimierten Varianten“ Sanierung EFH E 100
Abbildung 57: KEAne der „ökooptimierten Varianten“ Sanierung EFH E.....101
Abbildung 58: GWP/ JGK und KEAne/ JGK Sanierungsvarianten EFH E 102
Abbildung 59: Kosteneffizienz von Einzelmaßnahmen in Neubau und Sanierung.....104
Abbildung 60: GWP der Energiekonzepte Mehrfamilienhaus Neubau und Sanierung.....106

Abbildung 61: JGK der Energiekonzepte Mehrfamilienhaus Neubau und Sanierung 107

Abbildung 62: GWP der Energiekonzepte Einfamilienhaus Neubau und Sanierung 108

Abbildung 63: Jahresgesamtkosten der Energiekonzepte Einfamilienhaus Neubau und Sanierung 109

Abbildung 64: GWP/ Jahresgesamtkosten Wärmepumpen-Konzepte Neubau Mehrfamilienhaus 110

Abbildung 65: GWP/ Jahresgesamtkosten Energiekonzepte Neubau MFH (inkl. WP-Varianten) 112

Abbildung 66: Anteile GWP an Herstellungsphase des autarken Mehrfamilienhauses 113

Abbildung 67: GWP/ Jahresgesamtkosten Energiekonzepte Neubau MFH (inkl. autarke Variante) 114

Abbildung 68: GWP/ Jahresgesamtkosten Energiekonzepte Neubau MFH ohne/ mit Förderung 116

Abbildung 69: GWP/ Jahresgesamtkosten Sanierungskonzepte MFH E ohne/ mit Förderung 117

Abbildung 70: Szenario 2050 im Vergleich mit Basis 2015 für die Sanierung MFH E 119

Abbildung 71: KEAne der Energiekonzepte Mehrfamilienhaus Neubau und Sanierung 163

Abbildung 72: KEAne der Energiekonzepte Einfamilienhaus Neubau und Sanierung 164

Abbildung 73: Lebenszyklusphasen einer Ökobilanz 171

Abbildung 74: Modellierung eines Gebäudes 172

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Übersicht der untersuchten Gebäudeenergiestandards 9

Tabelle 2: Übersicht Typgebäude Neubau 22

Tabelle 3: Übersicht Typgebäude Sanierung im Bestand 22

Tabelle 4: U-Werte der Hauptbauteile Neubau Mehrfamilienhaus 24

Tabelle 5: U-Werte der Hauptbauteile Bestand und Sanierung MFH E 25

Tabelle 6: Randbedingungen der Anlagentechnik zur Wärmeversorgung .. 26

Tabelle 7: Bilanzgrenzen und Anforderungen der untersuchten Gebäudeenergiestandards 27

Tabelle 8: Wärmebedarfe der Typgebäude Neubau und Sanierung 29

Tabelle 9: Faktoren der Wirkungsindikatoren KEAne, GWP und Primärenergie nach EnEV 30

Tabelle 10: Systemgrenzen Jahresgesamtkosten und Ökobilanzmodell 32

Tabelle 11: Definition des Ziels und Untersuchungsrahmens 34

Tabelle 12: Investitionskosten KG 300 Mehr- und Einfamilienhaus Neubau (brutto) 36

Tabelle 13: Investitionskosten Fenster KG 300 Neubau und Sanierung (brutto) 37

Tabelle 14: Investitionskosten KG 300 Sanierung im Bestand (brutto) 37

Tabelle 15: Investitionskosten KG 430 Lüftung und KG 440 PV (netto) 38

Tabelle 16: KG 400 Technische Lebensdauer, Instands- und Wartungsfaktoren 39

Tabelle 17: Energiepreise 2015 [brutto] 40

Tabelle 18: Einspeisevergütung von PV-Anlagen nach EEG in ct/kWh 41

Tabelle 19: Variantenmatrix Energiekonzepte Neubau Mehrfamilienhaus ... 44

Tabelle 20: „Übliche Varianten“ Neubau MFH 44

Tabelle 21: Jahresgesamtkosten Neubau MFH (ohne Energiepreissteigerung) 45

Tabelle 22: Jahresgesamtkosten Neubau MFH (2 % Energiepreissteigerung) 45

Tabelle 23: „Ökooptimierte Varianten“ Neubau MFH 52

Tabelle 24: Variantenmatrix Energiekonzepte Neubau Einfamilienhaus 56

Tabelle 25: „Übliche Varianten“ Neubau EFH 56

Tabelle 26: Jahresgesamtkosten Neubau EFH (ohne Energiepreissteigerung) 57

Tabelle 27: Jahresgesamtkosten Neubau EFH (2 % Energiepreissteigerung) 57

Tabelle 28: „Ökooptimierte Varianten“ Neubau EFH 62

Tabelle 29: Variantenmatrix Energiekonzepte Sanierung MFH E 66
Tabelle 30: „Übliche Varianten“ Sanierung MFH E.....67
Tabelle 31: Jahresgesamtkosten Sanierung MFH E (ohne Energiekostensteigerung).....67
Tabelle 32: Jahresgesamtkosten Sanierung MFH E (2 % Energiepreissteigerung) 68
Tabelle 33: „Ökooptimierte Varianten“ Sanierung MFH E 72
Tabelle 34: Variantenmatrix Energiekonzepte Sanierung GMH F.....75
Tabelle 35: „Übliche Varianten“ Sanierung GMH F.....76
Tabelle 36: Jahresgesamtkosten Sanierung GMH F (ohne Energiepreissteigerung) 76
Tabelle 37: Jahresgesamtkosten Sanierung GMH F (2 % Energiepreissteigerung) 77
Tabelle 38: „Ökooptimierte Varianten“ Sanierung GMH F 81
Tabelle 39: Variantenmatrix Energiekonzepte Sanierung EFH C 84
Tabelle 40: „Übliche Varianten“ Sanierung EFH C.....85
Tabelle 41: Jahresgesamtkosten Sanierung EFH C (ohne Energiepreissteigerung) 85
Tabelle 42: Jahresgesamtkosten Sanierung EFH C (2 % Energiepreissteigerung) 86
Tabelle 43: „Ökooptimierte Varianten“ Sanierung EFH C 90
Tabelle 44: Variantenmatrix Energiekonzepte Sanierung EFH E 93
Tabelle 45: Übliche Varianten Sanierung EFH E.....94
Tabelle 46: Jahresgesamtkosten Sanierung EFH E (ohne Energiepreissteigerung) 94
Tabelle 47: Jahresgesamtkosten Sanierung EFH E (2 %/a Energiepreissteigerung) 95
Tabelle 48: „Ökooptimierte Varianten“ Sanierung EFH E 99
Tabelle 49: JAZ der Wärmepumpen-Varianten der Typgebäude.....112
Tabelle 50: Förderprogramme Neubau (Stand 2018) 115
Tabelle 51: Förderprogramme Sanierung (Stand 2018) 116
Tabelle 52: CO_2-Faktoren der Energieträger 2015 und Szenario 2050 118
Tabelle 53: Ausführung der Hauptbauteile Neubau MFH in Massivbauweise 142
Tabelle 54: Ausführung der Hauptbauteile Neubau MFH in Holzbauweise .142
Tabelle 55: U-Werte der Hauptbauteile Neubau EFH 143
Tabelle 56: Ausführung der Hauptbauteile Neubau EFH in Massivbauweise 143

Tabelle 57: Ausführung der Hauptbauteile Neubau EFH in Holzbauweise ..144
Tabelle 58: U-Werte der Hauptbauteile Bestand und Sanierung EFH C.....144
Tabelle 59: Ausführung der Hauptbauteile Bestand und Sanierung EFH C .145
Tabelle 60: U-Werte der Hauptbauteile Bestand und Sanierung EFH E.....145
Tabelle 61: Ausführung der Hauptbauteile Bestand und Sanierung EFH E .146
Tabelle 62: Ausführung der Hauptbauteile Bestand und Sanierung MFH E 146
Tabelle 63: U-Werte der Hauptbauteile Bestand und Sanierung GMH F 147
Tabelle 64: Ausführung der Hauptbauteile Bestand und Sanierung GMH F 147
Tabelle 65: Investitionskosten Neubau KG 300 und KG 400 (allgemein)....148
Tabelle 66: Investitionskosten Neubau KG 420 (leistungsabhängig).....149
Tabelle 67: Investitionskosten Neubau MFH 150
Tabelle 68: Investitionskosten Neubau EFH 151
Tabelle 69: Investitionskosten Sanierung MFH E 153
Tabelle 70: Investitionskosten Sanierung GMH F 154
Tabelle 71: Investitionskosten Sanierung EFH C.....155
Tabelle 72: Investitionskosten Sanierung EFH E 156
Tabelle 73: Jahresgesamtkosten Neubau MFH (ohne Energiepreissteigerung) 157
Tabelle 74: Jahresgesamtkosten Neubau EFH (ohne Energiepreissteigerung) 158
Tabelle 75: Jahresgesamtkosten Sanierung MFH E (ohne Energiepreissteigerung) 159
Tabelle 76: Jahresgesamtkosten Sanierung GMH F (ohne Energiepreissteigerung) 160
Tabelle 77: Jahresgesamtkosten Sanierung EFH C (ohne Energiepreissteigerung) 161
Tabelle 78: Jahresgesamtkosten Sanierung EFH E (ohne Energiepreissteigerung) 162
Tabelle 79: GWP und KEAne der Varianten Neubau MFH 165
Tabelle 80: GWP und KEAne der Neubauvarianten EFH.....166
Tabelle 81: GWP und KEAne der Sanierungsvarianten MFH E.....167
Tabelle 82: GWP und KEAne der Sanierungsvarianten GMH F 168
Tabelle 83: GWP und KEAne der Sanierungsvarianten EFH C 169
Tabelle 84: GWP und KEAne der Sanierungsvarianten EFH E.....170
Tabelle 85: Herstellung der Außenwandkonstruktion (AW) 172
Tabelle 86: Aufwand für Herstellung KG 300 und KG 400.....173
Tabelle 87: Aufwand für Nutzung.....174

Tabelle 88: End-of-Life der Außenwandkonstruktion (AW) 174
Tabelle 89: End-of-Life KG 300 und KG 400 175
Tabelle 90: Ergebnisse Ökobilanz 175

Abkürzungsverzeichnis

AN	Energiebezugsfläche nach EnEV
AW	Außenwand
BHKW + Gas	Wärmeerzeugung durch Blockheizkraftwerk und Gasbrennwerttherme
BZ + Gas	Wärmeerzeugung durch Kompaktgerät Brennstoffzelle und Gasbrennwerttherme
CO_2-Emissionen	Kohlenstoffdioxid-Emissionen, hier: Begriff CO_2-Emissionen wird als Synonym für das CO_2-Äquivalent bzw. das Treibhauspotenzial (GWP=Global Warming Potential) der Varianten verwendet.
EEG	Gesetz für den Ausbau erneuerbarer Energien (Kurz: Erneuerbare-Energien-Gesetz)
EFH	Einfamilienhaus
EnEV 2016	Energieeinsparverordnung 2014 mit Verschärfung ab 01.01.2016
EoL	End of Life, Lebensende
EPS	Dämmstoff aus expandiertem Polystyrol (umgangssprachlich Styropor)
EW	Einwohner
FBH	Fußbodenheizung
FW	Fernwärme
Gas + Solar	Wärmeerzeugung durch Gasbrennwertkessel und Solarthermie zur Unterstützung Warmwasserbereitung
GWP	Global warming potential (engl: Treibhauspotenzial), CO_2-Äquivalent
HF	Holzfaserplatte
HT`	Transmissionswärmetransferkoeffizient
I, W u. B	Instandsetzung, Wartung und Betrieb
JGK	Jahresgesamtkosten
KEAne	Kumulierter Energieaufwand nicht erneuerbar
KfW 55	KfW-Effizienzhaus 55
KfW 40	KfW-Effizienzhaus 40
KG	Kostengruppe
KS	Kalksandstein
KWK	Kraft-Wärme-Kopplung
KWKG	Gesetz für die Erhaltung, die Modernisierung und den Ausbau der Kraft-Wärme-Kopplung (Kurz: Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz)
kWp	Kilowatt peak (engl.: Spitze); Bezeichnung für die elektrische Leistung von Solarzellen unter Standard-Testbedingungen
MFH	Mehrfamilienhaus
MW	Dämmstoff aus Mineralwolle
NGF	Nettogrundfläche

PE	Primärenergie nach EnEV
P2G	Power-to-Gas
Pellets	Wärmeerzeugung durch Holzpelletkessel
PHPP	Passivhaus Projektierungspaket
PUR	Dämmstoff aus Polyurethan-Hartschaum
PV	Photovoltaik
STB	Stahlbeton
StromNEV	Stromnetzentgeltverordnung
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
WDVS	Wärmedämmverbundsystem
WE	Wohneinheiten
Wfl.	Wohnfläche
WP	Wärmeerzeugung durch Wärmepumpe (hier Mix aus Luft/Wasser Wärmepumpen und Sole/Wasser Wärmepumpen mit Quelle Erdsonden)
WRG	Wärmerückgewinnung

Anhang A: Konstruktionsaufbauten Typgebäude

Tabelle 53: Ausführung der Hauptbauteile Neubau MFH in Massivbauweise

Bauteil	EnEV 2016	KfW 55	KfW 40	Extrem
Außenwand	STB 20 cm, EPS 12 cm (032)	STB 20 cm, EPS 22 cm (032)	STB 20 cm, EPS 26 cm (032)	STB 20 cm, PUR 30 cm (023)
Fenster	Kunststofffenster 2-fach Verglasung	Kunststofffenster 3-fach Verglasung	Kunststofffenster 3-fach Verglasung	Kunststofffenster 3-fach Verglasung
Dach	STB 22 cm, EPS 16 cm (032)	STB 22 cm, EPS 24 cm (032)	STB 22 cm, EPS 28 cm (032)	STB 22 cm, EPS 50 cm (032)
Boden gegen unbeheizten Keller	EPS 5cm (035) STB 20 cm, 7,5 cm Mehr-schichtleicht-bau-platte	EPS 5 cm (035) STB 20 cm, 12,5 cm Mehr-schichtleicht-bau-platte	EPS 5cm (035) STB 20 cm, 18 cm Mineral-fa-ser (0,35)	EPS 5 cm (035) STB 20 cm, 30 cm Mineral-fa-ser (0,35)

Quelle: Steinbeis-Transferzentrum EGS

Tabelle 54: Ausführung der Hauptbauteile Neubau MFH in Holzbauweise

Bauteil	KfW 55	KfW 40
Außenwand	Holzständer/ Zellulose 22 cm (040), HF 6 cm (045)	Holzständer/ Zellulose 24 cm (040), HF 10 cm (045)
Fenster	Holzfenster 3-fach Verglasung	Holzfenster 3-fach Verglasung
Dach	Holzkonstruktion/ MW 22 cm (035), SW 8 cm (035)	Holzkonstruktion/ MW 22 cm (035), SW 10 cm (035)
Dachterrasse	Holzkonstruktion/ MW 22 cm (035), SW 2 cm (035)	Holzkonstruktion/ MW 22 cm (035), SW 8 cm (035)
Decken	Holzkonstruktion/ MW 20 cm, Trittschalldämmung, 90 % Parkett/ 10 % Fliesen	
Innenwände	Holzständer/ Zellulose 6-10 cm, Gipskarton	
Wohnungstrennwand	Holzständer 20 cm, MF 22 cm, Gipskarton	

Quelle: Steinbeis-Transferzentrum EGS

Tabelle 55: U-Werte der Hauptbauteile Neubau EFH

Bauteil	EnEV 2016 U-Wert [W/m²K]	KfW 55 U-Wert [W/m²K]	KfW 40 U-Wert [W/m²K]	Extrem U-Wert [W/m²K]
Außenwand	0,24	0,17	0,09	0,09
Fenster	1,30	0,90	0,70	0,65
Dach	0,20	0,13	0,08	0,07
Boden gegen Erdreich	0,31	0,21	0,11	0,09
Wärmebrückenzuschlag	0,05	0,05	0,03	0,00
HT`	Referenz-gebäude	-30 %	-45 %	-60 %

Quelle: Steinbeis-Transferzentrum EGS

Tabelle 56: Ausführung der Hauptbauteile Neubau EFH in Massivbauweise

Bauteil	EnEV 2016	KfW 55	KfW 40	Extrem
Außen-wand	KS 17,5 cm, EPS 12 cm (032)	KS 17,5 cm, EPS 18 cm (032)	KS 17,5 cm, EPS 34 cm (032)	KS 17,5 cm, EPS 36 cm (032)
Fenster	Kunststofffenster 2-fach Verglasung	Kunststofffenster 3-fach Verglasung	Kunststofffenster 3-fach Verglasung	Kunststofffenster 3-fach Verglasung
Dach	Holzkonstruktion EPS 20 cm (032)	Holzkonstruktion EPS 28 cm (032)	Holzkonstruktion EPS 40 cm (032)	Holzkonstruktion EPS 50 cm (032)
Dach-ter-rasse	STB 20 cm, PUR 12 cm (024)	STB 20 cm, PUR 16 cm (024)	STB 20 cm, PUR 20 cm (024)	STB 20 cm, PUR 20 cm (024)
Boden gegen Erdreich	STB 20 cm, Ausgleichs-dämmung EPS 8 cm (035)	Perimeterdämmung XPS 6 cm (040), STB 20 cm, Ausgleichs-dämmung EPS 8 cm (035)	Perimeterdämmung XPS 26 cm (040), STB 20 cm, Ausgleichs-dämmung EPS 5 cm (035)	Perimeterdämmung XPS 36 cm (040), STB 20 cm, Ausgleichs-dämmung EPS 5 cm (035)

Quelle: Steinbeis-Transferzentrum EGS

Tabelle 57: Ausführung der Hauptbauteile Neubau EFH in Holzbauweise

Bauteil	KfW 55	KfW 40
Außenwand	Holzständer/ Zellulose 20 cm (040), HF 6 cm (045)	Holzständer/ Zellulose 30 cm (040), HF 16 cm (045)
Fenster	Holzfenster 3-fach Verglasung	Holzfenster 3-fach Verglasung
Dach	Holzkonstruktion/ Zellulose 30 cm (040), HF 10 cm (045)	Holzkonstruktion/ Zellulose 30 cm (040), HF 18 cm (045)
Dachterrasse	Holzkonstruktion/ Zellulose 20 cm (040), PUR 6 cm (024)	Holzkonstruktion/ Zellulose 20 cm (040), PUR 14 cm (024)
Decken	Holzkonstruktion/ Zellulose 20 cm, Trittschalldämmung, 90 % Parkett/ 10 % Fliesen	
Boden gegen Erdreich	STB 20 cm, Trittschalldämmung, Ausgleich HF 8 cm (045) Perimeterdämmung Schaumglas 30 cm (120)	STB 20 cm, Trittschalldämmung, Ausgleich HF 20 cm (045), Perimeterdämmung Schaumglas 50 cm (120)
Innenwände	Holzständer/ Zellulose 8-10 cm (040), Gipskarton	
Gebäudetrennwand	Holzständerkonstruktion/ Zellulose 12 cm, Zementfaser	

Quelle: Steinbeis-Transferzentrum EGS

Tabelle 58: U-Werte der Hauptbauteile Bestand und Sanierung EFH C

	Bestand U-Wert [W/m²K]	Sanierung EnEV 2016 Neubau U-Wert [W/m²K]	Sanierung KfW 55 U-Wert [W/m²K]	Sanierung KfW 40 U-Wert [W/m²K]
Außenwand	1,70	0,23	0,15	0,11
Fenster	2,80	1,00	0,85	0,70
Dach	1,40	0,18	0,13	0,10
Boden gg. unbe-heizten Keller	1,00	0,31	0,20	0,10
Außentür	3,00	1,50	1,00	0,80
Wärmebrücken-zuschlag		0,1	0,05	0,05
HT`		Referenzgebäude Neubau	-30 %	-45 %

Quelle: Steinbeis-Transferzentrum EGS

Tabelle 59: Ausführung der Hauptbauteile Bestand und Sanierung EFH C

Bauteil	Bestand	Sanierung EnEV 2016	Sanierung KfW 55	Sanierung KfW 40
Außen-wand	Vollziegel-Mauer-werk 30 cm	Vollziegel-Mauer-werk 30 cm, EPS 12 cm (032)	Vollziegel-Mauer-werk 30 cm, EPS 20 cm (032)	Vollziegel-Mauer-werk 30 cm, PUR 20 cm (023)
Fenster	Holzfenster 2-fach Isolierver-glasung	Kunststofffenster 3-fach Wärme-schutzverglasung	Kunststofffenster 3-fach Wärme-schutzverglasung	Kunststofffenster 3-fach Wärme-schutzverglasung
Dach	HF 3,5 cm, Holzkonstruktion	HF 3,5 cm, Holzkonstruktion, Zwi-schensp.dämm. EPS 12 cm (032) Aufdachdämm. EPS 8 cm (032)	HF 3,5 cm, Holzkonstruktion, Zwischensp.dämm. EPS 12 cm (032), Aufdachdämm. PIR 8 cm (023)	HF 3,5 cm, Holzkonstruktion, Zwischensp.dämm. EPS 12 cm (032), Aufdachdämm. PIR 14 cm (023)
Boden gg. unbeheiz-ten Keller	Holzdiele, Schlackenschüt-tung 7 cm, Ortbeton 12 cm	Holzdiele, Schlackenschüt-tung 7 cm, Ortbeton 12 cm, EPS 7,5 cm (032)	Holzdiele, EPS 7 cm (032) Ortbeton 12 cm, EPS 7,5 cm (032)	Holzdiele, EPS 7 cm (032) Ortbeton 12 cm, PUR 160 cm (023)

Quelle: Steinbeis-Transferzentrum EGS

Tabelle 60: U-Werte der Hauptbauteile Bestand und Sanierung EFH E

	Bestand U-Wert [W/m²K]	Sanierung EnEV 2016 Neubau U-Wert [W/m²K]	Sanierung KfW 55 U-Wert [W/m²K]	Sanierung KfW 40 U-Wert [W/m²K]
Außenwand	1,40	0,22	0,14	0,10
Fenster	2,80	1,00	0,85	0,70
Dach	0,80	0,16	0,12	0,10
Boden gg. unbeheizten Keller	1,60	0,34	0,20	0,12
Außentür	3,00	1,5	1,0	0,80
Wärmebrückenzuschlag		0,1	0,05	0,05
HT`		Referenzgebäude Neubau	-30 %	-45 %

Quelle: Steinbeis-Transferzentrum EGS

Tabelle 61: Ausführung der Hauptbauteile Bestand und Sanierung EFH E

Bauteil	Bestand	Sanierung EnEV 2016	Sanierung KfW 55	Sanierung KfW 40
Außenwand	Hochlochziegel-Mauerwerk 30 cm	Hochlochziegel-Mauerwerk 30 cm, EPS 12 cm (032)	Hochlochziegel-Mauerwerk 30 cm, EPS 20 cm (032)	Hochlochziegel-Mauerwerk 30 cm, PUR 22 cm (023)
Fenster	Holzfenster 2-fach Isolier-verglasung	Kunststofffenster 3-fach Wärme-schutzverglasung	Kunststofffenster 3-fach Wärme-schutzverglasung	Kunststofffenster 3-fach Wärme-schutzverglasung
Steildach	HWL 2,5 cm, Holzkonstruktion, Zwischensparren-dämm. Mineral-faser 4 cm (0,40)	HWL 2,5 cm, Holzkonstruktion, Zwischensparren-dämm. Mineral-faser 4 cm (0,40) u. EPS 10 cm (032) Aufdachdämm. EPS 10 cm (032)	HWL 2,5 cm, Holzkonstruktion, Zwischensparren-dämm. Mineral-faser 4 cm (0,40) u. EPS 10 cm (032) Aufdachdämm. PIR 10 cm (023)	HWL 2,5 cm, Holzkonstruktion, Zwischensparren-dämm. Mineral-faser 4 cm (0,40) u. EPS 10 cm (032) Aufdachdämm. PIR 14 cm (023)
Boden gg. unbeheiz-ten Keller	Holzdielen Estrich 4 cm, Trittschalldäm-mung 1 cm, STB 15 cm	Holzdielen Estrich 4 cm, Trittschalldäm-mung 1 cm, STB 15 cm, EPS 7,5 cm (032)	Holzdielen Estrich 4 cm, Trittschalldäm-mung 1 cm, STB 15 cm, PUR 10 cm (023)	Holzdielen Estrich 4 cm, Trittschalldäm-mung 1 cm, STB 15 cm, PUR 18 cm (023)

Quelle: Steinbeis-Transferzentrum EGS

Tabelle 62: Ausführung der Hauptbauteile Bestand und Sanierung MFH E

Bauteil	Bestand	Sanierung EnEV 2016	Sanierung KfW 55	Sanierung KfW 40
Außenwand	Hochlochziegel-Mauerwerk 30 cm	Hochlochziegel-Mauerwerk 30 cm, EPS 12 cm (032)	Hochlochziegel-Mauerwerk 30 cm, EPS 20 cm (032)	Hochlochziegel-Mauerwerk 30 cm, PUR 20 cm (023)
Fenster	Kunststofffenster 2-fach Isolierver-glasung	Kunststofffenster 3-fach Wärme-schutzverglasung	Kunststofffenster 3-fach Wärme-schutzverglasung	Kunststofffenster 3-fach Wärme-schutzverglasung
Flachdach	Mineralwolle 5 cm, STB 15 cm	EPS 16 cm (0,32), STB 15 cm	PIR 16 cm (0,23), STB 15 cm	PIR 22 cm (0,23), STB 15 cm
Boden gg. un-beheizten Keller	Estrich 4 cm, Trittschalldämm. 1 cm (050), STB 15 cm	Estrich 4 cm, Trittschalldämm. 1 cm (050), STB 15 cm, EPS 7,5 cm (032)	Estrich 4 cm, Trittschalldämm. 1 cm (050), STB 15 cm, EPS 12 cm (032)	Estrich 4 cm, Trittschalldämm. 1 cm (050), STB 15 cm, PUR 16 cm (023)

Quelle: Steinbeis-Transferzentrum EGS

Tabelle 63: U-Werte der Hauptbauteile Bestand und Sanierung GMH F

	Bestand U-Wert [W/m²K]	Sanierung EnEV 2016 Neubau U-Wert [W/m²K]	Sanierung KfW 55 U-Wert [W/m²K]	Sanierung KfW 40 U-Wert [W/m²K]
Außenwand	1,10	0,25	0,15	0,11
Fenster	3,00	1,10	0,85	0,70
Dach	0,60	0,19	0,14	0,10
Boden gg. unbeheizten Keller	1,00	0,30	0,21	0,14
Außentür	4,00	1,5	1,0	0,80
Wärmebrückenzuschlag		0,1	0,05	0,05
HT`		Referenzgebäude Neubau	-30 %	-45 %

Quelle: Steinbeis-Transferzentrum EGS

Tabelle 64: Ausführung der Hauptbauteile Bestand und Sanierung GMH F

Bauteil	Bestand	Sanierung EnEV 2016	Sanierung KfW 55	Sanierung KfW 40
Außenwand	Betonfertigteile (Sandwich-element)	Betonfertigteile (Sandwich-element), EPS 10 cm (032)	Betonfertigteile (Sandwich-element), EPS 18 cm (032)	Betonfertigteile (Sandwich-element), PUR 18 cm (023)
Fenster	Kunststofffenster 2-fach Isolierverglasung	Kunststofffenster 3-fach Wärmeschutzverglasung	Kunststofffenster 3-fach Wärmeschutzverglasung	Kunststofffenster 3-fach Wärmeschutzverglasung
Flachdach	Estrich, Mineralwolle 5 cm, STB 15 cm	EPS 16 cm (0,32), STB 15 cm	PIR 16 cm (0,23), STB 15 cm	PIR 22 cm (0,23), STB 15 cm
Boden gg. unbeheizten Keller	Estrich 5 cm, Trittschalldämm. 2 cm (040), STB 15 cm	Estrich 5 cm, Trittschalldämm. 2 cm (040), STB 15 cm, EPS 7,5 cm (032)	Estrich 5 cm, Trittschalldämm. 2 cm (040), STB 15 cm, EPS 12 cm (032)	Estrich 5 cm, Trittschalldämm. 2 cm (040), STB 15 cm, PUR 14 cm (023)

Quelle: Steinbeis-Transferzentrum EGS

Anhang B: Investitions- und Jahresgesamtkosten

Investitionskosten

Tabelle 65: Investitionskosten Neubau KG 300 und KG 400 (allgemein)

Typgebäude		EFH					MFH				
		Investitionskosten brutto					Investitionskosten brutto				
			EnEV 2016	KfW 55	Passiv	extrem		EnEV 2016	KfW 55	Passiv	extrem
KG 300	**Baukonstruktionen**										
KG 310	Baugrube	[€]	2.639	2.639	2.639	2.639	[€]	73.411	73.411	73.411	73.411
KG 320	Gründung	[€]	16.333	18.367	21.004	23.108	[€]	100.876	101.319	103.837	103.837
KG 330	Außenwände	[€]	67.151	71.079	79.863	81.360	[€]	681.534	723.112	758.153	811.417
KG 340	Innenwände	[€]	19.289	19.289	19.289	19.289	[€]	380.069	380.069	387.507	392.009
KG 350	Decken	[€]	26.757	26.757	26.757	26.757	[€]	564.539	577.582	602.388	617.403
KG 360	Dächer	[€]	29.862	30.639	33.482	35.011	[€]	267.561	283.889	292.209	330.982
KG 370	Baukonstruktive Einbauten	[€]					[€]				
KG 390	Sonstige Maßnahmen	[€]	5.340	5.340	5.340	5.340	[€]	42.534	42.534	42.534	42.534
KG 400	**Technische Anlagen**										
KG 410	Abwasser, Wasser, Gas	[€]	13.133	13.133	13.133	13.133	[€]	160.282	160.282	160.282	160.282
KG 420	Wärmeversorgung	[€]					[€]				
KG 430	Lufttechnische Anlagen	[€]					[€]				
KG 440	Starkstromanlagen	[€]	7.837	7.837	7.837	7.837	[€]	89.983	89.983	89.983	89.983
KG 450	Fernmelde- und IT-Anlagen	[€]					[€]				
KG 460	Förderanlagen	[€]					[€]	95.607	95.607	95.607	95.607
KG 470	Nutzungsspez. Anlagen	[€]					[€]				
KG 480	Gebäudeautomation	[€]					[€]				
KG 490	Sonstige Maßnahmen	[€]	1.785	1.785	1.785	1.785	[€]	13.388	13.388	13.388	13.388
KG 420 Rad											
Wärmeverteilung		[€]	3.868	3.868	3.868	3.868	[€]	49.437	49.437	49.437	49.437
Wärmeübergabe		[€]	5.653	5.653	5.653	5.653	[€]	63.857	63.857	63.857	63.857
KG 420 FBH											
Wärmeverteilung		[€]	3.868	3.868	3.868	3.868	[€]	49.437	49.437	49.437	49.437
Wärmeübergabe		[€]	5.653	5.653	5.653	5.653	[€]	63.857	63.857	63.857	63.857
KG 430											
Abluft		[€]	1.785	1.785	1.785	1.785	[€]	35.700	35.700	35.700	35.700
Lüftung m WRG		[€]	9.520	9.520	9.520	9.520	[€]	154.700	154.700	154.700	154.700
KG 470											
PV-Anlage Dach		[€/kWp]	1.400	1.400	1.400	1.400	[€/kWp]	1.300	1.300	1.300	1.300
PV-Anlage Fassade		[€/kWp]	0	0	0	0	[€/kWp]	3.000	3.000	3.000	3.000
Stromspeicher		[€]	0	0	0	0	[€]	0	0	0	0
Energiemanagementsystem		[€]	0	0	0	0	[€]	0	0	0	0

Quelle: Steinbeis-Transferzentrum EGS

Tabelle 66: Investitionskosten Neubau KG 420 (leistungsabhängig)

	Wärmezentrale - KG 420			EFH					MFH				
					EnEV 2016	KfW 55	Passiv	extrem		EnEV 2016	KfW 55	Passiv	extrem
	Hilfszeile				EFH_EnEV 2016	EFH_KfW 55	EFH_Passiv	EFH_extrem		MFH_EnEV 2016	MFH_KfW 55	MFH_Passiv	MFH_extrem
	Hilfszeile	3	4	5	6	7	8	9	11	12	13	14	15
Abluft	**G+S**	Anbindung Wärmeerzeuger	G+S	[€]	5.653	5.653	5.653		[€]	21.728	21.728	21.728	
Abluft	**G+S**	Wärmeerzeugung	G+S	[€]	7.140	7.140	7.140		[€]	19.250	18.072	17.417	
Abluft	**G+S**	Wärmespeicherung	G+S	[€]	4.165	4.165	4.165		[€]	2.142	2.142	2.142	
Abluft	**G+S**	Hydraulische Einbindung	G+S	[€]	1.785	1.785	1.785		[€]	15.031	15.031	15.031	
Abluft	**G+S**	MSR, Elektro- und Inbetriebnahme	G+S	[€]	952	952	952		[€]	3.570	3.570	3.570	
Abluft	**FW**	Anbindung Wärmeerzeuger	FW_	[€]	7.735	7.735	7.735		[€]	21.158	18.532	16.896	
Abluft	**FW**	Wärmeerzeugung	FW_	[€]	6.783	6.783	6.783		[€]	8.092	7.140	6.664	
Abluft	**FW**	Wärmespeicherung	FW_	[€]	952	952	952		[€]	2.142	2.142	2.142	
Abluft	**FW**	Hydraulische Einbindung	FW_	[€]	714	714	714		[€]	2.380	2.380	2.380	
Abluft	**FW**	MSR, Elektro- und Inbetriebnahme	FW_	[€]	0	0	0		[€]	1.190	1.190	1.190	
Abluft	**Pell**	Anbindung Wärmeerzeuger	Pell_	[€]	2.975	2.975	2.975		[€]	5.950	5.950	5.950	
Abluft	**Pell**	Wärmeerzeugung	Pell_	[€]	14.280	14.280	14.280		[€]	40.460	34.510	31.535	
Abluft	**Pell**	Wärmespeicherung	Pell_	[€]	4.165	4.165	4.165		[€]	3.570	3.570	3.570	
Abluft	**Pell**	Hydraulische Einbindung	Pell_	[€]	1.190	1.190	1.190		[€]	12.495	12.495	12.495	
Abluft	**Pell**	MSR, Elektro- und Inbetriebnahme	Pell_	[€]	952	952	952		[€]	4.760	4.760	4.760	
Abluft	**WP**	Anbindung Wärmeerzeuger	WP_	[€]	8.695	6.644	5.268		[€]	55.256	44.104	38.389	
Abluft	**WP**	Wärmeerzeugung	WP_	[€]	8.617	7.709	7.091		[€]	34.194	30.401	28.296	
Abluft	**WP**	Wärmespeicherung	WP_	[€]	5.950	5.950	5.950		[€]	4.284	4.284	4.284	
Abluft	**WP**	Hydraulische Einbindung	WP_	[€]	1.190	1.190	1.190		[€]	13.685	13.685	13.685	
Abluft	**WP**	MSR, Elektro- und Inbetriebnahme	WP_	[€]	952	952	952		[€]	5.950	5.950	5.950	
Abluft	**BZ+G**	Anbindung Wärmeerzeuger	BZ+G	[€]	2.975	2.975	2.975						
Abluft	**BZ+G**	Wärmeerzeugung	BZ+G	[€]	21.896	21.896	21.896						
Abluft	**BZ+G**	Wärmespeicherung	BZ+G	[€]	1.190	1.190	1.190						
Abluft	**BZ+G**	Hydraulische Einbindung	BZ+G	[€]	1.190	1.190	1.190						
Abluft	**BZ+G**	MSR, Elektro- und Inbetriebnahme	BZ+G	[€]	357	357	357						
Abluft	**BHKW**	Anbindung Wärmeerzeuger	BHKW_Anbindung Wärmeerzeuger_Abluft						[€]	4.522	4.522	4.522	
Abluft	**BHKW**	Wärmeerzeugung	BHKW_Wärmeerzeugung_Abluft						[€]	26.656	24.990	24.395	
Abluft	**BHKW**	Wärmespeicherung	BHKW_Wärmespeicherung_Abluft						[€]	2.380	2.380	2.380	
Abluft	**BHKW**	Hydraulische Einbindung	BHKW_Hydraulische Einbindung_Abluft						[€]	23.205	23.205	23.205	
Abluft	**BHKW**	MSR, Elektro- und Inbetriebnahme	BHKW_MSR, Elektro- und Inbetriebnahme_Abluft						[€]	5.950	5.950	5.950	
Abluft	**BHKW**	BHKW	BHKW_BHKW_Abluft						[€]	38.030	34.410	34.322	
m WRG	**G+S**	Anbindung Wärmeerzeuger	G+S	[€]	5.653	5.653	5.653	5.653	[€]	21.728	21.728	21.728	21.728
m WRG	**G+S**	Wärmeerzeugung	G+S	[€]	7.140	7.140	7.140	7.140	[€]	17.793	16.369	15.573	14.767
m WRG	**G+S**	Wärmespeicherung	G+S	[€]	4.165	4.165	4.165	4.165	[€]	2.142	2.142	2.142	2.142
m WRG	**G+S**	Hydraulische Einbindung	G+S	[€]	1.785	1.785	1.785	1.785	[€]	15.031	15.031	15.031	15.031
m WRG	**G+S**	MSR, Elektro- und Inbetriebnahme	G+S	[€]	952	952	952	952	[€]	3.570	3.570	3.570	3.570
m WRG	**FW**	Anbindung Wärmeerzeuger	FW_	[€]	7.735	7.735	7.735	7.735	[€]	17.953	14.959	13.644	12.453
m WRG	**FW**	Wärmeerzeugung	FW_	[€]	6.783	6.783	6.783	6.783	[€]	7.378	6.664	6.188	6.188
m WRG	**FW**	Wärmespeicherung	FW_	[€]	952	952	952	952	[€]	2.142	2.142	2.142	2.142
m WRG	**FW**	Hydraulische Einbindung	FW_	[€]	714	714	714	714	[€]	2.380	2.380	2.380	2.380
m WRG	**FW**	MSR, Elektro- und Inbetriebnahme	FW_	[€]	0	0	0	0	[€]	1.190	1.190	1.190	1.190
m WRG	**Pell**	Anbindung Wärmeerzeuger	Pell_	[€]	2.975	2.975	2.975	2.975	[€]	5.950	5.950	5.950	5.950
m WRG	**Pell**	Wärmeerzeugung	Pell_	[€]	14.280	14.280	14.280	14.280	[€]	36.295	29.750	27.370	27.370
m WRG	**Pell**	Wärmespeicherung	Pell_	[€]	4.165	4.165	4.165	4.165	[€]	3.570	3.570	3.570	3.570
m WRG	**Pell**	Hydraulische Einbindung	Pell_	[€]	1.190	1.190	1.190	1.190	[€]	12.495	12.495	12.495	12.495
m WRG	**Pell**	MSR, Elektro- und Inbetriebnahme	Pell_	[€]	952	952	952	952	[€]	4.760	4.760	4.760	4.760
m WRG	**WP**	Anbindung Wärmeerzeuger	WP_	[€]	6.881	4.770	3.462	2.916	[€]	41.619	30.013	24.231	18.907
m WRG	**WP**	Wärmeerzeugung	WP_	[€]	7.814	6.866	6.268	6.018	[€]	29.503	24.942	22.400	19.836
m WRG	**WP**	Wärmespeicherung	WP_	[€]	5.950	5.950	5.950	5.950	[€]	4.284	4.284	4.284	4.284
m WRG	**WP**	Hydraulische Einbindung	WP_	[€]	1.190	1.190	1.190	1.190	[€]	13.685	13.685	13.685	13.685
m WRG	**WP**	MSR, Elektro- und Inbetriebnahme	WP_	[€]	952	952	952	952	[€]	5.950	5.950	5.950	5.950
m WRG	**BZ+G**	Anbindung Wärmeerzeuger	BZ+G	[€]	2.975	2.975	2.975	2.975					
m WRG	**BZ+G**	Wärmeerzeugung	BZ+G	[€]	21.896	21.896	21.896	21.896					
m WRG	**BZ+G**	Wärmespeicherung	BZ+G	[€]	1.190	1.190	1.190	1.190					
m WRG	**BZ+G**	Hydraulische Einbindung	BZ+G	[€]	1.190	1.190	1.190	1.190					
m WRG	**BZ+G**	MSR, Elektro- und Inbetriebnahme	BZ+G	[€]	357	357	357	357					
m WRG	**BHKW**	Anbindung Wärmeerzeuger	BHKW	[€]					[€]	4.522	4.522	4.522	4.522
m WRG	**BHKW**	Wärmeerzeugung	BHKW	[€]					[€]	24.990	23.800	23.205	23.205
m WRG	**BHKW**	Wärmespeicherung	BHKW	[€]					[€]	2.380	2.380	2.380	2.380
m WRG	**BHKW**	Hydraulische Einbindung	BHKW	[€]					[€]	23.205	23.205	23.205	23.205
m WRG	**BHKW**	MSR, Elektro- und Inbetriebnahme	BHKW	[€]					[€]	5.950	5.950	5.950	5.950
m WRG	**BHKW**	BHKW	BHKW	[€]					[€]	32.520	31.573	27.392	26.222

Quelle: Steinbeis-Transferzentrum EGS

Tabelle 67: Investitionskosten Neubau MFH

Nr. [-]	Variantenbezeichnung [-]	Investitions-kosten KG 300 [T€]	Investitions-kosten KG 400 [T€]	Investitions-kosten Summe [T€]
1	MFH_EnEV 2016_Abluft_G+S_o PV	2.111	578	2.688
2	MFH_EnEV 2016_Abluft_FW_o PV	2.111	548	2.659
3	MFH_EnEV 2016_Abluft_Pell_o PV	2.111	597	2.708
4	MFH_EnEV 2016_Abluft_WP_o PV	2.111	634	2.745
5	MFH_EnEV 2016_Abluft_BHKW_o PV	2.111	621	2.731
6	MFH_KfW 55_Abluft_G+S_o PV	2.182	576	2.758
7	MFH_KfW 55_Abluft_FW_o PV	2.182	544	2.726
8	MFH_KfW 55_Abluft_Pell_o PV	2.182	591	2.772
9	MFH_KfW 55_Abluft_WP_o PV	2.182	618	2.800
10	MFH_KfW 55_Abluft_BHKW_o PV	2.182	615	2.797
11	MFH_Passiv_Abluft_G+S_o PV	2.260	576	2.836
12	MFH_Passiv_Abluft_FW_o PV	2.260	542	2.802
13	MFH_Passiv_Abluft_Pell_o PV	2.260	587	2.847
14	MFH_Passiv_Abluft_WP_o PV	2.260	609	2.869
15	MFH_Passiv_Abluft_BHKW_o PV	2.260	614	2.874
16	MFH_EnEV 2016_m WRG_G+S_o PV	2.111	707	2.817
17	MFH_EnEV 2016_m WRG_FW_o PV	2.111	675	2.785
18	MFH_EnEV 2016_m WRG_Pell_o PV	2.111	723	2.834
19	MFH_EnEV 2016_m WRG_WP_o PV	2.111	745	2.856
20	MFH_EnEV 2016_m WRG_BHKW_o PV	2.111	744	2.854
21	MFH_KfW 55_m WRG_G+S_o PV	2.182	705	2.887
22	MFH_KfW 55_m WRG_FW_o PV	2.182	671	2.853
23	MFH_KfW 55_m WRG_Pell_o PV	2.182	716	2.898
24	MFH_KfW 55_m WRG_WP_o PV	2.182	727	2.909
25	MFH_KfW 55_m WRG_BHKW_o PV	2.182	741	2.923
26	MFH_Passiv_m WRG_G+S_o PV	2.260	705	2.965
27	MFH_Passiv_m WRG_FW_o PV	2.260	669	2.929
28	MFH_Passiv_m WRG_Pell_o PV	2.260	714	2.974
29	MFH_Passiv_m WRG_WP_o PV	2.260	718	2.978
30	MFH_Passiv_m WRG_BHKW_o PV	2.260	736	2.996
31	MFH_extrem_m WRG_G+S_o PV	2.372	704	3.075
32	MFH_extrem_m WRG_FW_o PV	2.372	667	3.039
33	MFH_extrem_m WRG_Pell_o PV	2.372	714	3.085
34	MFH_extrem_m WRG_WP_o PV	2.372	710	3.081
35	MFH_extrem_m WRG_BHKW_o PV	2.372	735	3.106
36	MFH_EnEV 2016_Abluft_G+S_m PV D	2.111	661	2.772
37	MFH_EnEV 2016_Abluft_FW_m PV D	2.111	641	2.752
38	MFH_EnEV 2016_Abluft_Pell_m PV D	2.111	690	2.801
39	MFH_EnEV 2016_Abluft_WP_m PV D	2.111	728	2.838
40	MFH_EnEV 2016_Abluft_BHKW_m PV D	2.111	714	2.824
41	MFH_KfW 55_Abluft_G+S_m PV D	2.182	660	2.842
42	MFH_KfW 55_Abluft_FW_m PV D	2.182	637	2.819
43	MFH_KfW 55_Abluft_Pell_m PV D	2.182	684	2.866
44	MFH_KfW 55_Abluft_WP_m PV D	2.182	711	2.893
45	MFH_KfW 55_Abluft_BHKW_m PV D	2.182	708	2.890
46	MFH_Passiv_Abluft_G+S_m PV D	2.260	659	2.919
47	MFH_Passiv_Abluft_FW_m PV D	2.260	635	2.895
48	MFH_Passiv_Abluft_Pell_m PV D	2.260	680	2.940
49	MFH_Passiv_Abluft_WP_m PV D	2.260	702	2.963
50	MFH_Passiv_Abluft_BHKW_m PV D	2.260	707	2.967
51	MFH_EnEV 2016_m WRG_G+S_m PV D	2.111	790	2.901
52	MFH_EnEV 2016_m WRG_FW_m PV D	2.111	768	2.878
53	MFH_EnEV 2016_m WRG_Pell_m PV D	2.111	816	2.927
54	MFH_EnEV 2016_m WRG_WP_m PV D	2.111	838	2.949
55	MFH_EnEV 2016_m WRG_BHKW_m PV D	2.111	837	2.947
56	MFH_KfW 55_m WRG_G+S_m PV D	2.182	789	2.971
57	MFH_KfW 55_m WRG_FW_m PV D	2.182	764	2.946
58	MFH_KfW 55_m WRG_Pell_m PV D	2.182	809	2.991
59	MFH_KfW 55_m WRG_WP_m PV D	2.182	820	3.002
60	MFH_KfW 55_m WRG_BHKW_m PV D	2.182	834	3.016

Nr. [-]	Variantenbezeichnung [-]	Investitions-kosten KG 300 [T€]	Investitions-kosten KG 400 [T€]	Investitions-kosten Summe [T€]
61	MFH_Passiv_m WRG_G+S_m PV D	2.260	788	3.048
62	MFH_Passiv_m WRG_FW_m PV D	2.260	762	3.022
63	MFH_Passiv_m WRG_Pell_m PV D	2.260	807	3.067
64	MFH_Passiv_m WRG_WP_m PV D	2.260	811	3.071
65	MFH_Passiv_m WRG_BHKW_m PV D	2.260	829	3.089
66	MFH_extrem_m WRG_G+S_m PV D	2.372	787	3.159
67	MFH_extrem_m WRG_FW_m PV D	2.372	761	3.132
68	MFH_extrem_m WRG_Pell_m PV D	2.372	807	3.178
69	MFH_extrem_m WRG_WP_m PV D	2.372	803	3.174
70	MFH_extrem_m WRG_BHKW_m PV D	2.372	828	3.199
71	MFH_EnEV 2016_m WRG_G+S_m PV D+F	2.111	868	2.978
72	MFH_EnEV 2016_m WRG_FW_m PV D+F	2.111	845	2.956
73	MFH_EnEV 2016_m WRG_Pell_m PV D+F	2.111	894	3.004
74	MFH_EnEV 2016_m WRG_WP_m PV D+F	2.111	916	3.026
75	MFH_EnEV 2016_m WRG_BHKW_m PV D+F	2.111	914	3.024
76	MFH_KfW 55_m WRG_G+S_m PV D+F	2.182	866	3.048
77	MFH_KfW 55_m WRG_FW_m PV D+F	2.182	841	3.023
78	MFH_KfW 55_m WRG_Pell_m PV D+F	2.182	887	3.068
79	MFH_KfW 55_m WRG_WP_m PV D+F	2.182	898	3.080
80	MFH_KfW 55_m WRG_BHKW_m PV D+F	2.182	912	3.093
81	MFH_Passiv_m WRG_G+S_m PV D+F	2.260	865	3.125
82	MFH_Passiv_m WRG_FW_m PV D+F	2.260	839	3.099
83	MFH_Passiv_m WRG_Pell_m PV D+F	2.260	884	3.144
84	MFH_Passiv_m WRG_WP_m PV D+F	2.260	889	3.149
85	MFH_Passiv_m WRG_BHKW_m PV D+F	2.260	906	3.166
86	MFH_extrem_m WRG_G+S_m PV D+F	2.372	864	3.236
87	MFH_extrem_m WRG_FW_m PV D+F	2.372	838	3.209
88	MFH_extrem_m WRG_Pell_m PV D+F	2.372	884	3.256
89	MFH_extrem_m WRG_WP_m PV D+F	2.372	880	3.251
90	MFH_extrem_m WRG_BHKW_m PV D+F	2.372	905	3.277

Quelle: Steinbeis-Transferzentrum EGS

Tabelle 68: Investitionskosten Neubau EFH

Nr. [-]	Variantenbezeichnung [-]	Investitions-kosten KG 300 [T€]	Investitions-kosten KG 400 [T€]	Investitions-kosten Summe [T€]
91	EFH_EnEV 2016_Abluft_G+S_o PV	167	55	222
92	EFH_EnEV 2016_Abluft_FW_o PV	167	51	219
93	EFH_EnEV 2016_Abluft_Pell_o PV	167	61	228
94	EFH_EnEV 2016_Abluft_WP_o PV	167	61	229
95	EFH_EnEV 2016_Abluft_BZ+G_o PV	167	64	231
96	EFH_KfW 55_Abluft_G+S_o PV	174	55	229
97	EFH_KfW 55_Abluft_FW_o PV	174	51	225
98	EFH_KfW 55_Abluft_Pell_o PV	174	61	235
99	EFH_KfW 55_Abluft_WP_o PV	174	58	232
100	EFH_KfW 55_Abluft_BZ+G_o PV	174	64	238
101	EFH_Passiv_Abluft_G+S_o PV	188	55	243
102	EFH_Passiv_Abluft_FW_o PV	188	51	240
103	EFH_Passiv_Abluft_Pell_o PV	188	61	249
104	EFH_Passiv_Abluft_WP_o PV	188	56	244
105	EFH_Passiv_Abluft_BZ+G_o PV	188	64	252
106	EFH_EnEV 2016_m WRG_G+S_o PV	167	64	231
107	EFH_EnEV 2016_m WRG_FW_o PV	167	60	227
108	EFH_EnEV 2016_m WRG_Pell_o PV	167	70	237
109	EFH_EnEV 2016_m WRG_WP_o PV	167	67	234
110	EFH_EnEV 2016_m WRG_BZ+G_o PV	167	72	240
111	EFH_KfW 55_m WRG_G+S_o PV	174	64	238
112	EFH_KfW 55_m WRG_FW_o PV	174	60	234
113	EFH_KfW 55_m WRG_Pell_o PV	174	70	244
114	EFH_KfW 55_m WRG_WP_o PV	174	64	238

Nr.	Variantenbezeichnung	Investitions-kosten KG 300	Investitions-kosten KG 400	Investitions-kosten Summe
[-]	[-]	[T€]	[T€]	[T€]
115	EFH_KfW 55_m WRG_BZ+G_o PV	174	72	246
116	EFH_Passiv_m WRG_G+S_o PV	188	64	252
117	EFH_Passiv_m WRG_FW_o PV	188	60	248
118	EFH_Passiv_m WRG_Pell_o PV	188	70	258
119	EFH_Passiv_m WRG_WP_o PV	188	62	250
120	EFH_Passiv_m WRG_BZ+G_o PV	188	72	261
121	EFH_extrem_m WRG_G+S_o PV	194	64	257
122	EFH_extrem_m WRG_FW_o PV	194	60	253
123	EFH_extrem_m WRG_Pell_o PV	194	70	263
124	EFH_extrem_m WRG_WP_o PV	194	61	254
125	EFH_extrem_m WRG_BZ+G_o PV	194	72	266
126	EFH_EnEV 2016_Abluft_G+S_m PV D	167	64	231
127	EFH_EnEV 2016_Abluft_FW_m PV D	167	61	228
128	EFH_EnEV 2016_Abluft_Pell_m PV D	167	71	238
129	EFH_EnEV 2016_Abluft_WP_m PV D	167	71	239
130	EFH_EnEV 2016_Abluft_BZ+G_m PV D	167	74	241
131	EFH_KfW 55_Abluft_G+S_m PV D	174	64	238
132	EFH_KfW 55_Abluft_FW_m PV D	174	61	235
133	EFH_KfW 55_Abluft_Pell_m PV D	174	71	245
134	EFH_KfW 55_Abluft_WP_m PV D	174	68	242
135	EFH_KfW 55_Abluft_BZ+G_m PV D	174	74	248
136	EFH_Passiv_Abluft_G+S_m PV D	188	64	252
137	EFH_Passiv_Abluft_FW_m PV D	188	61	249
138	EFH_Passiv_Abluft_Pell_m PV D	188	71	259
139	EFH_Passiv_Abluft_WP_m PV D	188	66	254
140	EFH_Passiv_Abluft_BZ+G_m PV D	188	74	262
141	EFH_EnEV 2016_m WRG_G+S_m PV D	167	72	240
142	EFH_EnEV 2016_m WRG_FW_m PV D	167	70	237
143	EFH_EnEV 2016_m WRG_Pell_m PV D	167	79	247
144	EFH_EnEV 2016_m WRG_WP_m PV D	167	77	244
145	EFH_EnEV 2016_m WRG_BZ+G_m PV D	167	82	250
146	EFH_KfW 55_m WRG_G+S_m PV D	174	72	246
147	EFH_KfW 55_m WRG_FW_m PV D	174	70	244
148	EFH_KfW 55_m WRG_Pell_m PV D	174	79	254
149	EFH_KfW 55_m WRG_WP_m PV D	174	73	248
150	EFH_KfW 55_m WRG_BZ+G_m PV D	174	82	256
151	EFH_Passiv_m WRG_G+S_m PV D	188	72	261
152	EFH_Passiv_m WRG_FW_m PV D	188	70	258
153	EFH_Passiv_m WRG_Pell_m PV D	188	79	268
154	EFH_Passiv_m WRG_WP_m PV D	188	71	260
155	EFH_Passiv_m WRG_BZ+G_m PV D	188	82	271
156	EFH_extrem_m WRG_G+S_m PV D	194	72	266
157	EFH_extrem_m WRG_FW_m PV D	194	70	263
158	EFH_extrem_m WRG_Pell_m PV D	194	79	273
159	EFH_extrem_m WRG_WP_m PV D	194	71	264
160	EFH_extrem_m WRG_BZ+G_m PV D	194	82	276

Quelle: Steinbeis-Transferzentrum EGS

Tabelle 69: Investitionskosten Sanierung MFH E

Nr. [-]	Variantenbezeichnung [-]	Investitions-kosten KG 300 [T€]	Investitions-kosten KG 400 [T€]	Investitions-kosten Summe [T€]
1	MFH E_EnEV 2016_Abluft_G+S_o PV	885	254	1.138
2	MFH E_EnEV 2016_Abluft_FW_o PV	885	225	1.110
3	MFH E_EnEV 2016_Abluft_Pell_o PV	885	270	1.155
4	MFH E_EnEV 2016_Abluft_WP_o PV	885	353	1.238
5	MFH E_EnEV 2016_Abluft_BHKW_o PV	885	289	1.174
6	MFH E_KfW 55_Abluft_G+S_o PV	984	258	1.242
7	MFH E_KfW 55_Abluft_FW_o PV	984	226	1.211
8	MFH E_KfW 55_Abluft_Pell_o PV	984	271	1.256
9	MFH E_KfW 55_Abluft_WP_o PV	984	335	1.319
10	MFH E_KfW 55_Abluft_BHKW_o PV	984	285	1.269
11	MFH E_KfW 40_Abluft_G+S_o PV	1.114	257	1.371
12	MFH E_KfW 40_Abluft_FW_o PV	1.114	224	1.338
13	MFH E_KfW 40_Abluft_Pell_o PV	1.114	270	1.384
14	MFH E_KfW 40_Abluft_WP_o PV	1.114	327	1.441
15	MFH E_KfW 40_Abluft_BHKW_o PV	1.114	281	1.395
16	MFH E_EnEV 2016_m WRG_G+S_o PV	885	361	1.246
17	MFH E_EnEV 2016_m WRG_FW_o PV	885	329	1.214
18	MFH E_EnEV 2016_m WRG_Pell_o PV	885	359	1.244
19	MFH E_EnEV 2016_m WRG_WP_o PV	885	438	1.323
20	MFH E_EnEV 2016_m WRG_BHKW_o PV	885	388	1.273
21	MFH E_KfW 55_m WRG_G+S_o PV	984	365	1.350
22	MFH E_KfW 55_m WRG_FW_o PV	984	330	1.314
23	MFH E_KfW 55_m WRG_Pell_o PV	984	360	1.345
24	MFH E_KfW 55_m WRG_WP_o PV	984	418	1.403
25	MFH E_KfW 55_m WRG_BHKW_o PV	984	384	1.369
26	MFH E_KfW 40_m WRG_G+S_o PV	1.114	364	1.478
27	MFH E_KfW 40_m WRG_FW_o PV	1.114	328	1.442
28	MFH E_KfW 40_m WRG_Pell_o PV	1.114	358	1.472
29	MFH E_KfW 40_m WRG_WP_o PV	1.114	410	1.524
30	MFH E_KfW 40_m WRG_BHKW_o PV	1.114	378	1.492
31	MFH E_EnEV 2016_Abluft_G+S_m PV	885	336	1.221
32	MFH E_EnEV 2016_Abluft_FW_m PV	885	319	1.204
33	MFH E_EnEV 2016_Abluft_Pell_m PV	885	363	1.248
34	MFH E_EnEV 2016_Abluft_WP_m PV	885	447	1.332
35	MFH E_EnEV 2016_Abluft_BHKW_m PV	885	383	1.268
36	MFH E_KfW 55_Abluft_G+S_m PV	984	340	1.325
37	MFH E_KfW 55_Abluft_FW_m PV	984	320	1.304
38	MFH E_KfW 55_Abluft_Pell_m PV	984	365	1.350
39	MFH E_KfW 55_Abluft_WP_m PV	984	429	1.413
40	MFH E_KfW 55_Abluft_BHKW_m PV	984	378	1.363
41	MFH E_KfW 40_Abluft_G+S_m PV	1.114	339	1.453
42	MFH E_KfW 40_Abluft_FW_m PV	1.114	318	1.432
43	MFH E_KfW 40_Abluft_Pell_m PV	1.114	364	1.478
44	MFH E_KfW 40_Abluft_WP_m PV	1.114	421	1.535
45	MFH E_KfW 40_Abluft_BHKW_m PV	1.114	375	1.489
46	MFH E_EnEV 2016_m WRG_G+S_m PV	885	443	1.328
47	MFH E_EnEV 2016_m WRG_FW_m PV	885	423	1.308
48	MFH E_EnEV 2016_m WRG_Pell_m PV	885	453	1.338
49	MFH E_EnEV 2016_m WRG_WP_m PV	885	531	1.416
50	MFH E_EnEV 2016_m WRG_BHKW_m PV	885	482	1.366
51	MFH E_KfW 55_m WRG_G+S_m PV	984	447	1.432
52	MFH E_KfW 55_m WRG_FW_m PV	984	424	1.408
53	MFH E_KfW 55_m WRG_Pell_m PV	984	454	1.438
54	MFH E_KfW 55_m WRG_WP_m PV	984	512	1.497
55	MFH E_KfW 55_m WRG_BHKW_m PV	984	478	1.463
56	MFH E_KfW 40_m WRG_G+S_m PV	1.114	447	1.561
57	MFH E_KfW 40_m WRG_FW_m PV	1.114	422	1.536
58	MFH E_KfW 40_m WRG_Pell_m PV	1.114	452	1.566
59	MFH E_KfW 40_m WRG_WP_m PV	1.114	504	1.618
60	MFH E_KfW 40_m WRG_BHKW_m PV	1.114	472	1.586

Quelle: Steinbeis-Transferzentrum EGS

Tabelle 70: Investitionskosten Sanierung GMH F

Nr. [-]	Variantenbezeichnung [-]	Investitions-kosten KG 300 [T€]	Investitions-kosten KG 400 [T€]	Investitions-kosten Summe [T€]
61	GMH F_EnEV 2016_Abluft_G+S_o PV	771	209	981
62	GMH F_EnEV 2016_Abluft_FW_o PV	771	175	946
63	GMH F_EnEV 2016_Abluft_Pell_o PV	771	221	993
64	GMH F_EnEV 2016_Abluft_WP_o PV	771	394	1.165
65	GMH F_EnEV 2016_Abluft_BHKW_o PV	771	235	1.006
66	GMH F_KfW 55_Abluft_G+S_o PV	851	208	1.058
67	GMH F_KfW 55_Abluft_FW_o PV	851	170	1.020
68	GMH F_KfW 55_Abluft_Pell_o PV	851	218	1.068
69	GMH F_KfW 55_Abluft_WP_o PV	851	376	1.226
70	GMH F_KfW 55_Abluft_BHKW_o PV	851	225	1.075
71	GMH F_KfW 40_Abluft_G+S_o PV	946	207	1.153
72	GMH F_KfW 40_Abluft_FW_o PV	946	168	1.114
73	GMH F_KfW 40_Abluft_Pell_o PV	946	216	1.162
74	GMH F_KfW 40_Abluft_WP_o PV	946	369	1.315
75	GMH F_KfW 40_Abluft_BHKW_o PV	946	224	1.170
76	GMH F_EnEV 2016_m WRG_G+S_o PV	771	372	1.143
77	GMH F_EnEV 2016_m WRG_FW_o PV	771	333	1.105
78	GMH F_EnEV 2016_m WRG_Pell_o PV	771	366	1.137
79	GMH F_EnEV 2016_m WRG_WP_o PV	771	534	1.306
80	GMH F_EnEV 2016_m WRG_BHKW_o PV	771	388	1.160
81	GMH F_KfW 55_m WRG_G+S_o PV	851	370	1.221
82	GMH F_KfW 55_m WRG_FW_o PV	851	329	1.179
83	GMH F_KfW 55_m WRG_Pell_o PV	851	361	1.212
84	GMH F_KfW 55_m WRG_WP_o PV	851	515	1.366
85	GMH F_KfW 55_m WRG_BHKW_o PV	851	375	1.225
86	GMH F_KfW 40_m WRG_G+S_o PV	946	369	1.315
87	GMH F_KfW 40_m WRG_FW_o PV	946	327	1.272
88	GMH F_KfW 40_m WRG_Pell_o PV	946	359	1.305
89	GMH F_KfW 40_m WRG_WP_o PV	946	508	1.454
90	GMH F_KfW 40_m WRG_BHKW_o PV	946	374	1.320
91	GMH F_EnEV 2016_Abluft_G+S_m PV	771	260	1.031
92	GMH F_EnEV 2016_Abluft_FW_m PV	771	237	1.009
93	GMH F_EnEV 2016_Abluft_Pell_m PV	771	284	1.055
94	GMH F_EnEV 2016_Abluft_WP_m PV	771	456	1.228
95	GMH F_EnEV 2016_Abluft_BHKW_m PV	771	297	1.069
96	GMH F_KfW 55_Abluft_G+S_m PV	851	258	1.109
97	GMH F_KfW 55_Abluft_FW_m PV	851	232	1.083
98	GMH F_KfW 55_Abluft_Pell_m PV	851	280	1.131
99	GMH F_KfW 55_Abluft_WP_m PV	851	438	1.289
100	GMH F_KfW 55_Abluft_BHKW_m PV	851	287	1.138
101	GMH F_KfW 40_Abluft_G+S_m PV	946	258	1.203
102	GMH F_KfW 40_Abluft_FW_m PV	946	231	1.176
103	GMH F_KfW 40_Abluft_Pell_m PV	946	279	1.224
104	GMH F_KfW 40_Abluft_WP_m PV	946	432	1.377
105	GMH F_KfW 40_Abluft_BHKW_m PV	946	286	1.232
106	GMH F_EnEV 2016_m WRG_G+S_m PV	771	422	1.193
107	GMH F_EnEV 2016_m WRG_FW_m PV	771	396	1.167
108	GMH F_EnEV 2016_m WRG_Pell_m PV	771	428	1.200
109	GMH F_EnEV 2016_m WRG_WP_m PV	771	597	1.368
110	GMH F_EnEV 2016_m WRG_BHKW_m PV	771	451	1.222
111	GMH F_KfW 55_m WRG_G+S_m PV	851	420	1.271
112	GMH F_KfW 55_m WRG_FW_m PV	851	391	1.242
113	GMH F_KfW 55_m WRG_Pell_m PV	851	424	1.274
114	GMH F_KfW 55_m WRG_WP_m PV	851	578	1.428
115	GMH F_KfW 55_m WRG_BHKW_m PV	851	437	1.288
116	GMH F_KfW 40_m WRG_G+S_m PV	946	420	1.365
117	GMH F_KfW 40_m WRG_FW_m PV	946	389	1.335
118	GMH F_KfW 40_m WRG_Pell_m PV	946	422	1.367
119	GMH F_KfW 40_m WRG_WP_m PV	946	571	1.516
120	GMH F_KfW 40_m WRG_BHKW_m PV	946	437	1.383

Quelle: Steinbeis-Transferzentrum EGS

Tabelle 71: Investitionskosten Sanierung EFH C

Nr. [-]	Variantenbezeichnung [-]	Investitions-kosten KG 300 [T€]	Investitions-kosten KG 400 [T€]	Investitions-kosten Summe [T€]
121	EFH C_EnEV 2016_Abluft_G+S_o PV	146	36	182
122	EFH C_EnEV 2016_Abluft_FW_o PV	146	35	180
123	EFH C_EnEV 2016_Abluft_Pell_o PV	146	40	186
124	EFH C_EnEV 2016_Abluft_WP_o PV	146	47	193
125	EFH C_EnEV 2016_Abluft_BZ+G_o PV	146	42	188
126	EFH C_KfW 55_Abluft_G+S_o PV	159	36	195
127	EFH C_KfW 55_Abluft_FW_o PV	159	35	193
128	EFH C_KfW 55_Abluft_Pell_o PV	159	40	199
129	EFH C_KfW 55_Abluft_WP_o PV	159	43	202
130	EFH C_KfW 55_Abluft_BZ+G_o PV	159	42	201
131	EFH C_KfW 40_Abluft_G+S_o PV	175	36	211
132	EFH C_KfW 40_Abluft_FW_o PV	175	35	210
133	EFH C_KfW 40_Abluft_Pell_o PV	175	40	216
134	EFH C_KfW 40_Abluft_WP_o PV	175	42	218
135	EFH C_KfW 40_Abluft_BZ+G_o PV	175	42	218
136	EFH C_EnEV 2016_m WRG_G+S_o PV	146	54	200
137	EFH C_EnEV 2016_m WRG_FW_o PV	146	53	198
138	EFH C_EnEV 2016_m WRG_Pell_o PV	146	58	204
139	EFH C_EnEV 2016_m WRG_WP_o PV	146	62	207
140	EFH C_EnEV 2016_m WRG_BZ+G_o PV	146	60	206
141	EFH C_KfW 55_m WRG_G+S_o PV	159	54	213
142	EFH C_KfW 55_m WRG_FW_o PV	159	53	211
143	EFH C_KfW 55_m WRG_Pell_o PV	159	58	217
144	EFH C_KfW 55_m WRG_WP_o PV	159	58	217
145	EFH C_KfW 55_m WRG_BZ+G_o PV	159	60	219
146	EFH C_KfW 40_m WRG_G+S_o PV	175	54	229
147	EFH C_KfW 40_m WRG_FW_o PV	175	53	228
148	EFH C_KfW 40_m WRG_Pell_o PV	175	58	233
149	EFH C_KfW 40_m WRG_WP_o PV	175	57	232
150	EFH C_KfW 40_m WRG_BZ+G_o PV	175	60	236
151	EFH C_EnEV 2016_Abluft_G+S_m PV	146	38	184
152	EFH C_EnEV 2016_Abluft_FW_m PV	146	39	185
153	EFH C_EnEV 2016_Abluft_Pell_m PV	146	45	190
154	EFH C_EnEV 2016_Abluft_WP_m PV	146	52	197
155	EFH C_EnEV 2016_Abluft_BZ+G_m PV	146	47	192
156	EFH C_KfW 55_Abluft_G+S_m PV	159	38	197
157	EFH C_KfW 55_Abluft_FW_m PV	159	39	198
158	EFH C_KfW 55_Abluft_Pell_m PV	159	45	203
159	EFH C_KfW 55_Abluft_WP_m PV	159	48	206
160	EFH C_KfW 55_Abluft_BZ+G_m PV	159	47	205
161	EFH C_KfW 40_Abluft_G+S_m PV	175	38	214
162	EFH C_KfW 40_Abluft_FW_m PV	175	39	215
163	EFH C_KfW 40_Abluft_Pell_m PV	175	45	220
164	EFH C_KfW 40_Abluft_WP_m PV	175	47	222
165	EFH C_KfW 40_Abluft_BZ+G_m PV	175	47	222
166	EFH C_EnEV 2016_m WRG_G+S_m PV	146	56	202
167	EFH C_EnEV 2016_m WRG_FW_m PV	146	57	203
168	EFH C_EnEV 2016_m WRG_Pell_m PV	146	62	208
169	EFH C_EnEV 2016_m WRG_WP_m PV	146	66	212
170	EFH C_EnEV 2016_m WRG_BZ+G_m PV	146	65	210
171	EFH C_KfW 55_m WRG_G+S_m PV	159	56	215
172	EFH C_KfW 55_m WRG_FW_m PV	159	57	216
173	EFH C_KfW 55_m WRG_Pell_m PV	159	62	221
174	EFH C_KfW 55_m WRG_WP_m PV	159	63	221
175	EFH C_KfW 55_m WRG_BZ+G_m PV	159	65	223
176	EFH C_KfW 40_m WRG_G+S_m PV	175	56	232
177	EFH C_KfW 40_m WRG_FW_m PV	175	57	232
178	EFH C_KfW 40_m WRG_Pell_m PV	175	62	238
179	EFH C_KfW 40_m WRG_WP_m PV	175	61	237
180	EFH C_KfW 40_m WRG_BZ+G_m PV	175	65	240

Quelle: Steinbeis-Transferzentrum EGS

Tabelle 72: Investitionskosten Sanierung EFH E

Nr. [-]	Variantenbezeichnung [-]	Investitions-kosten KG 300 [T€]	Investitions-kosten KG 400 [T€]	Investitions-kosten Summe [T€]
181	EFH E_EnEV 2016_Abluft_G+S_o PV	100	24	124
182	EFH E_EnEV 2016_Abluft_FW_o PV	100	27	126
183	EFH E_EnEV 2016_Abluft_Pell_o PV	100	30	130
184	EFH E_EnEV 2016_Abluft_WP_o PV	100	31	131
185	EFH E_EnEV 2016_Abluft_BZ+G_o PV	100	34	134
186	EFH E_KfW 55_Abluft_G+S_o PV	108	25	133
187	EFH E_KfW 55_Abluft_FW_o PV	108	27	135
188	EFH E_KfW 55_Abluft_Pell_o PV	108	30	138
189	EFH E_KfW 55_Abluft_WP_o PV	108	29	137
190	EFH E_KfW 55_Abluft_BZ+G_o PV	108	34	142
191	EFH E_KfW 40_Abluft_G+S_o PV	120	25	145
192	EFH E_KfW 40_Abluft_FW_o PV	120	27	146
193	EFH E_KfW 40_Abluft_Pell_o PV	120	30	150
194	EFH E_KfW 40_Abluft_WP_o PV	120	28	148
195	EFH E_KfW 40_Abluft_BZ+G_o PV	120	34	154
196	EFH E_EnEV 2016_m WRG_G+S_o PV	100	31	131
197	EFH E_EnEV 2016_m WRG_FW_o PV	100	34	133
198	EFH E_EnEV 2016_m WRG_Pell_o PV	100	37	137
199	EFH E_EnEV 2016_m WRG_WP_o PV	100	37	136
200	EFH E_EnEV 2016_m WRG_BZ+G_o PV	100	41	141
201	EFH E_KfW 55_m WRG_G+S_o PV	108	31	139
202	EFH E_KfW 55_m WRG_FW_o PV	108	34	141
203	EFH E_KfW 55_m WRG_Pell_o PV	108	37	145
204	EFH E_KfW 55_m WRG_WP_o PV	108	34	142
205	EFH E_KfW 55_m WRG_BZ+G_o PV	108	41	149
206	EFH E_KfW 40_m WRG_G+S_o PV	120	31	151
207	EFH E_KfW 40_m WRG_FW_o PV	120	34	153
208	EFH E_KfW 40_m WRG_Pell_o PV	120	37	157
209	EFH E_KfW 40_m WRG_WP_o PV	120	33	153
210	EFH E_KfW 40_m WRG_BZ+G_o PV	120	41	161
211	EFH E_EnEV 2016_Abluft_G+S_m PV	100	30	130
212	EFH E_EnEV 2016_Abluft_FW_m PV	100	34	134
213	EFH E_EnEV 2016_Abluft_Pell_m PV	100	37	137
214	EFH E_EnEV 2016_Abluft_WP_m PV	100	39	138
215	EFH E_EnEV 2016_Abluft_BZ+G_m PV	100	41	141
216	EFH E_KfW 55_Abluft_G+S_m PV	108	31	139
217	EFH E_KfW 55_Abluft_FW_m PV	108	34	142
218	EFH E_KfW 55_Abluft_Pell_m PV	108	37	145
219	EFH E_KfW 55_Abluft_WP_m PV	108	36	144
220	EFH E_KfW 55_Abluft_BZ+G_m PV	108	41	149
221	EFH E_KfW 40_Abluft_G+S_m PV	120	31	151
222	EFH E_KfW 40_Abluft_FW_m PV	120	34	153
223	EFH E_KfW 40_Abluft_Pell_m PV	120	37	157
224	EFH E_KfW 40_Abluft_WP_m PV	120	35	155
225	EFH E_KfW 40_Abluft_BZ+G_m PV	120	41	161
226	EFH E_EnEV 2016_m WRG_G+S_m PV	100	37	137
227	EFH E_EnEV 2016_m WRG_FW_m PV	100	41	140
228	EFH E_EnEV 2016_m WRG_Pell_m PV	100	44	144
229	EFH E_EnEV 2016_m WRG_WP_m PV	100	44	143
230	EFH E_EnEV 2016_m WRG_BZ+G_m PV	100	48	148
231	EFH E_KfW 55_m WRG_G+S_m PV	108	37	145
232	EFH E_KfW 55_m WRG_FW_m PV	108	41	149
233	EFH E_KfW 55_m WRG_Pell_m PV	108	44	152
234	EFH E_KfW 55_m WRG_WP_m PV	108	41	149
235	EFH E_KfW 55_m WRG_BZ+G_m PV	108	48	156
236	EFH E_KfW 40_m WRG_G+S_m PV	120	37	157
237	EFH E_KfW 40_m WRG_FW_m PV	120	41	160
238	EFH E_KfW 40_m WRG_Pell_m PV	120	44	164
239	EFH E_KfW 40_m WRG_WP_m PV	120	41	160
240	EFH E_KfW 40_m WRG_BZ+G_m PV	120	48	168

Quelle: Steinbeis-Transferzentrum EGS

Jahresgesamtkosten

Tabelle 73: Jahresgesamtkosten Neubau MFH (ohne Energiepreissteigerung)

Nr. [-]	Variantenbezeichnung [-]	KG 300 [T€/a]	KG 400 [T€/a]	I, W u B [T€/a]	Energiekosten [T€/a]	Sonstige Kosten [T€/a]	Erlöse [T€/a]	Jahresgesamtkosten [T€/a]
1	MFH_EnEV 2016_Abluft_G+S_o PV	99,6	35,4	31,6	21,5	0,0	0,0	188,1
2	MFH_EnEV 2016_Abluft_FW_o PV	99,6	33,2	31,1	25,2	0,0	0,0	189,1
3	MFH_EnEV 2016_Abluft_Pell_o PV	99,6	36,9	32,6	21,1	0,0	0,0	190,3
4	MFH_EnEV 2016_Abluft_WP_o PV	99,6	38,5	32,5	21,0	0,0	0,0	191,7
5	MFH_EnEV 2016_Abluft_BHKW_o PV	99,6	39,9	32,0	18,9	1,3	-3,7	188,0
6	MFH_KfW 55_Abluft_G+S_o PV	103,0	35,3	32,3	19,4	0,0	0,0	190,0
7	MFH_KfW 55_Abluft_FW_o PV	103,0	32,9	31,8	22,4	0,0	0,0	190,1
8	MFH_KfW 55_Abluft_Pell_o PV	103,0	36,4	33,2	19,4	0,0	0,0	192,0
9	MFH_KfW 55_Abluft_WP_o PV	103,0	37,6	33,1	19,5	0,0	0,0	193,1
10	MFH_KfW 55_Abluft_BHKW_o PV	103,0	39,3	32,7	16,0	1,3	-2,7	189,6
11	MFH_Passiv_Abluft_G+S_o PV	106,6	35,2	33,2	18,4	0,0	0,0	193,5
12	MFH_Passiv_Abluft_FW_o PV	106,6	32,8	32,6	21,2	0,0	0,0	193,2
13	MFH_Passiv_Abluft_Pell_o PV	106,6	36,2	33,9	18,7	0,0	0,0	195,4
14	MFH_Passiv_Abluft_WP_o PV	106,6	37,1	33,8	18,8	0,0	0,0	196,3
15	MFH_Passiv_Abluft_BHKW_o PV	106,6	39,3	33,6	14,5	1,2	-2,3	193,0
16	MFH_EnEV 2016_m WRG_G+S_o PV	99,6	47,5	34,2	20,3	0,0	0,0	201,7
17	MFH_EnEV 2016_m WRG_FW_o PV	99,6	45,2	33,6	23,1	0,0	0,0	201,6
18	MFH_EnEV 2016_m WRG_Pell_o PV	99,6	48,9	35,1	20,3	0,0	0,0	203,9
19	MFH_EnEV 2016_m WRG_WP_o PV	99,6	49,7	34,9	20,6	0,0	0,0	204,8
20	MFH_EnEV 2016_m WRG_BHKW_o PV	99,6	51,4	34,6	15,7	1,4	-2,3	200,4
21	MFH_KfW 55_m WRG_G+S_o PV	103,0	47,4	34,9	18,6	0,0	0,0	203,9
22	MFH_KfW 55_m WRG_FW_o PV	103,0	45,0	34,3	20,3	0,0	0,0	202,6
23	MFH_KfW 55_m WRG_Pell_o PV	103,0	48,3	35,7	18,7	0,0	0,0	205,7
24	MFH_KfW 55_m WRG_WP_o PV	103,0	48,7	35,4	18,9	0,0	0,0	206,0
25	MFH_KfW 55_m WRG_BHKW_o PV	103,0	51,2	35,3	13,6	0,9	-1,5	202,6
26	MFH_Passiv_m WRG_G+S_o PV	106,6	47,3	35,8	17,4	0,0	0,0	207,2
27	MFH_Passiv_m WRG_FW_o PV	106,6	44,8	35,2	19,4	0,0	0,0	206,0
28	MFH_Passiv_m WRG_Pell_o PV	106,6	48,1	36,4	18,3	0,0	0,0	209,5
29	MFH_Passiv_m WRG_WP_o PV	106,6	48,1	36,1	18,0	0,0	0,0	209,0
30	MFH_Passiv_m WRG_BHKW_o PV	106,6	50,7	36,2	13,7	0,6	-1,2	206,6
31	MFH_extrem_m WRG_G+S_o PV	111,9	47,3	37,0	15,9	0,0	0,0	212,1
32	MFH_extrem_m WRG_FW_o PV	111,9	44,8	36,4	17,6	0,0	0,0	210,6
33	MFH_extrem_m WRG_Pell_o PV	111,9	48,1	37,7	16,9	0,0	0,0	214,6
34	MFH_extrem_m WRG_WP_o PV	111,9	47,6	37,2	17,2	0,0	0,0	214,0
35	MFH_extrem_m WRG_BHKW_o PV	111,9	50,6	37,4	13,0	0,6	-1,0	212,4
36	MFH_EnEV 2016_Abluft_G+S_m PV D	99,6	40,6	33,2	16,6	0,9	-2,8	188,2
37	MFH_EnEV 2016_Abluft_FW_m PV D	99,6	39,0	32,9	20,4	0,9	-3,3	189,6
38	MFH_EnEV 2016_Abluft_Pell_m PV D	99,6	42,8	34,5	16,2	0,9	-3,3	190,7
39	MFH_EnEV 2016_Abluft_WP_m PV D	99,6	44,4	34,4	13,9	1,1	-2,4	190,9
40	MFH_EnEV 2016_Abluft_BHKW_m PV D	99,6	45,7	33,8	16,5	1,7	-7,8	189,7
41	MFH_KfW 55_Abluft_G+S_m PV D	103,0	40,5	34,0	14,5	0,9	-2,8	190,1
42	MFH_KfW 55_Abluft_FW_m PV D	103,0	38,8	33,6	17,6	0,9	-3,3	190,6
43	MFH_KfW 55_Abluft_Pell_m PV D	103,0	42,3	35,1	14,5	0,9	-3,3	192,5
44	MFH_KfW 55_Abluft_WP_m PV D	103,0	43,4	34,9	12,7	1,0	-2,6	192,6
45	MFH_KfW 55_Abluft_BHKW_m PV D	103,0	45,2	34,6	13,7	1,7	-6,9	191,4
46	MFH_Passiv_Abluft_G+S_m PV D	106,6	40,5	34,8	13,5	0,9	-2,8	193,6
47	MFH_Passiv_Abluft_FW_m PV D	106,6	38,6	34,4	16,4	0,9	-3,3	193,7
48	MFH_Passiv_Abluft_Pell_m PV D	106,6	42,0	35,8	13,8	0,9	-3,3	195,9
49	MFH_Passiv_Abluft_WP_m PV D	106,6	43,0	35,7	12,2	1,0	-2,6	195,9
50	MFH_Passiv_Abluft_BHKW_m PV D	106,6	45,1	35,4	12,6	1,7	-6,5	195,0
51	MFH_EnEV 2016_m WRG_G+S_m PV D	99,6	52,8	35,9	14,8	1,0	-2,6	201,5
52	MFH_EnEV 2016_m WRG_FW_m PV D	99,6	51,0	35,5	17,7	1,0	-3,1	201,7
53	MFH_EnEV 2016_m WRG_Pell_m PV D	99,6	54,7	37,0	14,8	1,0	-3,1	204,1
54	MFH_EnEV 2016_m WRG_WP_m PV D	99,6	55,5	36,8	13,3	1,1	-2,4	203,9
55	MFH_EnEV 2016_m WRG_BHKW_m PV D	99,6	57,3	36,4	13,9	1,7	-6,6	202,4
56	MFH_KfW 55_m WRG_G+S_m PV D	103,0	52,7	36,6	13,1	1,0	-2,6	203,7
57	MFH_KfW 55_m WRG_FW_m PV D	103,0	50,8	36,2	14,8	1,0	-3,1	202,7
58	MFH_KfW 55_m WRG_Pell_m PV D	103,0	54,2	37,5	13,3	1,0	-3,1	205,8
59	MFH_KfW 55_m WRG_WP_m PV D	103,0	54,5	37,3	12,1	1,0	-2,6	205,3
60	MFH_KfW 55_m WRG_BHKW_m PV D	103,0	57,1	37,2	10,9	1,7	-5,5	204,4
61	MFH_Passiv_m WRG_G+S_m PV D	106,6	52,6	37,5	12,0	1,0	-2,6	207,0
62	MFH_Passiv_m WRG_FW_m PV D	106,6	50,7	37,0	13,9	1,0	-3,1	206,1
63	MFH_Passiv_m WRG_Pell_m PV D	106,6	54,0	38,3	12,8	1,0	-3,1	209,6
64	MFH_Passiv_m WRG_WP_m PV D	106,6	54,0	38,0	11,4	1,0	-2,6	208,4
65	MFH_Passiv_m WRG_BHKW_m PV D	106,6	56,5	38,0	10,2	1,6	-5,0	208,0
66	MFH_extrem_m WRG_G+S_m PV D	111,9	52,5	38,7	10,5	1,0	-2,6	211,9
67	MFH_extrem_m WRG_FW_m PV D	111,9	50,6	38,2	12,1	1,0	-3,1	210,7
68	MFH_extrem_m WRG_Pell_m PV D	111,9	54,0	39,5	11,4	1,0	-3,1	214,7
69	MFH_extrem_m WRG_WP_m PV D	111,9	53,5	39,1	10,6	1,0	-2,7	213,5
70	MFH_extrem_m WRG_BHKW_m PV D	111,9	56,4	39,3	9,3	1,5	-4,7	213,7
71	MFH_EnEV 2016_m WRG_G+S_m PV D+F	99,6	57,6	37,4	14,6	1,0	-3,8	206,5
72	MFH_EnEV 2016_m WRG_FW_m PV D+F	99,6	55,9	37,1	17,6	1,0	-4,3	206,9
73	MFH_EnEV 2016_m WRG_Pell_m PV D+F	99,6	59,6	38,5	14,7	1,0	-4,3	209,2
74	MFH_EnEV 2016_m WRG_WP_m PV D+F	99,6	60,4	38,3	13,1	1,1	-3,6	208,9
75	MFH_EnEV 2016_m WRG_BHKW_m PV D+F	99,6	62,1	38,0	13,8	1,8	-7,8	207,6
76	MFH_KfW 55_m WRG_G+S_m PV D+F	103,0	57,5	38,2	12,9	1,0	-3,8	208,8
77	MFH_KfW 55_m WRG_FW_m PV D+F	103,0	55,6	37,8	14,7	1,0	-4,3	207,8
78	MFH_KfW 55_m WRG_Pell_m PV D+F	103,0	59,0	39,1	13,2	1,0	-4,3	211,0
79	MFH_KfW 55_m WRG_WP_m PV D+F	103,0	59,4	38,8	11,7	1,1	-3,7	210,3
80	MFH_KfW 55_m WRG_BHKW_m PV D+F	103,0	61,9	38,8	10,7	1,7	-6,7	209,5
81	MFH_Passiv_m WRG_G+S_m PV D+F	106,6	57,4	39,0	11,7	1,0	-3,8	212,0
82	MFH_Passiv_m WRG_FW_m PV D+F	106,6	55,5	38,6	13,8	1,0	-4,3	211,2
83	MFH_Passiv_m WRG_Pell_m PV D+F	106,6	58,8	39,9	12,7	1,0	-4,3	214,7

[-]	[-]	[T€/a]	[T€/a]	[T€/a]	[T€/a]	[T€/a]	[T€/a]	[T€/a]
84	MFH_Passiv_m WRG_WP_m PV D+F	106,6	58,8	39,5	11,2	1,1	-3,8	213,5
85	MFH_Passiv_m WRG_BHKW_m PV D+F	106,6	61,4	39,6	10,0	1,6	-6,1	213,1
86	MFH_extrem_m WRG_G+S_m PV D+F	111,9	57,4	40,2	10,3	1,0	-3,8	217,0
87	MFH_extrem_m WRG_FW_m PV D+F	111,9	55,5	39,8	12,0	1,0	-4,3	215,8
88	MFH_extrem_m WRG_Pell_m PV D+F	111,9	58,8	41,1	11,3	1,0	-4,3	219,8
89	MFH_extrem_m WRG_WP_m PV D+F	111,9	58,3	40,6	10,5	1,1	-3,9	218,6
90	MFH_extrem_m WRG_BHKW_m PV D+F	111,9	61,3	40,8	9,3	1,5	-5,9	218,9

Quelle: Steinbeis-Transferzentrum EGS

Tabelle 74: Jahresgesamtkosten Neubau EFH (ohne Energiepreissteigerung)

Nr.	Variantenbezeichnung	KG 300	KG 400	I, W u B	Energiekosten	Sonstige Kosten	Erlöse	Jahresgesamtkosten
[-]	[-]	[T€/a]	[T€/a]	[T€/a]	[T€/a]	[T€/a]	[T€/a]	[T€/a]
91	EFH_EnEV 2016_Abluft_G+S_o PV	7,9	3,5	2,6	1,9	0,0	0,0	15,9
92	EFH_EnEV 2016_Abluft_FW_o PV	7,9	3,1	2,6	2,6	0,0	0,0	16,2
93	EFH_EnEV 2016_Abluft_Pell_o PV	7,9	4,0	3,0	1,8	0,0	0,0	16,7
94	EFH_EnEV 2016_Abluft_WP_o PV	7,9	3,8	2,7	1,7	0,0	0,0	16,1
95	EFH_EnEV 2016_Abluft_BZ+G_o PV	7,9	5,1	3,0	1,7	0,0	-0,2	17,5
96	EFH_KfW 55_Abluft_G+S_o PV	8,2	3,5	2,7	1,7	0,0	0,0	16,0
97	EFH_KfW 55_Abluft_FW_o PV	8,2	3,1	2,7	2,2	0,0	0,0	16,2
98	EFH_KfW 55_Abluft_Pell_o PV	8,2	4,0	3,1	1,6	0,0	0,0	16,9
99	EFH_KfW 55_Abluft_WP_o PV	8,2	3,6	2,8	1,5	0,0	0,0	16,1
100	EFH_KfW 55_Abluft_BZ+G_o PV	8,2	5,1	3,1	1,5	0,0	-0,2	17,7
101	EFH_Passiv_Abluft_G+S_o PV	8,9	3,5	2,8	1,5	0,0	0,0	16,7
102	EFH_Passiv_Abluft_FW_o PV	8,9	3,1	2,8	1,9	0,0	0,0	16,7
103	EFH_Passiv_Abluft_Pell_o PV	8,9	4,0	3,3	1,5	0,0	0,0	17,6
104	EFH_Passiv_Abluft_WP_o PV	8,9	3,5	2,9	1,3	0,0	0,0	16,6
105	EFH_Passiv_Abluft_BZ+G_o PV	8,9	5,1	3,3	1,3	0,0	-0,2	18,4
106	EFH_EnEV 2016_m WRG_G+S_o PV	7,9	4,3	2,8	1,8	0,0	0,0	16,8
107	EFH_EnEV 2016_m WRG_FW_o PV	7,9	3,9	2,8	2,3	0,0	0,0	16,9
108	EFH_EnEV 2016_m WRG_Pell_o PV	7,9	4,8	3,2	1,7	0,0	0,0	17,6
109	EFH_EnEV 2016_m WRG_WP_o PV	7,9	4,4	2,9	1,6	0,0	0,0	16,8
110	EFH_EnEV 2016_m WRG_BZ+G_o PV	7,9	5,9	3,2	1,5	0,0	-0,2	18,3
111	EFH_KfW 55_m WRG_G+S_o PV	8,2	4,3	2,9	1,5	0,0	0,0	16,9
112	EFH_KfW 55_m WRG_FW_o PV	8,2	3,9	2,9	1,9	0,0	0,0	16,9
113	EFH_KfW 55_m WRG_Pell_o PV	8,2	4,8	3,3	1,5	0,0	0,0	17,8
114	EFH_KfW 55_m WRG_WP_o PV	8,2	4,2	2,9	1,4	0,0	0,0	16,8
115	EFH_KfW 55_m WRG_BZ+G_o PV	8,2	5,9	3,3	1,3	0,0	-0,2	18,6
116	EFH_Passiv_m WRG_G+S_o PV	8,9	4,3	3,1	1,3	0,0	0,0	17,5
117	EFH_Passiv_m WRG_FW_o PV	8,9	3,9	3,1	1,6	0,0	0,0	17,5
118	EFH_Passiv_m WRG_Pell_o PV	8,9	4,8	3,5	1,4	0,0	0,0	18,6
119	EFH_Passiv_m WRG_WP_o PV	8,9	4,1	3,1	1,2	0,0	0,0	17,3
120	EFH_Passiv_m WRG_BZ+G_o PV	8,9	5,9	3,5	1,2	0,0	-0,1	19,3
121	EFH_extrem_m WRG_G+S_o PV	9,1	4,3	3,1	1,2	0,0	0,0	17,7
122	EFH_extrem_m WRG_FW_o PV	9,1	3,9	3,1	1,5	0,0	0,0	17,6
123	EFH_extrem_m WRG_Pell_o PV	9,1	4,8	3,5	1,4	0,0	0,0	18,8
124	EFH_extrem_m WRG_WP_o PV	9,1	4,1	3,1	1,2	0,0	0,0	17,5
125	EFH_extrem_m WRG_BZ+G_o PV	9,1	5,9	3,5	1,1	0,0	-0,1	19,5
126	EFH_EnEV 2016_Abluft_G+S_m PV D	7,9	4,0	2,8	1,6	0,0	-0,3	15,9
127	EFH_EnEV 2016_Abluft_FW_m PV D	7,9	3,7	2,8	2,2	0,0	-0,4	16,3
128	EFH_EnEV 2016_Abluft_Pell_m PV D	7,9	4,6	3,2	1,4	0,0	-0,4	16,8
129	EFH_EnEV 2016_Abluft_WP_m PV D	7,9	4,4	2,9	1,2	0,0	-0,3	16,1
130	EFH_EnEV 2016_Abluft_BZ+G_m PV D	7,9	5,8	3,2	1,5	0,0	-0,7	17,7
131	EFH_KfW 55_Abluft_G+S_m PV D	8,2	4,0	2,9	1,3	0,0	-0,3	16,1
132	EFH_KfW 55_Abluft_FW_m PV D	8,2	3,7	2,9	1,8	0,0	-0,4	16,3
133	EFH_KfW 55_Abluft_Pell_m PV D	8,2	4,6	3,3	1,3	0,0	-0,4	17,0
134	EFH_KfW 55_Abluft_WP_m PV D	8,2	4,2	3,0	1,0	0,0	-0,3	16,1
135	EFH_KfW 55_Abluft_BZ+G_m PV D	8,2	5,8	3,3	1,3	0,0	-0,7	17,8
136	EFH_Passiv_Abluft_G+S_m PV D	8,9	4,0	3,0	1,1	0,0	-0,3	16,7
137	EFH_Passiv_Abluft_FW_m PV D	8,9	3,7	3,0	1,5	0,0	-0,4	16,8
138	EFH_Passiv_Abluft_Pell_m PV D	8,9	4,6	3,4	1,1	0,0	-0,4	17,7
139	EFH_Passiv_Abluft_WP_m PV D	8,9	4,1	3,1	0,9	0,0	-0,3	16,6
140	EFH_Passiv_Abluft_BZ+G_m PV D	8,9	5,8	3,5	1,1	0,0	-0,7	18,5
141	EFH_EnEV 2016_m WRG_G+S_m PV D	7,9	4,8	3,0	1,4	0,0	-0,3	16,8
142	EFH_EnEV 2016_m WRG_FW_m PV D	7,9	4,5	3,0	1,9	0,0	-0,4	17,0
143	EFH_EnEV 2016_m WRG_Pell_m PV D	7,9	5,4	3,4	1,3	0,0	-0,4	17,7
144	EFH_EnEV 2016_m WRG_WP_m PV D	7,9	5,0	3,1	1,1	0,0	-0,3	16,8
145	EFH_EnEV 2016_m WRG_BZ+G_m PV D	7,9	6,6	3,4	1,3	0,0	-0,7	18,5
146	EFH_KfW 55_m WRG_G+S_m PV D	8,2	4,8	3,1	1,1	0,0	-0,3	16,9
147	EFH_KfW 55_m WRG_FW_m PV D	8,2	4,5	3,1	1,5	0,0	-0,4	17,0
148	EFH_KfW 55_m WRG_Pell_m PV D	8,2	5,4	3,5	1,1	0,0	-0,4	17,9
149	EFH_KfW 55_m WRG_WP_m PV D	8,2	4,9	3,1	0,9	0,0	-0,3	16,8
150	EFH_KfW 55_m WRG_BZ+G_m PV D	8,2	6,6	3,5	1,1	0,0	-0,6	18,7
151	EFH_Passiv_m WRG_G+S_m PV D	8,9	4,8	3,2	0,9	0,0	-0,3	17,5
152	EFH_Passiv_m WRG_FW_m PV D	8,9	4,5	3,3	1,2	0,0	-0,4	17,5
153	EFH_Passiv_m WRG_Pell_m PV D	8,9	5,4	3,7	1,0	0,0	-0,4	18,6
154	EFH_Passiv_m WRG_WP_m PV D	8,9	4,7	3,2	0,8	0,0	-0,3	17,3
155	EFH_Passiv_m WRG_BZ+G_m PV D	8,9	6,6	3,7	0,9	0,0	-0,6	19,5
156	EFH_extrem_m WRG_G+S_m PV D	9,1	4,8	3,3	0,8	0,0	-0,3	17,7
157	EFH_extrem_m WRG_FW_m PV D	9,1	4,5	3,3	1,1	0,0	-0,4	17,7
158	EFH_extrem_m WRG_Pell_m PV D	9,1	5,4	3,7	1,0	0,0	-0,4	18,8
159	EFH_extrem_m WRG_WP_m PV D	9,1	4,7	3,3	0,8	0,0	-0,4	17,5
160	EFH_extrem_m WRG_BZ+G_m PV D	9,1	6,6	3,7	0,9	0,0	-0,6	19,7

Quelle: Steinbeis-Transferzentrum EGS

Tabelle 75: Jahresgesamtkosten Sanierung MFH E (ohne Energiepreissteigerung)

Nr. [-]	Variantenbezeichnung [-]	KG 300 [T€/a]	KG 400 [T€/a]	I, W u B [T€/a]	Energiekosten [T€/a]	Sonstige Kosten [T€/a]	Erlöse [T€/a]	Jahresgesamtkosten [T€/a]
1	MFH E_EnEV 2016_Abluft_G+S_o PV	44,8	19,1	13,8	33,9	0,0	0,0	111,7
2	MFH E_EnEV 2016_Abluft_FW_o PV	44,8	16,9	13,4	40,9	0,0	0,0	115,9
3	MFH E_EnEV 2016_Abluft_Pell_o PV	44,8	20,8	15,4	32,6	0,0	0,0	113,6
4	MFH E_EnEV 2016_Abluft_WP_o PV	44,8	24,8	15,4	37,5	0,0	0,0	122,5
5	MFH E_EnEV 2016_Abluft_BHKW_o PV	44,8	23,4	16,7	29,5	2,3	-6,0	110,7
6	MFH E_KfW 55_Abluft_G+S_o PV	49,7	19,4	15,0	30,1	0,0	0,0	114,2
7	MFH E_KfW 55_Abluft_FW_o PV	49,7	17,0	14,5	35,6	0,0	0,0	116,7
8	MFH E_KfW 55_Abluft_Pell_o PV	49,7	20,9	16,4	29,5	0,0	0,0	116,6
9	MFH E_KfW 55_Abluft_WP_o PV	49,7	23,8	16,3	34,1	0,0	0,0	123,8
10	MFH E_KfW 55_Abluft_BHKW_o PV	49,7	22,8	17,4	24,1	2,4	-4,4	112,0
11	MFH E_KfW 40_Abluft_G+S_o PV	56,2	19,3	16,4	28,6	0,0	0,0	120,5
12	MFH E_KfW 40_Abluft_FW_o PV	56,2	16,8	15,8	33,7	0,0	0,0	122,5
13	MFH E_KfW 40_Abluft_Pell_o PV	56,2	20,8	17,8	28,5	0,0	0,0	123,2
14	MFH E_KfW 40_Abluft_WP_o PV	56,2	23,3	17,6	32,2	0,0	0,0	129,3
15	MFH E_KfW 40_Abluft_BHKW_o PV	56,2	22,5	19,4	22,1	2,4	-3,7	118,8
16	MFH E_EnEV 2016_m WRG_G+S_o PV	44,8	29,0	16,0	32,7	0,0	0,0	122,5
17	MFH E_EnEV 2016_m WRG_FW_o PV	44,8	26,6	15,5	38,1	0,0	0,0	124,9
18	MFH E_EnEV 2016_m WRG_Pell_o PV	44,8	29,4	16,9	32,3	0,0	0,0	123,4
19	MFH E_EnEV 2016_m WRG_WP_o PV	44,8	33,4	17,3	36,3	0,0	0,0	131,7
20	MFH E_EnEV 2016_m WRG_BHKW_o PV	44,8	32,4	18,4	25,3	2,4	-4,0	119,3
21	MFH E_KfW 55_m WRG_G+S_o PV	49,7	29,2	17,2	29,6	0,0	0,0	125,7
22	MFH E_KfW 55_m WRG_FW_o PV	49,7	26,6	16,6	34,0	0,0	0,0	126,9
23	MFH E_KfW 55_m WRG_Pell_o PV	49,7	29,4	17,9	30,0	0,0	0,0	127,1
24	MFH E_KfW 55_m WRG_WP_o PV	49,7	32,3	18,1	33,2	0,0	0,0	133,4
25	MFH E_KfW 55_m WRG_BHKW_o PV	49,7	31,9	19,5	22,7	1,8	-2,8	122,9
26	MFH E_KfW 40_m WRG_G+S_o PV	56,2	29,2	18,6	28,1	0,0	0,0	132,0
27	MFH E_KfW 40_m WRG_FW_o PV	56,2	26,5	18,0	32,0	0,0	0,0	132,7
28	MFH E_KfW 40_m WRG_Pell_o PV	56,2	29,2	19,3	28,8	0,0	0,0	133,5
29	MFH E_KfW 40_m WRG_WP_o PV	56,2	31,9	19,4	31,7	0,0	0,0	139,2
30	MFH E_KfW 40_m WRG_BHKW_o PV	56,2	31,3	20,5	21,7	1,7	-2,4	129,0
31	MFH E_EnEV 2016_Abluft_G+S_m PV	44,8	24,3	15,5	27,1	1,4	-2,4	110,6
32	MFH E_EnEV 2016_Abluft_FW_m PV	44,8	22,8	15,3	33,5	1,4	-2,9	114,9
33	MFH E_EnEV 2016_Abluft_Pell_m PV	44,8	26,7	17,3	25,3	1,4	-2,9	112,6
34	MFH E_EnEV 2016_Abluft_WP_m PV	44,8	30,7	17,3	28,4	1,4	-2,1	120,5
35	MFH E_EnEV 2016_Abluft_BHKW_m PV	44,8	29,3	18,6	25,6	3,1	-10,0	111,4
36	MFH E_KfW 55_Abluft_G+S_m PV	49,7	24,5	16,6	23,2	1,4	-2,4	113,1
37	MFH E_KfW 55_Abluft_FW_m PV	49,7	22,9	16,3	28,3	1,4	-2,9	115,8
38	MFH E_KfW 55_Abluft_Pell_m PV	49,7	26,8	18,3	22,2	1,4	-2,9	115,6
39	MFH E_KfW 55_Abluft_WP_m PV	49,7	29,7	18,2	25,2	1,4	-2,2	121,9
40	MFH E_KfW 55_Abluft_BHKW_m PV	49,7	28,7	19,3	20,8	3,1	-8,5	113,1
41	MFH E_KfW 40_Abluft_G+S_m PV	56,2	24,5	18,1	21,8	1,4	-2,4	119,5
42	MFH E_KfW 40_Abluft_FW_m PV	56,2	22,7	17,7	26,3	1,4	-2,9	121,6
43	MFH E_KfW 40_Abluft_Pell_m PV	56,2	26,7	19,7	21,1	1,4	-2,9	122,3
44	MFH E_KfW 40_Abluft_WP_m PV	56,2	29,2	19,5	23,5	1,4	-2,2	127,5
45	MFH E_KfW 40_Abluft_BHKW_m PV	56,2	28,4	21,2	19,0	3,0	-7,9	119,9
46	MFH E_EnEV 2016_m WRG_G+S_m PV	44,8	34,2	17,7	24,9	1,4	-2,1	120,9
47	MFH E_EnEV 2016_m WRG_FW_m PV	44,8	32,5	17,4	30,0	1,5	-2,6	123,5
48	MFH E_EnEV 2016_m WRG_Pell_m PV	44,8	35,3	18,8	24,2	1,5	-2,6	121,9
49	MFH E_EnEV 2016_m WRG_WP_m PV	44,8	39,3	19,2	26,7	1,5	-2,0	129,5
50	MFH E_EnEV 2016_m WRG_BHKW_m PV	44,8	38,3	20,2	21,7	3,1	-8,0	120,1
51	MFH E_KfW 55_m WRG_G+S_m PV	49,7	34,4	18,8	21,7	1,4	-2,1	124,1
52	MFH E_KfW 55_m WRG_FW_m PV	49,7	32,5	18,5	25,8	1,5	-2,6	125,4
53	MFH E_KfW 55_m WRG_Pell_m PV	49,7	35,3	19,8	21,9	1,5	-2,6	125,6
54	MFH E_KfW 55_m WRG_WP_m PV	49,7	38,2	20,0	24,1	1,4	-2,1	131,3
55	MFH E_KfW 55_m WRG_BHKW_m PV	49,7	37,8	21,4	18,6	2,9	-6,7	123,7
56	MFH E_KfW 40_m WRG_G+S_m PV	56,2	34,3	20,2	20,2	1,4	-2,1	130,3
57	MFH E_KfW 40_m WRG_FW_m PV	56,2	32,4	19,8	23,9	1,5	-2,6	131,3
58	MFH E_KfW 40_m WRG_Pell_m PV	56,2	35,1	21,1	20,7	1,5	-2,6	132,0
59	MFH E_KfW 40_m WRG_WP_m PV	56,2	37,7	21,3	22,8	1,4	-2,2	137,2
60	MFH E_KfW 40_m WRG_BHKW_m PV	56,2	37,2	22,4	17,3	2,8	-6,2	129,7

Quelle: Steinbeis-Transferzentrum EGS

Tabelle 76: Jahresgesamtkosten Sanierung GMH F (ohne Energiepreissteigerung)

Nr. [-]	Variantenbezeichnung [-]	KG 300 [T€/a]	KG 400 [T€/a]	I, W u B [T€/a]	Energiekosten [T€/a]	Sonstige Kosten [T€/a]	Erlöse [T€/a]	Jahresgesamtkosten [T€/a]
61	GMH F_EnEV 2016_Abluft_G+S_o PV	39,3	17,8	12,1	40,6	0,0	0,0	109,9
62	GMH F_EnEV 2016_Abluft_FW_o PV	39,3	15,2	11,5	46,6	0,0	0,0	112,6
63	GMH F_EnEV 2016_Abluft_Pell_o PV	39,3	19,3	13,6	39,7	0,0	0,0	111,9
64	GMH F_EnEV 2016_Abluft_WP_o PV	39,3	28,9	15,0	44,0	0,0	0,0	127,3
65	GMH F_EnEV 2016_Abluft_BHKW_o PV	39,3	21,3	14,6	31,3	3,2	-4,7	105,1
66	GMH F_KfW 55_Abluft_G+S_o PV	43,3	17,7	13,0	37,3	0,0	0,0	111,3
67	GMH F_KfW 55_Abluft_FW_o PV	43,3	14,9	12,3	42,3	0,0	0,0	112,8
68	GMH F_KfW 55_Abluft_Pell_o PV	43,3	19,0	14,3	37,2	0,0	0,0	113,8
69	GMH F_KfW 55_Abluft_WP_o PV	43,3	27,8	15,7	40,7	0,0	0,0	127,5
70	GMH F_KfW 55_Abluft_BHKW_o PV	43,3	20,2	15,9	28,5	2,9	-3,5	107,3
71	GMH F_KfW 40_Abluft_G+S_o PV	48,1	17,7	14,0	36,1	0,0	0,0	116,0
72	GMH F_KfW 40_Abluft_FW_o PV	48,1	14,8	13,3	40,8	0,0	0,0	117,0
73	GMH F_KfW 40_Abluft_Pell_o PV	48,1	18,9	15,3	36,3	0,0	0,0	118,6
74	GMH F_KfW 40_Abluft_WP_o PV	48,1	27,5	16,6	39,6	0,0	0,0	131,8
75	GMH F_KfW 40_Abluft_BHKW_o PV	48,1	20,2	16,6	28,0	2,7	-3,1	112,5
76	GMH F_EnEV 2016_m WRG_G+S_o PV	39,3	32,7	15,4	39,6	0,0	0,0	127,1
77	GMH F_EnEV 2016_m WRG_FW_o PV	39,3	29,9	14,7	44,5	0,0	0,0	128,4
78	GMH F_EnEV 2016_m WRG_Pell_o PV	39,3	32,8	16,2	39,7	0,0	0,0	128,0
79	GMH F_EnEV 2016_m WRG_WP_o PV	39,3	42,6	18,0	43,0	0,0	0,0	142,9
80	GMH F_EnEV 2016_m WRG_BHKW_o PV	39,3	35,2	18,2	30,9	2,6	-3,2	123,0
81	GMH F_KfW 55_m WRG_G+S_o PV	43,3	32,6	16,3	36,5	0,0	0,0	128,7
82	GMH F_KfW 55_m WRG_FW_o PV	43,3	29,6	15,5	40,5	0,0	0,0	128,9
83	GMH F_KfW 55_m WRG_Pell_o PV	43,3	32,5	16,9	37,3	0,0	0,0	130,0
84	GMH F_KfW 55_m WRG_WP_o PV	43,3	41,5	18,6	40,0	0,0	0,0	143,4
85	GMH F_KfW 55_m WRG_BHKW_o PV	43,3	33,9	18,1	29,6	1,8	-2,3	124,4
86	GMH F_KfW 40_m WRG_G+S_o PV	48,1	32,5	17,3	35,3	0,0	0,0	133,2
87	GMH F_KfW 40_m WRG_FW_o PV	48,1	29,5	16,5	38,9	0,0	0,0	133,0
88	GMH F_KfW 40_m WRG_Pell_o PV	48,1	32,3	17,9	36,3	0,0	0,0	134,6
89	GMH F_KfW 40_m WRG_WP_o PV	48,1	41,1	19,6	38,8	0,0	0,0	147,5
90	GMH F_KfW 40_m WRG_BHKW_o PV	48,1	33,9	18,9	29,0	1,6	-2,0	129,5
91	GMH F_EnEV 2016_Abluft_G+S_m PV	39,3	21,0	13,1	33,5	1,4	-0,6	107,8
92	GMH F_EnEV 2016_Abluft_FW_m PV	39,3	19,1	12,8	38,7	1,6	-1,0	110,5
93	GMH F_EnEV 2016_Abluft_Pell_m PV	39,3	23,2	14,8	31,8	1,6	-1,0	109,8
94	GMH F_EnEV 2016_Abluft_WP_m PV	39,3	32,8	16,3	35,6	1,4	-0,6	124,7
95	GMH F_EnEV 2016_Abluft_BHKW_m PV	39,3	25,2	15,9	26,4	4,2	-6,7	104,4
96	GMH F_KfW 55_Abluft_G+S_m PV	43,3	20,9	14,0	30,2	1,4	-0,6	109,3
97	GMH F_KfW 55_Abluft_FW_m PV	43,3	18,8	13,5	34,4	1,6	-1,0	110,7
98	GMH F_KfW 55_Abluft_Pell_m PV	43,3	22,9	15,6	29,3	1,6	-1,0	111,7
99	GMH F_KfW 55_Abluft_WP_m PV	43,3	31,8	16,9	32,2	1,4	-0,6	125,0
100	GMH F_KfW 55_Abluft_BHKW_m PV	43,3	24,2	17,1	23,4	3,9	-5,4	106,6
101	GMH F_KfW 40_Abluft_G+S_m PV	48,1	20,8	15,0	29,1	1,4	-0,6	113,9
102	GMH F_KfW 40_Abluft_FW_m PV	48,1	18,7	14,5	32,9	1,6	-1,0	114,9
103	GMH F_KfW 40_Abluft_Pell_m PV	48,1	22,8	16,6	28,4	1,6	-1,0	116,5
104	GMH F_KfW 40_Abluft_WP_m PV	48,1	31,4	17,9	31,1	1,4	-0,6	129,3
105	GMH F_KfW 40_Abluft_BHKW_m PV	48,1	24,1	17,9	22,7	3,8	-4,9	111,7
106	GMH F_EnEV 2016_m WRG_G+S_m PV	39,3	35,9	16,4	31,9	1,5	-0,3	124,6
107	GMH F_EnEV 2016_m WRG_FW_m PV	39,3	33,8	16,0	35,8	1,7	-0,7	125,9
108	GMH F_EnEV 2016_m WRG_Pell_m PV	39,3	36,8	17,4	31,0	1,7	-0,7	125,5
109	GMH F_EnEV 2016_m WRG_WP_m PV	39,3	46,5	19,3	34,3	1,4	-0,6	140,2
110	GMH F_EnEV 2016_m WRG_BHKW_m PV	39,3	39,1	19,4	25,1	3,8	-4,9	121,9
111	GMH F_KfW 55_m WRG_G+S_m PV	43,3	35,7	17,3	28,8	1,5	-0,3	126,3
112	GMH F_KfW 55_m WRG_FW_m PV	43,3	33,5	16,8	31,8	1,7	-0,7	126,4
113	GMH F_KfW 55_m WRG_Pell_m PV	43,3	36,4	18,1	28,6	1,7	-0,7	127,5
114	GMH F_KfW 55_m WRG_WP_m PV	43,3	45,4	19,9	31,2	1,4	-0,6	140,7
115	GMH F_KfW 55_m WRG_BHKW_m PV	43,3	37,9	19,3	23,2	3,3	-3,8	123,3
116	GMH F_KfW 40_m WRG_G+S_m PV	48,1	35,7	18,3	27,5	1,5	-0,3	130,8
117	GMH F_KfW 40_m WRG_FW_m PV	48,1	33,4	17,8	30,3	1,7	-0,7	130,5
118	GMH F_KfW 40_m WRG_Pell_m PV	48,1	36,3	19,1	27,6	1,7	-0,7	132,1
119	GMH F_KfW 40_m WRG_WP_m PV	48,1	45,0	20,8	29,9	1,5	-0,5	144,8
120	GMH F_KfW 40_m WRG_BHKW_m PV	48,1	37,8	20,2	22,4	3,2	-3,4	128,3

Quelle: Steinbeis-Transferzentrum EGS

Tabelle 77: Jahresgesamtkosten Sanierung EFH C (ohne Energiepreissteigerung)

Nr. [-]	Variantenbezeichnung [-]	KG 300 [T€/a]	KG 400 [T€/a]	I, W u B [T€/a]	Energiekosten [T€/a]	Sonstige Kosten [T€/a]	Erlöse [T€/a]	Jahresgesamtkosten [T€/a]
121	EFH C_EnEV 2016_Abluft_G+S_o PV	7,2	2,6	2,1	4,0	0,0	0,0	16,0
122	EFH C_EnEV 2016_Abluft_FW_o PV	7,2	2,4	2,2	5,4	0,0	0,0	17,2
123	EFH C_EnEV 2016_Abluft_Pell_o PV	7,2	3,0	2,5	3,8	0,0	0,0	16,5
124	EFH C_EnEV 2016_Abluft_WP_o PV	7,2	3,2	2,3	3,9	0,0	0,0	16,7
125	EFH C_EnEV 2016_Abluft_BZ+G_o PV	7,2	4,1	2,5	3,3	0,0	-0,3	16,8
126	EFH C_KfW 55_Abluft_G+S_o PV	7,9	2,6	2,3	3,4	0,0	0,0	16,1
127	EFH C_KfW 55_Abluft_FW_o PV	7,9	2,4	2,3	4,6	0,0	0,0	17,2
128	EFH C_KfW 55_Abluft_Pell_o PV	7,9	3,0	2,6	3,4	0,0	0,0	16,9
129	EFH C_KfW 55_Abluft_WP_o PV	7,9	3,0	2,4	3,4	0,0	0,0	16,7
130	EFH C_KfW 55_Abluft_BZ+G_o PV	7,9	4,1	2,6	2,7	0,0	-0,3	17,1
131	EFH C_KfW 40_Abluft_G+S_o PV	8,7	2,6	2,5	3,1	0,0	0,0	16,9
132	EFH C_KfW 40_Abluft_FW_o PV	8,7	2,4	2,5	4,2	0,0	0,0	17,8
133	EFH C_KfW 40_Abluft_Pell_o PV	8,7	3,0	2,8	3,3	0,0	0,0	17,8
134	EFH C_KfW 40_Abluft_WP_o PV	8,7	2,9	2,6	3,2	0,0	0,0	17,4
135	EFH C_KfW 40_Abluft_BZ+G_o PV	8,7	4,1	2,8	2,5	0,0	-0,3	17,8
136	EFH C_EnEV 2016_m WRG_G+S_o PV	7,2	4,2	2,5	3,7	0,0	0,0	17,8
137	EFH C_EnEV 2016_m WRG_FW_o PV	7,2	4,1	2,6	4,9	0,0	0,0	18,8
138	EFH C_EnEV 2016_m WRG_Pell_o PV	7,2	4,7	2,9	3,7	0,0	0,0	18,5
139	EFH C_EnEV 2016_m WRG_WP_o PV	7,2	4,7	2,7	3,7	0,0	0,0	18,3
140	EFH C_EnEV 2016_m WRG_BZ+G_o PV	7,2	5,8	2,9	2,9	0,0	-0,3	18,6
141	EFH C_KfW 55_m WRG_G+S_o PV	7,9	4,2	2,7	3,1	0,0	0,0	18,0
142	EFH C_KfW 55_m WRG_FW_o PV	7,9	4,1	2,7	4,1	0,0	0,0	18,7
143	EFH C_KfW 55_m WRG_Pell_o PV	7,9	4,7	3,0	3,3	0,0	0,0	18,9
144	EFH C_KfW 55_m WRG_WP_o PV	7,9	4,5	2,8	3,2	0,0	0,0	18,4
145	EFH C_KfW 55_m WRG_BZ+G_o PV	7,9	5,8	3,0	2,4	0,0	-0,3	18,9
146	EFH C_KfW 40_m WRG_G+S_o PV	8,7	4,2	2,9	2,9	0,0	0,0	18,7
147	EFH C_KfW 40_m WRG_FW_o PV	8,7	4,1	2,9	3,7	0,0	0,0	19,4
148	EFH C_KfW 40_m WRG_Pell_o PV	8,7	4,7	3,2	3,1	0,0	0,0	19,8
149	EFH C_KfW 40_m WRG_WP_o PV	8,7	4,4	2,9	3,0	0,0	0,0	19,1
150	EFH C_KfW 40_m WRG_BZ+G_o PV	8,7	5,8	3,2	2,2	0,0	-0,2	19,7
151	EFH C_EnEV 2016_Abluft_G+S_m PV	7,2	2,7	2,2	3,6	0,0	0,0	15,8
152	EFH C_EnEV 2016_Abluft_FW_m PV	7,2	2,6	2,3	4,9	0,0	-0,1	17,0
153	EFH C_EnEV 2016_Abluft_Pell_m PV	7,2	3,2	2,6	3,3	0,0	-0,1	16,3
154	EFH C_EnEV 2016_Abluft_WP_m PV	7,2	3,5	2,4	3,7	0,0	-0,1	16,8
155	EFH C_EnEV 2016_Abluft_BZ+G_m PV	7,2	4,4	2,6	3,3	0,0	-0,5	17,0
156	EFH C_KfW 55_Abluft_G+S_m PV	7,9	2,7	2,3	3,0	0,0	0,0	16,0
157	EFH C_KfW 55_Abluft_FW_m PV	7,9	2,6	2,4	4,1	0,0	-0,1	17,0
158	EFH C_KfW 55_Abluft_Pell_m PV	7,9	3,2	2,7	3,0	0,0	-0,1	16,7
159	EFH C_KfW 55_Abluft_WP_m PV	7,9	3,3	2,5	3,2	0,0	-0,1	16,7
160	EFH C_KfW 55_Abluft_BZ+G_m PV	7,9	4,4	2,7	2,7	0,0	-0,5	17,2
161	EFH C_KfW 40_Abluft_G+S_m PV	8,7	2,7	2,5	2,8	0,0	0,0	16,7
162	EFH C_KfW 40_Abluft_FW_m PV	8,7	2,6	2,6	3,7	0,0	-0,1	17,6
163	EFH C_KfW 40_Abluft_Pell_m PV	8,7	3,2	2,9	2,8	0,0	-0,1	17,6
164	EFH C_KfW 40_Abluft_WP_m PV	8,7	3,2	2,7	2,9	0,0	-0,1	17,4
165	EFH C_KfW 40_Abluft_BZ+G_m PV	8,7	4,4	2,9	2,4	0,0	-0,5	17,9
166	EFH C_EnEV 2016_m WRG_G+S_m PV	7,2	4,4	2,6	3,3	0,0	0,0	17,6
167	EFH C_EnEV 2016_m WRG_FW_m PV	7,2	4,3	2,7	4,4	0,0	-0,1	18,6
168	EFH C_EnEV 2016_m WRG_Pell_m PV	7,2	4,9	3,0	3,2	0,0	-0,1	18,3
169	EFH C_EnEV 2016_m WRG_WP_m PV	7,2	5,0	2,8	3,4	0,0	0,0	18,3
170	EFH C_EnEV 2016_m WRG_BZ+G_m PV	7,2	6,1	3,0	3,6	0,0	-0,5	19,3
171	EFH C_KfW 55_m WRG_G+S_m PV	7,9	4,4	2,7	2,8	0,0	0,0	17,8
172	EFH C_KfW 55_m WRG_FW_m PV	7,9	4,3	2,8	3,5	0,0	-0,1	18,5
173	EFH C_KfW 55_m WRG_Pell_m PV	7,9	4,9	3,1	2,8	0,0	-0,1	18,7
174	EFH C_KfW 55_m WRG_WP_m PV	7,9	4,8	2,9	2,9	0,0	0,0	18,3
175	EFH C_KfW 55_m WRG_BZ+G_m PV	7,9	6,1	3,1	3,0	0,0	-0,5	19,6
176	EFH C_KfW 40_m WRG_G+S_m PV	8,7	4,4	2,9	2,5	0,0	0,0	18,5
177	EFH C_KfW 40_m WRG_FW_m PV	8,7	4,3	3,0	3,1	0,0	-0,1	19,1
178	EFH C_KfW 40_m WRG_Pell_m PV	8,7	4,9	3,3	2,6	0,0	-0,1	19,5
179	EFH C_KfW 40_m WRG_WP_m PV	8,7	4,7	3,0	2,6	0,0	0,0	19,0
180	EFH C_KfW 40_m WRG_BZ+G_m PV	8,7	6,1	3,3	2,8	0,0	-0,5	20,3

Quelle: Steinbeis-Transferzentrum EGS

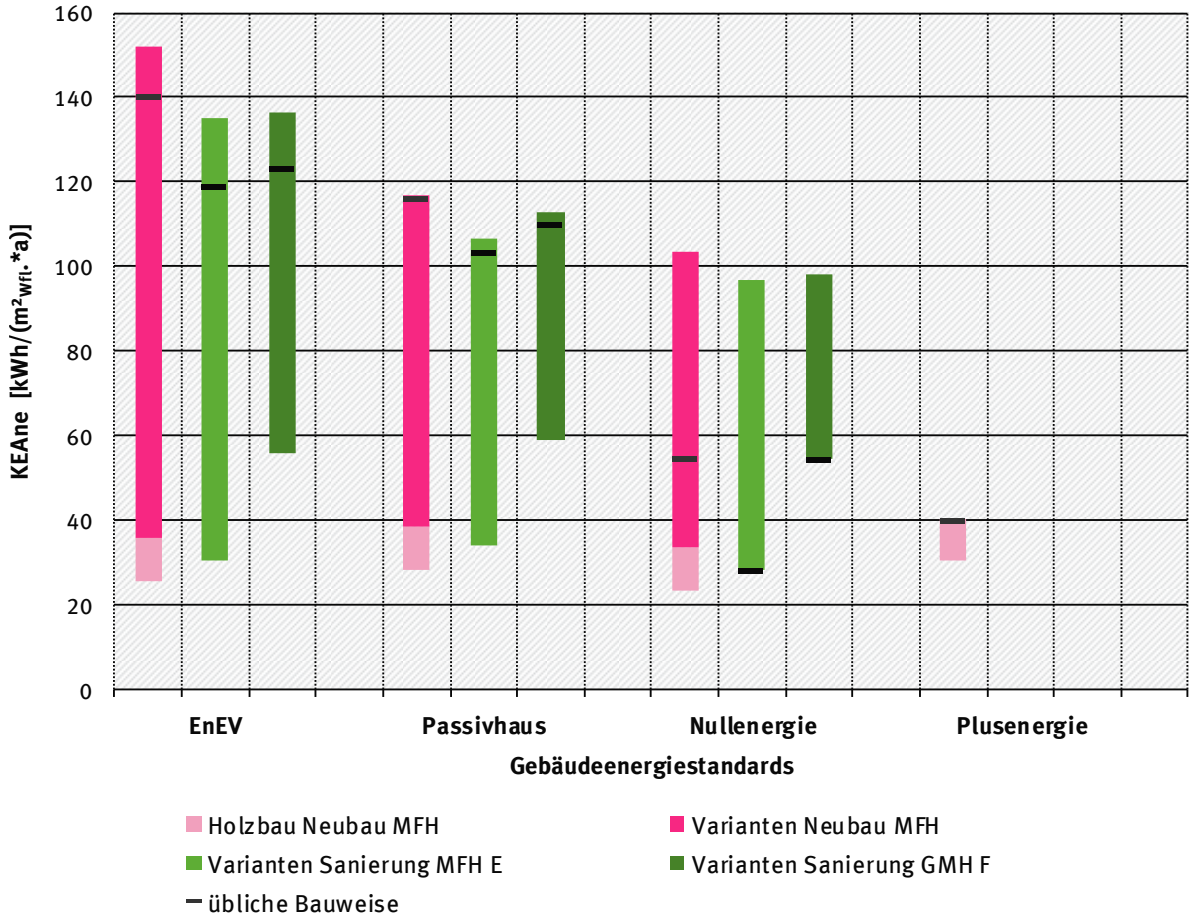
Tabelle 78: Jahresgesamtkosten Sanierung EFH E (ohne Energiepreissteigerung)

Nr. [-]	Variantenbezeichnung [-]	KG 300 [T€/a]	KG 400 [T€/a]	I, W u B [T€/a]	Energiekosten [T€/a]	Sonstige Kosten [T€/a]	Erlöse [T€/a]	Jahresgesamtkosten [T€/a]
181	EFH E_EnEV 2016_Abluft_G+S_o PV	4,9	1,7	1,5	2,4	0,0	0,0	10,5
182	EFH E_EnEV 2016_Abluft_FW_o PV	4,9	1,8	1,6	3,3	0,0	0,0	11,6
183	EFH E_EnEV 2016_Abluft_Pell_o PV	4,9	2,2	1,8	2,3	0,0	0,0	11,3
184	EFH E_EnEV 2016_Abluft_WP_o PV	4,9	2,2	1,6	2,3	0,0	0,0	11,0
185	EFH E_EnEV 2016_Abluft_BZ+G_o PV	4,9	3,5	1,9	2,1	0,0	-0,3	12,1
186	EFH E_KfW 55_Abluft_G+S_o PV	5,3	1,8	1,6	1,9	0,0	0,0	10,7
187	EFH E_KfW 55_Abluft_FW_o PV	5,3	1,8	1,7	2,6	0,0	0,0	11,4
188	EFH E_KfW 55_Abluft_Pell_o PV	5,3	2,2	1,9	2,0	0,0	0,0	11,5
189	EFH E_KfW 55_Abluft_WP_o PV	5,3	2,0	1,7	1,9	0,0	0,0	11,0
190	EFH E_KfW 55_Abluft_BZ+G_o PV	5,3	3,5	2,0	1,7	0,0	-0,3	12,2
191	EFH E_KfW 40_Abluft_G+S_o PV	5,9	1,8	1,7	1,8	0,0	0,0	11,2
192	EFH E_KfW 40_Abluft_FW_o PV	5,9	1,8	1,8	2,4	0,0	0,0	11,9
193	EFH E_KfW 40_Abluft_Pell_o PV	5,9	2,2	2,1	1,9	0,0	0,0	12,1
194	EFH E_KfW 40_Abluft_WP_o PV	5,9	2,0	1,8	1,8	0,0	0,0	11,5
195	EFH E_KfW 40_Abluft_BZ+G_o PV	5,9	3,5	2,1	1,6	0,0	-0,3	12,8
196	EFH E_EnEV 2016_m WRG_G+S_o PV	4,9	2,4	1,7	2,2	0,0	0,0	11,2
197	EFH E_EnEV 2016_m WRG_FW_o PV	4,9	2,4	1,8	3,0	0,0	0,0	12,1
198	EFH E_EnEV 2016_m WRG_Pell_o PV	4,9	2,9	2,0	2,2	0,0	0,0	12,1
199	EFH E_EnEV 2016_m WRG_WP_o PV	4,9	2,7	1,8	2,2	0,0	0,0	11,6
200	EFH E_EnEV 2016_m WRG_BZ+G_o PV	4,9	4,2	2,1	1,9	0,0	-0,3	12,8
201	EFH E_KfW 55_m WRG_G+S_o PV	5,3	2,4	1,8	1,8	0,0	0,0	11,3
202	EFH E_KfW 55_m WRG_FW_o PV	5,3	2,4	1,8	2,4	0,0	0,0	12,0
203	EFH E_KfW 55_m WRG_Pell_o PV	5,3	2,9	2,1	1,9	0,0	0,0	12,2
204	EFH E_KfW 55_m WRG_WP_o PV	5,3	2,6	1,8	1,9	0,0	0,0	11,6
205	EFH E_KfW 55_m WRG_BZ+G_o PV	5,3	4,2	2,2	1,5	0,0	-0,2	12,9
206	EFH E_KfW 40_m WRG_G+S_o PV	5,9	2,4	1,9	1,6	0,0	0,0	11,8
207	EFH E_KfW 40_m WRG_FW_o PV	5,9	2,4	2,0	2,1	0,0	0,0	12,4
208	EFH E_KfW 40_m WRG_Pell_o PV	5,9	2,9	2,2	1,8	0,0	0,0	12,9
209	EFH E_KfW 40_m WRG_WP_o PV	5,9	2,5	1,9	1,7	0,0	0,0	12,1
210	EFH E_KfW 40_m WRG_BZ+G_o PV	5,9	4,2	2,3	1,4	0,0	-0,2	13,5
211	EFH E_EnEV 2016_Abluft_G+S_m PV	4,9	2,1	1,6	2,1	0,0	-0,2	10,5
212	EFH E_EnEV 2016_Abluft_FW_m PV	4,9	2,2	1,7	3,0	0,0	-0,3	11,5
213	EFH E_EnEV 2016_Abluft_Pell_m PV	4,9	2,7	2,0	2,0	0,0	-0,3	11,3
214	EFH E_EnEV 2016_Abluft_WP_m PV	4,9	2,6	1,7	2,0	0,0	-0,2	11,0
215	EFH E_EnEV 2016_Abluft_BZ+G_m PV	4,9	4,0	2,0	2,0	0,0	-0,7	12,2
216	EFH E_KfW 55_Abluft_G+S_m PV	5,3	2,2	1,7	1,6	0,0	-0,2	10,6
217	EFH E_KfW 55_Abluft_FW_m PV	5,3	2,2	1,8	2,3	0,0	-0,3	11,4
218	EFH E_KfW 55_Abluft_Pell_m PV	5,3	2,7	2,1	1,6	0,0	-0,3	11,4
219	EFH E_KfW 55_Abluft_WP_m PV	5,3	2,5	1,8	1,6	0,0	-0,2	11,0
220	EFH E_KfW 55_Abluft_BZ+G_m PV	5,3	4,0	2,1	1,6	0,0	-0,7	12,3
221	EFH E_KfW 40_Abluft_G+S_m PV	5,9	2,2	1,8	1,4	0,0	-0,2	11,1
222	EFH E_KfW 40_Abluft_FW_m PV	5,9	2,2	1,9	2,0	0,0	-0,3	11,8
223	EFH E_KfW 40_Abluft_Pell_m PV	5,9	2,7	2,2	1,5	0,0	-0,3	12,0
224	EFH E_KfW 40_Abluft_WP_m PV	5,9	2,4	1,9	1,5	0,0	-0,2	11,5
225	EFH E_KfW 40_Abluft_BZ+G_m PV	5,9	4,0	2,2	1,4	0,0	-0,7	12,9
226	EFH E_EnEV 2016_m WRG_G+S_m PV	4,9	2,8	1,8	1,9	0,0	-0,2	11,1
227	EFH E_EnEV 2016_m WRG_FW_m PV	4,9	2,8	1,9	2,6	0,0	-0,3	12,0
228	EFH E_EnEV 2016_m WRG_Pell_m PV	4,9	3,3	2,2	1,8	0,0	-0,3	12,0
229	EFH E_EnEV 2016_m WRG_WP_m PV	4,9	3,1	1,9	1,8	0,0	-0,2	11,6
230	EFH E_EnEV 2016_m WRG_BZ+G_m PV	4,9	4,6	2,2	1,7	0,0	-0,6	12,8
231	EFH E_KfW 55_m WRG_G+S_m PV	5,3	2,8	1,9	1,4	0,0	-0,2	11,2
232	EFH E_KfW 55_m WRG_FW_m PV	5,3	2,8	2,0	2,0	0,0	-0,3	11,9
233	EFH E_KfW 55_m WRG_Pell_m PV	5,3	3,3	2,2	1,5	0,0	-0,3	12,2
234	EFH E_KfW 55_m WRG_WP_m PV	5,3	3,0	2,0	1,5	0,0	-0,2	11,5
235	EFH E_KfW 55_m WRG_BZ+G_m PV	5,3	4,6	2,3	1,4	0,0	-0,6	13,0
236	EFH E_KfW 40_m WRG_G+S_m PV	5,9	2,8	2,0	1,3	0,0	-0,2	11,7
237	EFH E_KfW 40_m WRG_FW_m PV	5,9	2,8	2,1	1,7	0,0	-0,3	12,3
238	EFH E_KfW 40_m WRG_Pell_m PV	5,9	3,3	2,4	1,4	0,0	-0,3	12,8
239	EFH E_KfW 40_m WRG_WP_m PV	5,9	3,0	2,1	1,3	0,0	-0,2	12,0
240	EFH E_KfW 40_m WRG_BZ+G_m PV	5,9	4,6	2,4	1,2	0,0	-0,6	13,6

Quelle: Steinbeis-Transferzentrum EGS

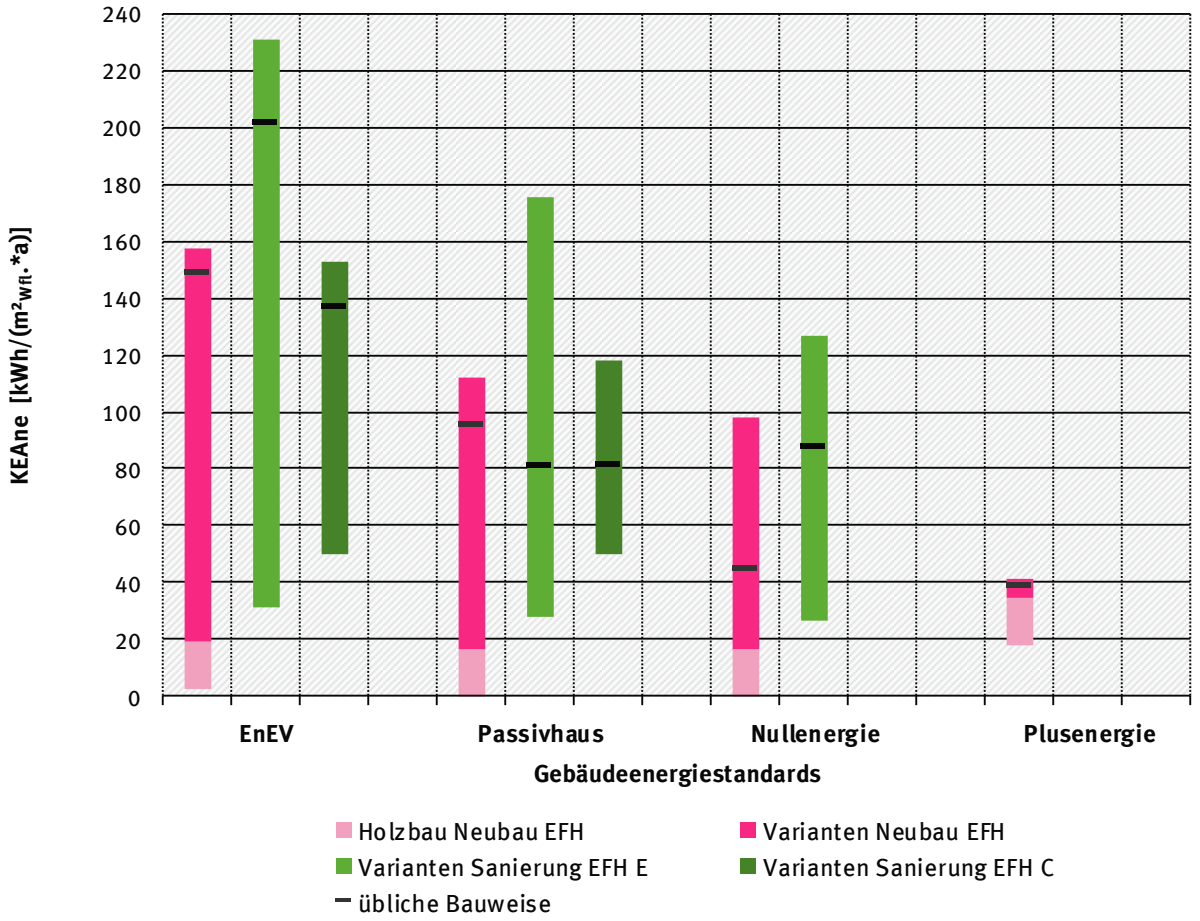
Anhang C: Ökobilanz

Abbildung 71: KEAne der Energiekonzepte Mehrfamilienhaus Neubau und Sanierung



Quelle: Eigene Berechnungen

Abbildung 72: KEAne der Energiekonzepte Einfamilienhaus Neubau und Sanierung



Quelle: Eigene Berechnungen

Tabelle 79: GWP und KEAne der Varianten Neubau MFH

Nr.	Variantenbezeichnung	Treibhaus-potenzial	Nicht erneuerbarer Kumulierter Energiebedarf
		GWP	**KEAne**
[-]	[-]	[kg/a]	[kWh/a]
2	MFH_EnEV 2016_Abluft_FW_o PV	91.396	263.034
3	MFH_EnEV 2016_Abluft_Pell_o PV	51.545	146.377
4	MFH_EnEV 2016_Abluft_WP_o PV	66.999	198.014
5	MFH_EnEV 2016_Abluft_BHKW_o PV	68.201	255.338
6	MFH_KfW 55_Abluft_G+S_o PV	72.835	243.267
7	MFH_KfW 55_Abluft_FW_o PV	82.004	234.342
8	MFH_KfW 55_Abluft_Pell_o PV	50.548	142.512
9	MFH_KfW 55_Abluft_WP_o PV	61.859	179.269
10	MFH_KfW 55_Abluft_BHKW_o PV	63.666	228.349
12	MFH_Passiv_Abluft_FW_o PV	78.422	224.599
13	MFH_Passiv_Abluft_Pell_o PV	50.709	143.874
15	MFH_Passiv_Abluft_BHKW_o PV	62.248	219.433
22	MFH_KfW 55_m WRG_FW_o PV	71.688	203.257
26	MFH_Passiv_m WRG_G+S_o PV	64.111	202.178
27	MFH_Passiv_m WRG_FW_o PV	70.157	201.111
28	MFH_Passiv_m WRG_Pell_o PV	52.732	150.864
29	MFH_Passiv_m WRG_WP_o PV	60.673	177.439
30	MFH_Passiv_m WRG_BHKW_o PV	59.910	197.939
37	MFH_EnEV 2016_Abluft_FW_m PV D	64.639	178.691
38	MFH_EnEV 2016_Abluft_Pell_m PV D	24.788	62.034
39	MFH_EnEV 2016_Abluft_WP_m PV D	40.242	113.671
40	MFH_EnEV 2016_Abluft_BHKW_m PV D	41.444	170.995
41	MFH_KfW 55_Abluft_G+S_m PV D	48.830	167.599
42	MFH_KfW 55_Abluft_FW_m PV D	55.247	149.999
43	MFH_KfW 55_Abluft_Pell_m PV D	23.790	58.169
44	MFH_KfW 55_Abluft_WP_m PV D	35.102	94.926
45	MFH_KfW 55_Abluft_BHKW_m PV D	36.909	144.006
46	MFH_Passiv_Abluft_G+S_m PV D	46.131	155.961
47	MFH_Passiv_Abluft_FW_m PV D	51.665	140.256
48	MFH_Passiv_Abluft_Pell_m PV D	23.952	59.531
49	MFH_Passiv_Abluft_WP_m PV D	35.485	97.958
50	MFH_Passiv_Abluft_BHKW_m PV D	35.491	135.090
56	MFH_KfW 55_m WRG_G+S_m PV D	42.574	137.025
57	MFH_KfW 55_m WRG_FW_m PV D	44.931	118.914
58	MFH_KfW 55_m WRG_Pell_m PV D	25.590	64.602
59	MFH_KfW 55_m WRG_WP_m PV D	35.067	96.060
60	MFH_KfW 55_m WRG_BHKW_m PV D	33.899	119.926
61	MFH_Passiv_m WRG_G+S_m PV D	40.106	126.510
62	MFH_Passiv_m WRG_FW_m PV D	43.400	116.768
63	MFH_Passiv_m WRG_Pell_m PV D	25.975	66.521
64	MFH_Passiv_m WRG_WP_m PV D	33.916	93.096
65	MFH_Passiv_m WRG_BHKW_m PV D	33.153	113.596
84	MFH_Passiv_m WRG_WP_m PV D+F	26.582	69.947
89	MFH_extrem_m WRG_WP_m PV D+F	26.546	65.010
2_FW_reg	MFH_EnEV 2016_Abluft_FW_o PV_F	58.464	168.725
37_FW_reg	MFH_EnEV 2016_Abluft_FW_m PV D_F	31.707	84.382
42_FW_reg	MFH_KfW 55_Abluft_FW_m PV D_F	29.223	75.724
47_FW_reg	MFH_Passiv_Abluft_FW_m PV D_F	28.692	74.833
62_FW_reg	MFH_Passiv_m WRG_FW_m PV D_F	28.883	75.879
84_H	MFH_Passiv_m WRG_WP_m PV D+F_H	15.799	52.439
43_H	MFH_KfW 55_Abluft_Pell_m PV D_H	11.806	35.807
84_a	MFH_autark	45.658	143.825

Quelle: Eigene Berechnungen

Tabelle 80: GWP und KEAne der Neubauvarianten EFH

Nr.	Variantenbezeichnung	Treibhaus-potenzial	Nicht erneuerbarer Kumulierter Energiebedarf
		GWP	**KEAne**
[-]	[-]	[kg/a]	[kWh/a]
92	EFH_EnEV 2016_Abluft_FW_o PV	7.147	21.277
93	EFH_EnEV 2016_Abluft_Pell_o PV	3.713	10.889
94	EFH_EnEV 2016_Abluft_WP_o PV	4.907	15.145
96	EFH_KfW 55_Abluft_G+S_o PV	5.681	20.149
97	EFH_KfW 55_Abluft_FW_o PV	6.247	18.406
98	EFH_KfW 55_Abluft_Pell_o PV	3.548	10.374
99	EFH_KfW 55_Abluft_WP_o PV	4.656	14.423
116	EFH_Passiv_m WRG_G+S_o PV	4.568	15.026
117	EFH_Passiv_m WRG_FW_o PV	4.946	14.269
118	EFH_Passiv_m WRG_Pell_o PV	3.565	10.480
119	EFH_Passiv_m WRG_WP_o PV	4.190	12.935
127	EFH_EnEV 2016_Abluft_FW_m PV D	4.510	12.965
128	EFH_EnEV 2016_Abluft_Pell_m PV D	1.076	2.578
129	EFH_EnEV 2016_Abluft_WP_m PV D	2.270	6.833
131	EFH_KfW 55_Abluft_G+S_m PV D	3.370	12.866
132	EFH_KfW 55_Abluft_FW_m PV D	3.611	10.094
133	EFH_KfW 55_Abluft_Pell_m PV D	911	2.062
134	EFH_KfW 55_Abluft_WP_m PV D	2.019	6.111
135	EFH_KfW 55_Abluft_BZ+G_m PV D	2.238	10.720
136	EFH_Passiv_Abluft_G+S_m PV D	2.863	10.588
137	EFH_Passiv_Abluft_FW_m PV D	3.019	8.226
138	EFH_Passiv_Abluft_Pell_m PV D	879	1.996
139	EFH_Passiv_Abluft_WP_m PV D	1.839	5.591
146	EFH_KfW 55_m WRG_G+S_m PV D	2.744	9.911
147	EFH_KfW 55_m WRG_FW_m PV D	2.875	7.741
148	EFH_KfW 55_m WRG_Pell_m PV D	950	2.201
149	EFH_KfW 55_m WRG_WP_m PV D	1.756	5.253
151	EFH_Passiv_m WRG_G+S_m PV D	2.258	7.743
152	EFH_Passiv_m WRG_FW_m PV D	2.309	5.957
153	EFH_Passiv_m WRG_Pell_m PV D	928	2.168
154	EFH_Passiv_m WRG_WP_m PV D	1.553	4.623
159	EFH_extrem_m WRG_WP_m PV D	1.390	4.101
92_FW_reg	EFH_EnEV 2016_Abluft_FW_o PV_F	4.223	12.500
127_FW_reg	EFH_EnEV 2016_Abluft_FW_m PV D_F	1.587	4.189
132_FW_reg	EFH_KfW 55_Abluft_FW_m PV D_F	1.350	3.448
137_FW_reg	EFH_Passiv_Abluft_FW_m PV D_F	1.174	2.908
152_FW_reg	EFH_Passiv_m WRG_FW_m PV D_F	1.092	2.656
133_H	EFH_KfW 55_Abluft_Pell_m PV D_H	-88	-188
149_H	EFH_KfW 55_m WRG_WP_m PV D_H	757	3.004

Quelle: Steinbeis-Transferzentrum EGS

Tabelle 81: GWP und KEAne der Sanierungsvarianten MFH E

Nr.	Variantenbezeichnung	Treibhaus-potenzial	Nicht erneuerbarer Kumulierter Energiebedarf
		GWP	**KEAne**
[-]	[-]	[kg/a]	[kWh/a]
2	MFH E_EnEV 2016_Abluft_FW_o PV	125.152	384.269
3	MFH E_EnEV 2016_Abluft_Pell_o PV	54.828	176.920
4	MFH E_EnEV 2016_Abluft_WP_o PV	91.088	296.864
5	MFH E_EnEV 2016_Abluft_BHKW_o PV	84.622	366.122
6	MFH E_KfW 55_Abluft_G+S_o PV	90.504	338.446
32	MFH E_EnEV 2016_Abluft_FW_m PV	96.486	293.910
33	MFH E_EnEV 2016_Abluft_Pell_m PV	26.162	86.561
34	MFH E_EnEV 2016_Abluft_WP_m PV	62.422	206.505
35	MFH E_EnEV 2016_Abluft_BHKW_m PV	55.956	275.763
36	MFH E_KfW 55_Abluft_G+S_m PV	65.378	259.242
37	MFH E_KfW 55_Abluft_FW_m PV	78.968	241.181
38	MFH E_KfW 55_Abluft_Pell_m PV	24.252	80.448
39	MFH E_KfW 55_Abluft_WP_m PV	54.808	181.561
40	MFH E_KfW 55_Abluft_BHKW_m PV	47.564	228.789
51	MFH E_KfW 55_m WRG_G+S_m PV	58.413	222.612
52	MFH E_KfW 55_m WRG_FW_m PV	68.944	213.403
53	MFH E_KfW 55_m WRG_Pell_m PV	29.233	97.142
54	MFH E_KfW 55_m WRG_WP_m PV	52.157	173.058
55	MFH E_KfW 55_m WRG_BHKW_m PV	46.020	204.105
56	MFH E_KfW 40_m WRG_G+S_m PV	53.707	202.872
57	MFH E_KfW 40_m WRG_FW_m PV	63.196	196.384
58	MFH E_KfW 40_m WRG_Pell_m PV	28.365	94.570
59	MFH E_KfW 40_m WRG_WP_m PV	49.310	163.952
60	MFH E_KfW 40_m WRG_BHKW_m PV	43.024	188.010
2_FW_reg	MFH E_EnEV 2016_Abluft_FW_o PV_FW	68.240	220.457
32_FW_reg	MFH E_EnEV 2016_Abluft_FW_m PV_FW	39.575	130.098
37_FW_reg	MFH E_KfW 55_Abluft_FW_m PV_FW	34.078	112.238
52_FW_reg	MFH E_KfW 55_m WRG_FW_m PV_FW	36.317	120.032
57_FW_reg	MFH E_KfW 40_m WRG_FW_m PV_FW	34.581	114.646

Quelle: Steinbeis-Transferzentrum EGS

Tabelle 82: GWP und KEAne der Sanierungsvarianten GMH F

Nr.	Variantenbezeichnung	Treibhaus-potenzial	Nicht erneuerbarer Kumulierter Energiebedarf
		GWP	**KEAne**
[-]	[-]	[kg/a]	[kWh/a]
62	GMH F_EnEV 2016_Abluft_FW_o PV	132.895	411.571
63	GMH F_EnEV 2016_Abluft_Pell_o PV	70.936	229.396
64	GMH F_EnEV 2016_Abluft_WP_o PV	103.457	336.996
65	GMH F_EnEV 2016_Abluft_BHKW_o PV	97.416	397.752
66	GMH F_KfW 55_Abluft_G+S_o PV	102.670	372.742
92	GMH F_EnEV 2016_Abluft_FW_m PV	113.779	351.312
93	GMH F_EnEV 2016_Abluft_Pell_m PV	51.826	169.157
94	GMH F_EnEV 2016_Abluft_WP_m PV	84.347	276.758
95	GMH F_EnEV 2016_Abluft_BHKW_m PV	81.374	350.165
96	GMH F_KfW 55_Abluft_G+S_m PV	87.276	324.216
97	GMH F_KfW 55_Abluft_FW_m PV	99.471	308.676
98	GMH F_KfW 55_Abluft_Pell_m PV	50.325	164.340
99	GMH F_KfW 55_Abluft_WP_m PV	76.937	252.433
100	GMH F_KfW 55_Abluft_BHKW_m PV	71.133	296.841
111	GMH F_KfW 55_m WRG_G+S_m PV	80.321	288.619
112	GMH F_KfW 55_m WRG_FW_m PV	89.464	280.692
113	GMH F_KfW 55_m WRG_Pell_m PV	54.513	178.519
114	GMH F_KfW 55_m WRG_WP_m PV	74.961	246.264
115	GMH F_KfW 55_m WRG_BHKW_m PV	69.203	272.193
116	GMH F_KfW 40_m WRG_G+S_m PV	76.643	273.454
117	GMH F_KfW 40_m WRG_FW_m PV	84.725	266.560
118	GMH F_KfW 40_m WRG_Pell_m PV	53.612	175.761
119	GMH F_KfW 40_m WRG_WP_m PV	72.551	238.525
120	GMH F_KfW 40_m WRG_BHKW_m PV	66.638	258.840
62_FW_reg	GMH F_EnEV 2016_Abluft_FW_o PV_FW	82.089	265.490
92_FW_reg	GMH F_EnEV 2016_Abluft_FW_m PV_FW	62.979	205.251
97_FW_reg	GMH F_KfW 55_Abluft_FW_m PV_FW	59.252	193.301
112_FW_reg	GMH F_KfW 55_m WRG_FW_m PV_FW	60.757	198.709
117_FW_reg	GMH F_KfW 40_m WRG_FW_m PV_FW	59.164	193.696

Quelle: Steinbeis-Transferzentrum EGS

Tabelle 83: GWP und KEAne der Sanierungsvarianten EFH C

Nr.	Variantenbezeichnung	Treibhaus-potenzial	Nicht erneuerbarer Kumulierter Energiebedarf
		GWP	**KEAne**
[-]	[-]	[kg/a]	[kWh/a]
122	EFH C_EnEV 2016_Abluft_FW_o PV	13.992	41.982
123	EFH C_EnEV 2016_Abluft_Pell_o PV	5.475	17.638
124	EFH C_EnEV 2016_Abluft_WP_o PV	9.587	31.609
125	EFH C_EnEV 2016_Abluft_BZ+G_o PV	9.833	41.866
126	EFH C_KfW 55_Abluft_G+S_o PV	9.723	37.823
152	EFH C_EnEV 2016_Abluft_FW_m PV	12.753	38.078
153	EFH C_EnEV 2016_Abluft_Pell_m PV	4.236	13.733
154	EFH C_EnEV 2016_Abluft_WP_m PV	8.348	27.704
155	EFH C_EnEV 2016_Abluft_BZ+G_m PV	8.594	37.961
156	EFH C_KfW 55_Abluft_G+S_m PV	9.025	35.623
157	EFH C_KfW 55_Abluft_FW_m PV	10.637	31.787
158	EFH C_KfW 55_Abluft_Pell_m PV	4.005	13.013
159	EFH C_KfW 55_Abluft_WP_m PV	7.288	24.248
160	EFH C_KfW 55_Abluft_BZ+G_m PV	6.929	30.601
171	EFH C_KfW 55_m WRG_G+S_m PV	7.953	30.335
172	EFH C_KfW 55_m WRG_FW_m PV	9.223	27.719
173	EFH C_KfW 55_m WRG_Pell_m PV	4.233	13.784
174	EFH C_KfW 55_m WRG_WP_m PV	6.777	22.580
175	EFH C_KfW 55_m WRG_BZ+G_m PV	6.019	25.721
176	EFH C_KfW 40_m WRG_G+S_m PV	7.217	27.134
177	EFH C_KfW 40_m WRG_FW_m PV	8.322	25.037
178	EFH C_KfW 40_m WRG_Pell_m PV	4.080	13.305
179	EFH C_KfW 40_m WRG_WP_m PV	6.299	21.026
180	EFH C_KfW 40_m WRG_BZ+G_m PV	5.553	23.438
122_FW_reg	EFH C_EnEV 2016_Abluft_FW_o PV_FW	6.680	21.481
152_FW_reg	EFH C_EnEV 2016_Abluft_FW_m PV_FW	5.441	17.576
157_FW_reg	EFH C_KfW 55_Abluft_FW_m PV_FW	4.900	15.854
172_FW_reg	EFH C_KfW 55_m WRG_FW_m PV_FW	4.875	15.809
177_FW_reg	EFH C_KfW 40_m WRG_FW_m PV_FW	4.608	14.964

Quelle: Steinbeis-Transferzentrum EGS

Tabelle 84: GWP und KEAne der Sanierungsvarianten EFH E

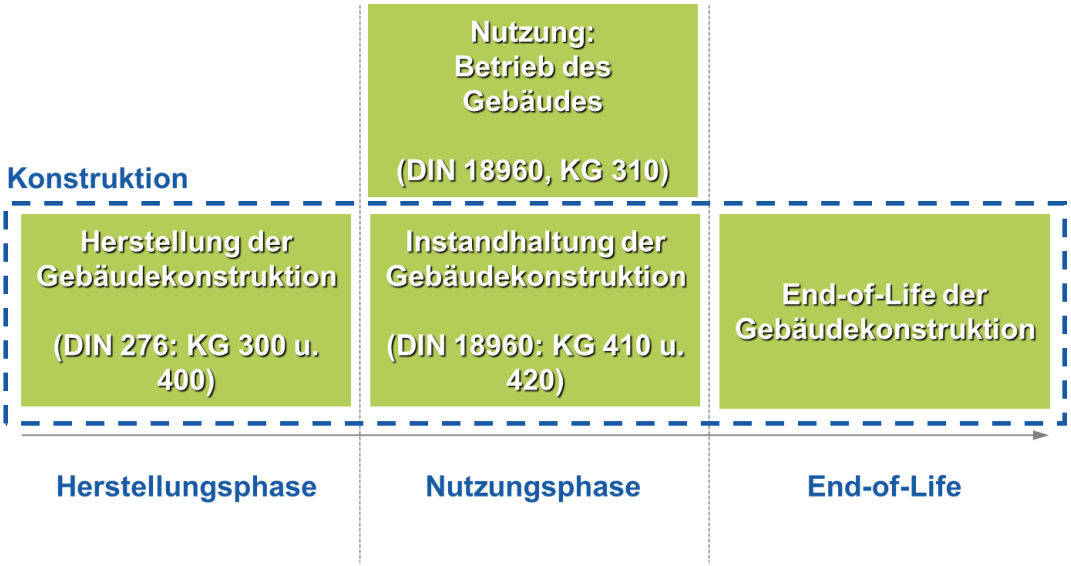
Nr.	Variantenbezeichnung	Treibhaus-potenzial	Nicht erneuerbarer Kumulierter Energiebedarf
		GWP	**KEAne**
[-]	[-]	[kg/a]	[kWh/a]
182	EFH E_EnEV 2016_Abluft_FW_o PV	8.556	25.440
183	EFH E_EnEV 2016_Abluft_Pell_o PV	3.151	10.167
184	EFH E_EnEV 2016_Abluft_WP_o PV	5.730	19.079
185	EFH E_EnEV 2016_Abluft_BZ+G_o PV	5.432	24.328
186	EFH E_KfW 55_Abluft_G+S_o PV	5.671	22.287
212	EFH E_EnEV 2016_Abluft_FW_m PV	6.432	18.747
213	EFH E_EnEV 2016_Abluft_Pell_m PV	1.027	3.474
214	EFH E_EnEV 2016_Abluft_WP_m PV	3.606	12.386
215	EFH E_EnEV 2016_Abluft_BZ+G_m PV	3.309	17.635
216	EFH E_KfW 55_Abluft_G+S_m PV	3.823	16.461
217	EFH E_KfW 55_Abluft_FW_m PV	4.612	13.940
218	EFH E_KfW 55_Abluft_Pell_m PV	850	2.933
219	EFH E_KfW 55_Abluft_WP_m PV	2.789	9.732
220	EFH E_KfW 55_Abluft_BZ+G_m PV	2.147	12.280
231	EFH E_KfW 55_m WRG_G+S_m PV	3.230	13.546
232	EFH E_KfW 55_m WRG_FW_m PV	4.112	11.949
233	EFH E_KfW 55_m WRG_Pell_m PV	913	3.106
234	EFH E_KfW 55_m WRG_WP_m PV	2.551	8.956
235	EFH E_KfW 55_m WRG_BZ+G_m PV	1.832	10.217
236	EFH E_KfW 40_m WRG_G+S_m PV	2.812	11.655
237	EFH E_KfW 40_m WRG_FW_m PV	3.575	10.375
238	EFH E_KfW 40_m WRG_Pell_m PV	888	3.050
239	EFH E_KfW 40_m WRG_WP_m PV	2.309	8.187
240	EFH E_KfW 40_m WRG_BZ+G_m PV	1.532	8.643
182_FW_reg	EFH E_EnEV 2016_Abluft_FW_o PV_FW	3.827	12.300
212_FW_reg	EFH E_EnEV 2016_Abluft_FW_m PV_FW	1.704	5.607
217_FW_reg	EFH E_KfW 55_Abluft_FW_m PV_FW	1.288	4.295
232_FW_reg	EFH E_KfW 55_m WRG_FW_m PV_FW	1.302	4.369
237_FW_reg	EFH E_KfW 40_m WRG_FW_m PV_FW	1.191	4.029

Quelle: Steinbeis-Transferzentrum EGS

Anhang D: Beispielrechnung Ökobilanz

Die Vorgehensweise einer Gebäudeökobilanzberechnung ist allgemein in den Normen EN15978 bzw. in den Nachhaltigkeitsbewertungssystemen DGNB und BNB detailliert beschrieben. Eine Ökobilanz nach Kriterien des BNB und DGNB setzt sich aus der Betrachtung der Lebenszyklusphasen „Herstellung“ (A1-A3), „Instandsetzung“ (B3) und „End-of-Life“ (C3+C4+D) zusammen.

Abbildung 73: Lebenszyklusphasen einer Ökobilanz



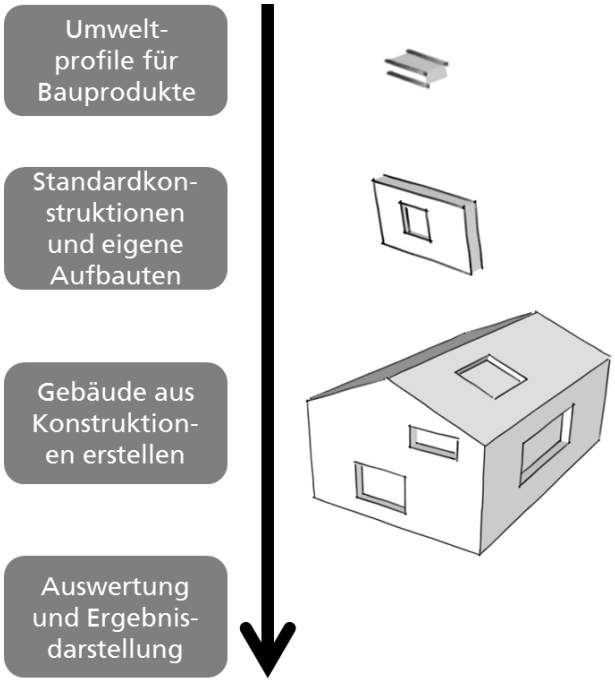
Quelle: Eigene Darstellung

Anhand des Beispiels „Typgebäude Neubau im Plusenergie-Standard“ werden die wichtigsten Bestandteile und Rechenschritte einer Ökobilanz dargestellt.

Herstellung (A1-A3)

In der Herstellung werden die Umweltwirkungen der KG 300 (Baukonstruktionen) und KG 400 (Technische Anlagen) erfasst. Datenbasis der Ökobilanzberechnung bildet die vom BBSR zur Verfügung gestellte ÖKOBAUDAT, eine LCA Datenbank für Baumaterialien und Anlagentechnik. Dort sind generische und teilweise produktspezifische Umweltprofile enthalten. Die Herstellung von 1 m³ Beton weist z.B. ein Umweltprofil von 0,1044 kgCO_2-Ä./kg Beton auf. Diese kleinsten „Legobausteine“ werden zu Konstruktionen (z.B. 1 m² Außenwand) zusammengefügt. Dabei wird die Konstruktion aus einzelnen Schichten mit jeweiligen Schichtdicken, entsprechenden Lebensdauern nach dem Leitfaden Nachhaltiges Bauen und dem EoL Szenario nach Festlegung des eLCA Tools (BBSR) aufgebaut. Diese einzelnen Konstruktionen werden im Anschluss zu über die jeweilige Bezugsgröße des konkreten Gebäudes zusammengesetzt (z.B. 100 m² Außenwand, 200 m² Geschossdecken, etc.).

Abbildung 74: Modellierung eines Gebäudes



Quelle: Eigene Darstellung

Nachfolgend wird die berechnete Umweltwirkung beispielhaft am Bauteilaufbau der Außenwandkonstruktion für das untersuchte Typgebäude dargestellt.

Tabelle 85: Herstellung der Außenwandkonstruktion (AW)

Materialien	Flächengewicht [kg/m² AW]	GWP [kgCO_2-Ä./kg Material]	GWP [kgCO_2-Ä./m²AW]	Anteil [-]
Innenfarbe	0,15	2,84	0,43	‹ 1 %
Normalputz	30,00	0,24	7,26	8 %
Transportbeton	473,00	0,10	49,38	52 %
Bewehrungsstahl	22,00	0,75	16,50	17 %
EPS	6,44	2,40	15,47	16 %
WDVS	12,18	0,49	5,96	6 %
Fassadenfarbe	0,22	1,33	0,29	‹ 1 %
Total	543,99		95,29	100 %

Quelle: Eigene Berechnungen

In der folgenden Tabelle sind die Ergebnisse für die Herstellungsphase zusammengefasst.

Tabelle 86: Aufwand für Herstellung KG 300 und KG 400

Kostengruppe	Bezugsgröße	GWP [kgCO_2-Ä./Bezugsgröße]	GWP [kgCO_2-Ä.]	Anteil [-]
KG 320	477 m²	145,39	69.308	8 %
KG 330	1.328 m²	89,01	118.222	13 %
KG 330 (Fenster)	530 m²	165,80	87.840	10 %
KG 340	2.441 m²	68,94	168.246	19 %
KG 350	2.240 m²	87,30	195.543	22 %
KG 360	561 m²	91,14	51.131	6 %
KG 400 (PV)	66.101 kWh/a	0,05	150.321	17 %
KG 400 (Rest)			48.208	5 %
Total			888.819	100 %

Quelle: Eigene Berechnungen

Instandhaltung

Die Instandhaltung der einzelnen Baumaterialien und Anlagentechnikkomponenten wird nach Formel (1, vgl. EN 15978) auf Basis der spezifischen Lebensdauern nach dem Leitfaden Nachhaltiges Bauen bzw. der VDI 2067 (Anlagentechnik) berechnet.

(1) N_R (j) = E [ReqSL / ESL(j) –1]

Dabei ist

- E [ReqSL/(ESL(j)] die Funktion, nach der auf die ganze Zahl aufgerundet wird
- ESL(j) die voraussichtliche Nutzungsdauer des Produktes j
- N_R(j) die Austauschhäufigkeit für Produkt j
- ReqSL die geforderte Nutzungsdauer des Gebäudes

Nachfolgend wird die Berechnung am Beispiel der Verglasung eines Fensters dargestellt:

- ESL Verglasung: 30 Jahre
- ReqSL: 50 Jahre

(2) N_R Verglasung = Aufrunden (50/30-1) = 1

Das Umweltprofil der Verglasung der Lebenszyklusphase „Instandsetzung“ setzt sich zusammen aus den Aufwänden für die Herstellung (58,64 kg CO_2-Ä./m² Verglasung) und dem Lebensende (0,16 kg CO_2-Ä./m² Verglasung). Insgesamt findet also ein Austausch mit einem Umweltprofil für die Verglasung von 58,8 kg CO_2-Ä./m² statt.

Nutzung

Bei der Berechnung der Umweltwirkungen der Nutzungsphase werden die Werte aus der Energieberechnung mit den Umweltprofilen der jeweiligen verwendeten Energieträger multipliziert. Nachfolgende Tabelle fasst die Berechnung zusammen.

Tabelle 87: Aufwand für Nutzung

Energieträger	Endenergie [kWh/a]	GWP [gCO_2-Ä./kWh]	GWP [$kgCO_2$-Ä./a]	GWP [$kgCO_2$-Ä./(m² Wfl.·a)]
Strombedarf Gebäude	27.242	604,97	16.480	9,52
Strombedarf Nutzer	37.000	604,97	22.384	12,93
Abzug Stromeigennutzung	-24.457	604,97	-14.796	-8,55
Stromeinspeisung PV (Gutschrift Modul D)	-41.644	604,97	-25.193	-14,55

Quelle: Eigene Berechnungen

End-of-Life

Das Lebensende der verwendeten Baumaterialien und Anlagentechnikkomponenten ist in den verwendeten ÖKOBAUDAT Datensätzen bereits hinterlegt. Für mineralische Baustoffe ist dies beispielsweise das EoL-Szenario Landfill. Nachfolgend wird die End-of-Life Berechnung beispielhaft für die Außenwandkonstruktion dargestellt. Modul C beinhaltet dabei die Aufwände für Deponierung bzw. energetische Verwertung/ Recycling. In Modul D wird bei der Außenwandkonstruktion eine Gutschrift für die thermische Verwertung der EPS-Dämmung mit Erzeugung von Strom und Wärme ausgewiesen.

Tabelle 88: End-of-Life der Außenwandkonstruktion (AW)

Materialien	Flächengewicht [kg/m² AW]	GWP Modul C [$kgCO_2$-Ä./kg Material]	GWP Modul D [$kgCO_2$-Ä./kg Material]	GWP gesamt [$kgCO_2$-Ä./m² AW]	Anteil [-]
Innenfarbe	0,15	0,016	0,000	0,00	‹ 1 %
Normalputz	30,00	0,016	0,000	0,48	3 %
Transportbeton	473,00	0,016	0,000	7,63	42 %
Bewehrungsstahl	22,00	0,000	0,000	0,00	‹ 1 %
EPS	6,44	3,313	-1,744	10,10	55 %
WDVS	12,18	0,003	0,000	0,03	‹ 1 %
Fassadenfarbe	0,22	0,016	0,000	0,00	‹ 1 %
Total	543,99			18,25	100 %

Quelle: Eigene Berechnungen

In der nachfolgenden Tabelle sind die Ergebnisse der EoL-Phase des kompletten Gebäudes dargestellt. Modul D umfasst beim Gesamtgebäude die Gutschriften einer energetischen Verwertung (Strom- und Wärmegutschrift) bzw. eines Recyclings (Gutschrift für Stahlschrott). Die Gutschriften der KG 300 kommen hauptsächlich aus der Verbrennung von Kunststoffen und Holzprodukten. Dafür wird eine energetische Gutschrift für Strommix Deutschland und für thermische Energie aus Erdgas gewährt. Die Gutschriften bei der KG 400 kommen hauptsächlich aus dem Recycling der Metalle der Anlagentechnik.

Tabelle 89: End-of-Life KG 300 und KG 400

KG	GWP Modul C [kgCO_2-Ä.]	GWP Modul D [kgCO_2-Ä.]	GWP gesamt [kgCO_2-Ä.]
KG 300	199.432	-87.971	111.461
KG 400	14.063	-17.287	-3.224
Total	213.495	-105.258	108.237

Quelle: Eigene Berechnungen

Zusammenfassung

Die Ergebnisse der betrachteten Lebenszyklusphasen werden als absolutes Treibhauspotenzial für den gesamten Betrachtungszeitraum von 50 Jahren und als spezifische Größen mit Wohnflächenbezug (1.731m²) pro Jahr zusammenfassend dargestellt.

Tabelle 90: Ergebnisse Ökobilanz

Lebenszyklusphase	GWP [kgCO_2-Ä.]	GWP [kgCO_2-Ä./($m^2_{Wfl.}$ ·a)]
Herstellung (A1-A3)	888.819	10,27
Instandsetzung (B3)	387.769	4,48
End-of-Life (C3+C4+D)	108.237	1,26
Summe Konstruktion	1.385.366	16,01
Strombedarf Gebäude	824.021	9,52
Strombedarf Nutzer	1.119.195	12,93
Abzug Stromeigennutzung	-739.788	-8,55
Gutschrift Stromeinspeisung (PV)	-1.259.669	-14,55
Total		15,36

Quelle: Eigene Berechnungen

Anhang E: Fachgespräch

Nach Vorliegen aussagefähiger Zwischenergebnisse für Neubau und Sanierung wurde ein Fachgespräch in den Räumen des Umweltbundesamtes in Berlin durchgeführt. Hierbei wurden die erarbeiteten Ergebnisse einem Fachauditorium von 24 Teilnehmern aus den Bereichen Wohnungsbau, Architektur, technische Planung und dem Forschungsbereich Ökobilanzierung präsentiert. Die sich aus der Fachdiskussion ergebenden Erkenntnisse sind in die weitere Arbeit eingeflossen.

Die Ergebnisse decken sich größtenteils mit den Erfahrungen der Teilnehmer. Detaillierte Fragen zur Ausführung der Gebäudevarianten, zu verwendeten Kostenansätzen und zur Durchführung von Ökobilanzen wurden beantwortet. Im Folgenden werden die Stellungnahmen aufgeführt.

Die Bilanzierung der Energiebedarfe nach EnEV erfolgte nach der Norm DIN V 18599 mit dem Programm Solar Computer, Modul B55 s. hierzu die Angaben in Kapitel 1.3.1. Für die Bewertung des Passivhaus-Standards wurden die Heizwärmebedarfe der Typgebäude zusätzlich mit dem Passivhaus-Projektierungspaket berechnet. Die Kosten für die Wärmeerzeugung wurden für jede Variante (Dämmstandard/ Lüftungsart) separat ausgelegt. Die Kostenansätze unterscheiden sich nicht nur nach Anlagentechnik, sondern auch nach Gebäudeeffizienz und sind daher für ein Gebäude im Passivhaus-Standard niedriger als für ein Gebäude im EnEV-2016-Standard. Die Heizungsübergabeflächen werden nur bei den Wärmepumpenvarianten aufgrund der niedrigeren Vorlauftemperaturen bei Sanierungsvorhaben um 20 % erhöht. Für die Passivhausausführungen wurden praxisnahe Investitions- und Wartungskosten von Techniken und Bauteilausführungen angenommen s. hierzu Angaben in Kap. 1.5.2. In der individuellen Gebäudeplanungspraxis können sowohl höhere als auch niedrigere Kosten für Bauteilausführungen, Wärmeerzeugung und Lüftungsanlagen auftreten. Da nur der Passivhaus-Gebäudeenergiestandard Lüftungsanlagen mit Wärmerückgewinnung fordert, sind deren Investitionskosten und laufenden Kosten für Instandhaltung, Wartung und Betrieb für die Wirtschaftlichkeit von Bedeutung. In Tabelle 91 wird der Kostenansatz der vorliegenden Studie mit einem Kostenansatz eines Teilnehmers aus dem Fachgespräch verglichen und der Einfluss auf die resultierenden Jahresgesamtkosten dargestellt. Der Vergleich wird am Beispiel des Typgebäude Neubau MFH im Passivhaus-Standard mit einer Wärmeversorgung mit Wärmepumpe und Photovoltaikanlage untersucht (vgl. Variante MFH Neubau Nr. 64, Tabelle 73). Durch den geringeren Kostenansatz der Lüftungsanlage mit WRG reduzieren sich die Jahresgesamtkosten des Typgebäudes um 4,5 €/(m²$_{Wfl.}$ ·a).

Tabelle 91: Szenario Kosten Lüftungsanlage mit WRG im Passivhaus am Bespiel Typgebäude MFH Neubau Variante 64

Parameter	Ansatz vorliegende Studie	kostenoptimierter Ansatz gemäß Passivhausplaner
KG 430 Lüftungsanlage mit WRG		
Investitionskosten:	90 €/m² Wfl.	50 €/m² Wfl.
Wartung und Betriebskosten:	1,80 €/(m² Wfl.*a)	1,50 €/(m² Wfl.*a)
Jahresgesamtkosten	120,4 €/(m² Wfl.*a)	115,9 €/(m² Wfl.*a) (- 4 %)

Quelle: Eigene Berechnungen, Kostenangaben netto

Diese Kostenreduktion ist unabhängig von der gewählten Wärmeversorgung und kann daher auf alle Varianten des Neubau MFH mit Lüftungsanlagen mit WRG übertragen werden. Wie Abbildung 14 zeigt, wirkt sich die Integration einer Lüftung mit Wärmerückgewinnung aus energetischer Sicht nur bei fossil dominierter Versorgung positiv aus. Bei einer regenerativen Energieversorgung führt die

Lüftungsanlage mit WRG sogar zu höheren CO_2-Emissionen. Eine Kostenreduktion von Lüftungsanlagen mit WRG und ein verbreiteter Einsatz wirkt sich demnach je Wärmeversorgungskonzept energetisch positiv oder negativ aus. An den Gesamtaussagen des Vorhabens hat dies keine Auswirkungen auf die im Bericht dargestellten Ergebnisse hat dies keinen Einfluss.

Der Aufwand für eine Stromnetz-Infrastruktur außerhalb des Gebäudes wird sowohl kostenseitig als auch im Rahmen der Ökobilanzierung nicht berücksichtigt.

Wunsch seitens der Teilnehmer war es, die Methode der Ökobilanzierung für eine breite Anwendung zu vereinfachen. In diesem Zusammenhang wird auf das Folgevorhaben im Auftrag des BBSR (Vgl. BBSR 20158) verwiesen.

Der in dieser Studie verwendete PV-Datensatz beruht auf dem in der ÖKOBAUDAT 2016 vom BBSR veröffentlichten durchschnittlichen PV-Datensatz. Dieser Datensatz repräsentiert den Lebenszyklus einer installierten Photovoltaikanlage mit Modul, Verkabelung, Befestigungsmittel und Wechselrichter bezogen auf 1 m² Fläche. Die Anteile der verschiedenen PV-Techniken sind monokristalline Siliciumzellen 47,7%, polykristalline Siliciumzellen 38,3%, Cadmium-Tellurid (CdTe) 6,4%, amorphes Silicium 5,1%, Ribbon-Silicium 1,5 % und Kupfer-Indium-Gallium-Diselenid 1,0 %. Der Datensatz wurde ursprünglich im europäischen Projekt SENSE (Sustainability evaluation of solar energy systems; http://cordis.europa.eu/project/rcn/67931_en.html) erarbeitet, zu einem Mischdatensatz aggregiert und aktualisiert. Um innerhalb der Studie technikspezifische Werte für polykristalline Photovoltaik auszuweisen, wurde das Planmodel des parametrisierten Mischdatensatzes wieder in die einzelnen PV-Techniken unterteilt. Bezüglich der Beschreibung der Systemgrenzen und Rahmenbedingungen wird neben der Dokumentation innerhalb des Ökobau.dat Datensatzes „Photovoltaiksystem 1200 kWh/m²·a“ auf folgende Quellen verwiesen: Held/Albrecht 2008, Held 2009, Held 2010, Lozanovski/ Held 2010, Held 2011.