

# Schlussbericht

## zum Vorhaben

Thema:

**Ökobilanzielle und ökonomische Analyse von Wärmebereitstellungstechnologien für Gebäude (OekoWG)**

Zuwendungsempfänger:

**Technische Universität München – Professur für Regenerative Energiesysteme**

Förderkennzeichen:

**2219NR161**

Laufzeit:

**01.02.2020 bis 30.09.2023**

Monat der Erstellung:

**10/2023**

Gefördert durch:



**Bundesministerium  
für Ernährung  
und Landwirtschaft**

**aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages**

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages mit Mitteln des Bundesministeriums für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) über die Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR) als Projektträger des BMEL für das Förderprogramm Nachwachsende Rohstoffe unterstützt. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei der Autorenschaft.

# Inhaltsverzeichnis

<b>Abbildungsverzeichnis .....</b>	<b>IV</b>
<b>Tabellenverzeichnis.....</b>	<b>VI</b>
<b>I. Kurzbericht.....</b>	<b>1</b>
1. Aufgabenstellung.....	1
2. Planung und Ablauf des Vorhabens.....	1
3. Resümee der wesentlichen Ergebnisse .....	2
a) Arbeitspakete und Meilensteine.....	2
b) Zusammenfassung .....	3
<b>II. Ausführliche Darstellung der Ergebnisse.....</b>	<b>4</b>
1. Erzielte Ergebnisse .....	4
Arbeitspaket 1: Gebäudespezifische Auslegung der Heizungssysteme .....	4
a) Beispielgebäude und Energiebedarfe.....	4
b) Heizungssysteme und Energieverbräuche .....	8
Arbeitspaket 2: Ökonomische Bewertung .....	13
a) Methode der ökonomischen Bewertung .....	13
b) Ergebnisse der Wirtschaftlichkeitsberechnungen.....	15
c) Sensitivitätsanalyse .....	17
Arbeitspaket 3: Massen und Energiebilanzen .....	19
Arbeitspaket 4: Ökobilanz und Sensitivitätsanalyse.....	19
a) Methode der ökologischen Bewertung .....	19
b) Definition von Ziel und Untersuchungsrahmen.....	20
c) Sachbilanz.....	21
d) Wirkungsabschätzung und Auswertung der Ökobilanz für das Einfamilienhaus .....	25
e) Wirkungsabschätzung und Auswertung der Ökobilanz für das Mehrfamilienhaus .....	27
Arbeitspaket 5: Ökoeffizienz und dynamische Ökobilanz .....	28
a) Dynamische Ökobilanzierung .....	28
b) Ergebnisse der dynamischen Ökobilanzierung des Einfamilienhauses .....	29
c) Ergebnisse der dynamischen Ökobilanzierung des Mehrfamilienhauses .....	33
d) Methode der Ökoeffizienzanalyse .....	37
e) Ökoeffizienzergebnisse des Einfamilienhauses .....	37
f) Ökoeffizienzergebnisse des Mehrfamilienhauses .....	39
2. Verwertung .....	41
a) Erfindungen/Schutzrechtsanmeldungen.....	41
b) Wirtschaftliche Erfolgsaussichten nach Projektende .....	41
c) Wissenschaftliche und/oder technische Erfolgsaussichten nach Projektende .....	41
d) Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit .....	41

3. Erkenntnisse von Dritten .....	42
4. Veröffentlichungen .....	42
<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>44</b>

# Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Klimadaten für den Standort München .....	4
Abbildung 2: Referenz-Einfamilienhaus (südliche Ansicht).....	5
Abbildung 3: Tägliches Belegungsprofil und interne Wärmegewinne des Einfamilienhauses .....	6
Abbildung 4: Heizlastgang des Einfamilienhauses (links) und des Mehrfamilienhauses (rechts) .....	7
Abbildung 5: Monatlicher Wärmebedarf für Warmwasser und Raumwärme des Einfamilienhauses (links) und des Mehrfamilienhauses (rechts).....	7
Abbildung 6: Polysun Simulationsansicht des Systems WP_Sonde PV .....	10
Abbildung 7: PV-Strom Erzeugung (linke Säule) und Verwendung (rechte Säule) des Systems WP_Luft PV im Einfamilienhaus.....	12
Abbildung 8: Ergebnisse der Wirtschaftlichkeitsberechnungen der untersuchten Heizungssysteme des Einfamilienhauses.....	16
Abbildung 9: Ergebnisse der Wirtschaftlichkeitsberechnungen der untersuchten Heizungssysteme des Mehrfamilienhauses.....	16
Abbildung 10: Ergebnisse der Wirtschaftlichkeitsberechnungen der untersuchten Heizungssysteme des Einfamilienhauses mit Fehlerindikatoren .....	18
Abbildung 11: Ergebnisse der Wirtschaftlichkeitsberechnungen der untersuchten Heizungssysteme des Mehrfamilienhauses mit Fehlerindikatoren.....	18
Abbildung 12: Vier Phasen der Ökobilanzierung sowie Interkonnektivität der verschiedenen Phasen nach DIN EN ISO 14040.....	19
Abbildung 13: Systemgrenzen des Systems Pellet mST .....	20
Abbildung 14: Zusammensetzung des in der ökologischen Bewertung verwendeten Strommixes für Deutschland.....	23
Abbildung 15: Single-Score Ergebnisse der Heizungssysteme des Einfamilienhauses, aufgeschlüsselt nach dem Beitrag der Wirkungskategorien .....	26
Abbildung 16: Single-Score Ergebnisse der Heizungssysteme des Einfamilienhauses, aufgeschlüsselt nach dem Beitrag der Lebenszyklusphasen .....	26
Abbildung 17: Single-Score Ergebnisse der Heizungssysteme des Mehrfamilienhauses, aufgeschlüsselt nach dem Beitrag der Wirkungskategorien .....	27
Abbildung 18: Single-Score Ergebnisse der Heizungssysteme des Mehrfamilienhauses, aufgeschlüsselt nach dem Beitrag der Lebenszyklusphasen .....	28
Abbildung 19: Stromzusammensetzung des dynamischen Ökobilanzmodells .....	29
Abbildung 20: Statische versus dynamische Ökobilanzergebnisse der Wärmepumpensysteme des Einfamilienhauses.....	29
Abbildung 21: Single-Score Ergebnisse der dynamischen Ökobilanzierung der Heizungssysteme des Einfamilienhauses, aufgeschlüsselt nach dem Beitrag der Wirkungskategorien .....	30

Abbildung 22: Single-Score Ergebnisse der dynamischen Ökobilanzierung der Heizungssysteme des Einfamilienhauses, aufgeschlüsselt nach dem Beitrag der Lebenszyklusphase .....	31
Abbildung 23: Treibhausgasemissionen der Heizsysteme des Einfamilienhauses .....	31
Abbildung 24: Feinstaubemissionen der Heizsysteme des Einfamilienhauses .....	32
Abbildung 25: Ressourcenverbrauch von Mineralien und Metallen der Heizsysteme des Einfamilienhauses	33
Abbildung 26: Single-Score Ergebnisse der dynamischen Ökobilanzierung der Heizungssysteme des Mehrfamilienhauses, aufgeschlüsselt nach dem Beitrag der Wirkungskategorien.....	34
Abbildung 27: Single-Score Ergebnisse der dynamischen Ökobilanzierung der Heizungssysteme des Mehrfamilienhauses, aufgeschlüsselt nach dem Beitrag der Lebenszyklusphasen .....	34
Abbildung 28: Treibhausgasemissionen der Heizsysteme des Mehrfamilienhauses .....	35
Abbildung 29: Feinstaubemissionen der Heizsysteme des Mehrfamilienhauses .....	36
Abbildung 30: Ressourcenverbrauch von Mineralien und Metallen der Heizsysteme des Mehrfamilienhauses .....	36
Abbildung 31: Schematischer Aufbau und Ablauf einer Ökoeffizienzbewertung nach DIN EN ISO 14045 ....	37
Abbildung 32: Ökoeffizienzportfolio für die Heizsysteme des Einfamilienhauses.....	38
Abbildung 33: Ökoeffizienzportfolio für die Heizsysteme des Einfamilienhauses mit Unsicherheiten .....	39
Abbildung 34: Ökoeffizienzportfolio für die Heizsysteme des Mehrfamilienhauses .....	39
Abbildung 35: Ökoeffizienzportfolio für die Heizsysteme des Mehrfamilienhauses mit Unsicherheiten .....	40

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Schichtaufbau der Bauelemente der Modellgebäude (Dott et al. 2013; Heimrath und Haller 2007)	5
Tabelle 2: Ergebnisse der Heizlastberechnung nach DIN EN 12831	8
Tabelle 3: Übersicht der betrachteten Heizungssysteme und der jeweiligen berücksichtigten Komponenten	8
Tabelle 4: Eigenschaften der betrachteten Wärmeerzeuger des Einfamilienhauses und des Mehrfamilienhauses	11
Tabelle 5: Ergebnisse der Anlagensimulation beider Modellgebäude	11
Tabelle 6: Ergebnisse der PV-Simulationen	12
Tabelle 7: Rechnerische Nutzungsdauern sowie Aufwendungen für Instandsetzung, Wartung und Inspektion der berücksichtigten Komponenten (VDI 2012)	13
Tabelle 8: Kapitalgebundene Kosten der untersuchten Heizsysteme; die allozierten, tatsächlich anrechenbaren Investitionskosten der Systeme mit PV-Anlage und des Blockheizkraftwerkes werden in Klammern dargestellt	15
Tabelle 9: Energiepreise der jeweiligen Energieträger mit dazugehörigen Preisänderungsraten	15
Tabelle 10: Parametervariationen im Best-Case- und Worst-Case-Szenario	17
Tabelle 11: Wirkungskategorien der EF 3.1 Methode mit dazugehörigen Normalisierungs- und Gewichtungsfaktoren	21
Tabelle 12: Verwendete Sachbilanzdaten für die Herstellung der Anlagenkomponenten	22
Tabelle 13: Verbrennungsemissionen der Heizkessel pro MJ Brennstoffeinsatz	23
Tabelle 14: ecoinvent-Datensätze, die zur Modellierung der Stromversorgung verwendet werden, mit den entsprechenden Anteilen der Energieumwandlungstechnologien	24
Tabelle 15: Übersicht der angenommenen Recyclingraten inklusiver Verwertungsmethoden des nicht-recyclen Anteils	25

# **I. Kurzbericht**

## **1. Aufgabenstellung**

Wärme ist mit einem Anteil von 90% des Endenergiebedarfs die wichtigste Energieform des deutschen Haushaltssektors. Aufgrund der starken Abhängigkeit von fossilen Brennstoffen verursachen die Emissionen aus Heizungsanlagen einen erheblichen Teil der anthropogenen Umweltbelastung. So werden 13% der gesamten Treibhausgasemissionen durch den Wohnungssektor verursacht. Um die deutschen CO<sub>2</sub>-Reduktionsziele von 80-95% bis 2050 zu erreichen, ist es daher entscheidend, die Wärmeversorgung auf erneuerbare Energien umzustellen. Doch auch erneuerbare Systeme zur Wärmebereitstellung weisen unterschiedliche Potentiale zur Reduktion der Treibhausgasemissionen auf. Aufgrund dessen liegt das Ziel des Forschungsvorhabens darin, belastbare sowie vergleichbare Informationen der Umweltauswirkungen verschiedener Heizungssysteme und damit deren Potentiale zur Reduktion der Umweltbelastungen zu bewerten. Eine belastbare und weitverbreitete Methodik zur Quantifizierung der Umweltbelastungen von Technologien über deren gesamten Lebensweg hinweg ist die Ökobilanzmethode. Anhand dieser Methode können neben den Auswirkungen einer Technologie auf den Klimawandel auch potenzielle Auswirkungen auf weitere Kategorien, wie beispielsweise die Freisetzung von Feinstaub und die Nutzung von mineralischen und metallischen Ressourcen, analysiert werden. Neben den ökologischen Aspekten werden auch die ökonomischen Auswirkungen verschiedener Heizungssysteme evaluiert. Die Verbindung der ökologischen und der ökonomischen Ergebnisse wird mittels der Ökoeffizienzmethode hergestellt. Zur Bewertung der Systeme werden zwei unterschiedliche Gebäudetypen exemplarisch herangezogen: ein Einfamilienhaus und ein Mehrfamilienhaus. Letztlich ergibt sich somit ein Gesamtbild darüber, welches Heizungssystem für welchen Gebäudetyp die ökologisch optimale, die ökonomisch optimale sowie die ökoeffizienteste Lösung darstellt.

## **2. Planung und Ablauf des Vorhabens**

Das Projekt ist zum Februar 2020 mit einer geplanten Projektlaufzeit von 36 Monaten gestartet. Aufgrund der kurz darauf herrschenden Covid-19-Pandemie und den damit einhergehenden Einschränkungen verzögerten das Voranschreiten im Projekt vor allem in der initialen Projektphase. Jedoch konnten diese Verzögerungen durch eine kostenneutrale Verlängerung des Projektes um 8 Monate kompensiert werden und alle Projektziele erreicht werden.

Arbeitspaket 1 diente der Auswahl geeigneter Beispielgebäude und der anschließenden dynamischen Gebäude- sowie Anlagensimulation. Durch Corona-bedingte Restriktionen kam es in diesem Arbeitspaket zu geringfügigen Verzögerungen, die sich gleichzeitig auf den Fortschritt im Arbeitspaket 2 auswirkten. Arbeitspaket 2 widmete sich den Wirtschaftlichkeitsberechnungen und war damit zur Fertigstellung auf die Ergebnisse aus Arbeitspaket 1 angewiesen. Diese (extern bedingten) Verzögerungen in AP1 und AP2 wurden allerdings dafür genutzt, um frühzeitig mit dem Arbeitspaket 3 zu beginnen. Der erste Meilenstein wurde schließlich im Mai 2021 und damit 4 Monate später als geplant erreicht.

Im weiteren Ablauf kam es dennoch zu Verzögerungen im Arbeitspaket 3, da die Erstellung der Massenbilanzen aufgrund der Covid-19-Pandemie und der dadurch erschwerten Kontaktaufnahme zu Anlagenherstellern nur eingeschränkt durchgeführt werden konnte. Mit Hilfe einer aufwendigen Daten- und Literaturrecherche konnten diese entstandenen Lücken geschlossen werden. Jedoch konnte der zweite Meilenstein erst im Juli 2022 erreicht werden. Alle weiteren Arbeitspakete konnten ohne Komplikationen mit den vorgesehenen Arbeitsmonaten erfolgreich bearbeitet werden. Meilenstein 3 wurde im Februar 2023 und Meilenstein 4 im September 2023 erreicht. An dieser Stelle ist zu erwähnen, dass eine ständige Anpassung der Ergebnisse der Arbeitspakete erfolgte. Beispielsweise wurden die Parameter der ökonomischen Bewertung angepasst, da sich im Projektverlauf die Rahmenbedingungen, wie beispielsweise die Energiepreise, stark verändert haben.

### 3. Resümee der wesentlichen Ergebnisse

#### a) Arbeitspakete und Meilensteine

Arbeitspakete (AP) (lt. Planung im Antrag)	Bearbeitungszeitraum (lt. Balkenplan im Antrag)	Zielerreichung
AP 1 Gebäudespezifische Auslegung der Heizungssysteme	02/2020 bis 10/2020	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Beispielgebäude identifiziert und charakterisiert</li> <li>• Kombinationsmöglichkeiten der Heizungsanlagen untersucht</li> <li>• Heizungssysteme ausgelegt</li> </ul>
AP 2 Ökonomische Bewertung	05/2020 bis 01/2021	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Wirtschaftlichkeitsberechnungen für die betrachteten Anlagen durchgeführt</li> </ul>
AP 3 Massen- und Energiebilanzen	11/2020 bis 01/2022	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Funktionelle Einheit und Systemgrenzen definiert</li> <li>• Energiebilanzen der Anlagen erstellt</li> <li>• Massenbilanzen erstellt</li> </ul>
AP 4 Ökobilanz und Sensitivitätsanalyse	05/2021 bis 07/2022	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sachbilanzen in Software implementiert</li> <li>• Heizungssysteme anhand der Ökobilanzen bewertet</li> <li>• Sensitivitätsanalysen durchgeführt</li> </ul>
AP 5 Ökoeffizienz und dynamische Ökobilanz	05/2022 bis 01/2023	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Dynamische Ökobilanzmodelle erstellt</li> <li>• Ökoeffizienzen berechnet</li> <li>• Heizungssysteme nach Ökoeffizienz bewertet</li> </ul>
AP 5 Dokumentation, Organisation und Veröffentlichung	11/2020 bis 01/2023	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Zwischenberichte verfasst</li> <li>• Ergebnisse auf Konferenzen vorgestellt</li> <li>• Ergebnisse in internationalen Journals veröffentlicht</li> <li>• Abschlussbericht verfasst</li> </ul>

Meilensteine (M) (lt. Planung im Antrag)	Fälligkeit (lt. Balkenplan im Antrag)	Zielerreichung
M 1 Identifikation und Simulation der Heizungssysteme abgeschlossen, Ökonomische Bewertung der Heizungssysteme	01/2021	In 05/2021 erreicht
M 2 Erstellung der Massen- und Energiebilanzen abgeschlossen	01/2022	In 07/2022 erreicht
M 3 Ökobilanzierung erstellt, Auswertung der Ökobilanzen, Sensitivitätsanalysen abgeschlossen	07/2022	In 02/2023 erreicht
M 4 Dokumentation der Ergebnisse, Zusammenführung von ökologischen und ökonomischen Ergebnissen abgeschlossen, dynamische Ökobilanz ausgewertet	01/2023	In 09/2023 erreicht

## **b) Zusammenfassung**

Zur ökologischen und ökonomischen Bewertung der Systeme werden zwei unterschiedliche Gebäudetypen herangezogen: ein Einfamilienhaus und ein Mehrfamilienhaus, welche den heutigen Standards für Neubauten entsprechen. Für das Einfamilienhaus werden insgesamt 13 Heizsysteme analysiert. Dies umfasst zum einen ein Erdgas-Brennwertgerät, einen Pelletkessel und einen Scheitholzvergaserkessel. Diese Heizungen werden jeweils auch in Kombination mit einer Solarthermieanlage bewertet. Zum anderen werden eine Luft-Wasser-Wärmepumpe, eine Sole-Wasser-Wärmepumpe und eine Wasser-Wasser-Wärmepumpe, jeweils alleinstehend und in Kombination mit einer PV-Anlage untersucht. Des Weiteren erfolgt noch die Bewertung einer Sole-Wasser-Wärmepumpe mit Eisspeichersystem. Für das Mehrfamilienhaus werden die gleichen Systeme wie beim Einfamilienhaus betrachtet. Jedoch werden noch 3 weitere Systeme untersucht: eine Hackschnitzelheizung mit und ohne Solarthermieanlage sowie ein Blockheizkraftwerk.

Im Rahmen der ökonomischen Untersuchungen werden die Heizungssysteme hinsichtlich ihrer Wirtschaftlichkeit bewertet. In beiden Modellgebäuden sind die Pelletheizung mit Solarthermie und das Eisspeicher-Wärmepumpensystem mit den höchsten Kosten verbunden. Demgegenüber sind die Luftwärmepumpen in beiden Fällen am wirtschaftlichsten. Während die Gasheizungen im Einfamilienhaus mit zu den günstigsten Systemen zählen, gehören sie beim Mehrfamilienhaus zu den Optionen mit höheren Kosten. Für das Mehrfamilienhaus sind die geringsten Kosten mit dem Scheitholzvergaser verbunden. Es ist jedoch zu beachten, dass sich für beide Modellgebäude die jeweiligen Kosten der Heizungssysteme nur geringfügig unterscheiden. Im Rahmen einer Sensitivitätsanalyse wird daher der Einfluss veränderter Rahmenbedingungen aufgezeigt. Dabei wird deutlich, dass die Kosten der Heizsysteme je nach Szenario großen Bandbreiten unterworfen sind, sodass Aussagen über die generelle Wirtschaftlichkeit der jeweiligen Heizungen kaum möglich sind.

Zur Quantifizierung der Umweltbelastungen wird die Ökobilanzmethode verwendet. Für jedes System werden die Umweltbelastungen für insgesamt 16 Wirkungskategorien berechnet. Da für die spätere Ökoeffizienzanalyse die Umweltbewertung der Heizungssysteme anhand eines Indikators erfolgen muss, werden die Ergebnisse mit Hilfe von Normierungs- und Gewichtungsfaktoren in einem Single-Score zusammengefasst. Unter der Annahme einer nachhaltigen Bereitstellung der biomassebasierten Brennstoffe, sind die Biomasseheizungen mit den geringsten Umweltauswirkungen verbunden. Demgegenüber geht mit den Gasheizungssystemen eine hohe Umweltbelastung einher. Unter den Wärmepumpensystemen weist die Grundwasserwärmepumpe die geringsten Umweltauswirkungen auf. Bei allen Wärmepumpensystemen führt die Kombination mit einer PV-Anlage zu einer Reduzierung der Umweltbelastung.

Im Rahmen einer Ökoeffizienzbewertung werden die ökologischen und ökonomischen Aspekte in einer Kennzahl verbunden. Für das Einfamilienhaus stellen die Luft-Wasser-Wärmepumpe sowohl mit als auch ohne PV-Anlage sowie das Heizsystem mit Scheitholzvergaser die ökoeffizientesten Systeme dar. Demgegenüber weisen das Eisspeicher-Wärmepumpensystem und die Pelletheizung mit solarer Heizungsunterstützung die geringste Ökoeffizienz auf. Die Scheitholzvergaserheizung ist auch im Mehrfamilienhaus zusammen mit der Sole-Wasser-Wärmepumpe mit PV und der Wasser-Wasser-Wärmepumpe mit PV am ökoeffizientesten. Demgegenüber haben das Blockheizkraftwerk sowie die beiden Systeme mit Gasheizung die geringste Ökoeffizienz.

## II. Ausführliche Darstellung der Ergebnisse

### 1. Erzielte Ergebnisse

#### Arbeitspaket 1: Gebäudespezifische Auslegung der Heizungssysteme

Ein Großteil der Emissionen von Heizungssystemen werden während der Nutzungsphase freigesetzt, weshalb die energetische Effizienz der Systeme einen großen Einflussfaktor darstellt. Daher wurden zunächst mit Hilfe der Software TRNSYS 18 thermisch dynamische Gebäudesimulationen der beiden Modellgebäude durchgeführt (Thermal Energy System Specialists). Die mit TRNSYS erzeugten stündlich aufgelösten Lastprofile wurden anschließend für die dynamische Anlagensimulation der betrachteten Heizsysteme an die Simulationssoftware Polysun übertragen (Vela Solaris AG).

##### a) Beispielgebäude und Energiebedarfe

Die betrachteten Modellgebäude entsprechen den heutigen Standards für Neubauten und repräsentieren ein freistehendes Einfamilienhaus (EFH) sowie ein Mehrfamilienhaus (MFH). Für die thermische Gebäudesimulation wurden die klimatischen Bedingungen des Standortes München berücksichtigt. Abbildung 1 zeigt die Klimadaten (Stunden-, Monats- und Jahresmittel der Außentemperatur sowie die Globalstrahlung) für den betrachteten Standort. Zur Berechnung wurde die Klimadatenbank Meteonorm verwendet.

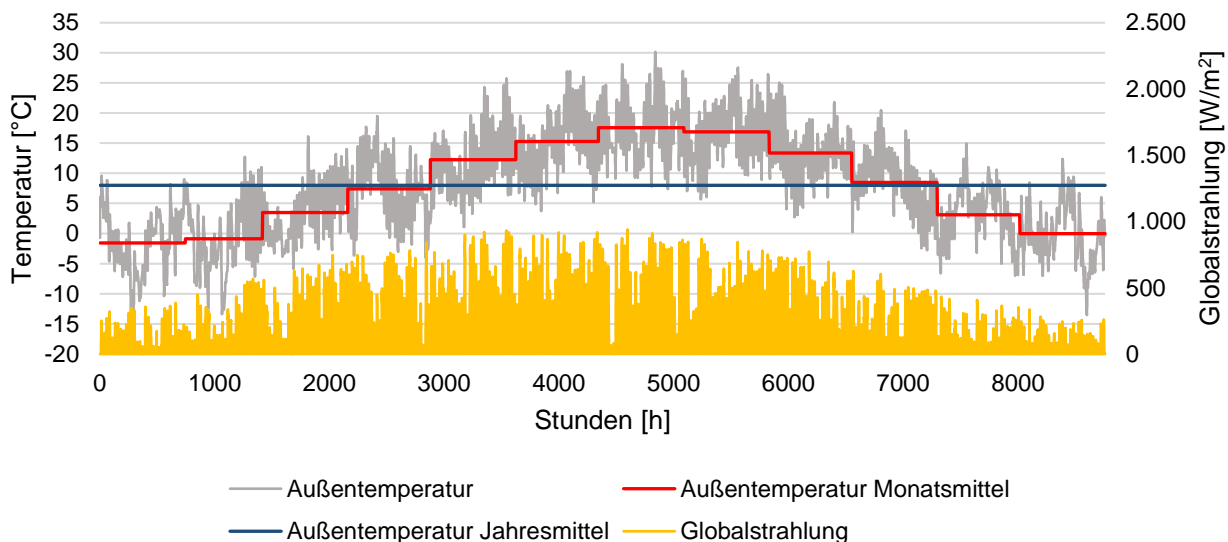


Abbildung 1: Klimadaten für den Standort München

Der Heizwärmebedarf der Gebäude ist neben den klimatischen Bedingungen maßgeblich von den Gebäudeeigenschaften, wie Geometrie, Wärmedurchgangskoeffizienten, Ausrichtung und Hüllflächen abhängig.

Das zweigeschossige EFH repräsentiert ein typisches europäisches Gebäude mit Satteldach mit einer Dachneigung von 30° (Abbildung 2). Basierend auf der durchschnittlichen Wohnfläche pro Person in Deutschland von 47,4 m<sup>2</sup> und einem Vier-Personen-Haushalt, beträgt die gesamte Wohnfläche des Gebäudes 190 m<sup>2</sup> mit einer Grundfläche von 11,9 m auf 8 m (Statistisches Bundesamt 2021). Die verglaste Fläche an den Südfassaden beträgt 25 % der Fassadenfläche, 10 % an der Ost- und Westfassade und 6 % an der Nordfassade. Beide Geschosse werden als eine gemeinsame thermische Zone simuliert. Für das MFH wird angenommen, dass 12 Personen darin leben. Entsprechend der durchschnittlichen Wohnfläche pro Person hat das Gebäude 571 m<sup>2</sup> Wohnfläche. Die Grundfläche des dreigeschossigen Gebäudes beträgt 16,8 m auf 11,3 m. Die Annahmen zu Dachneigung und Fensterflächenanteil sind mit denen des EFHs identisch.

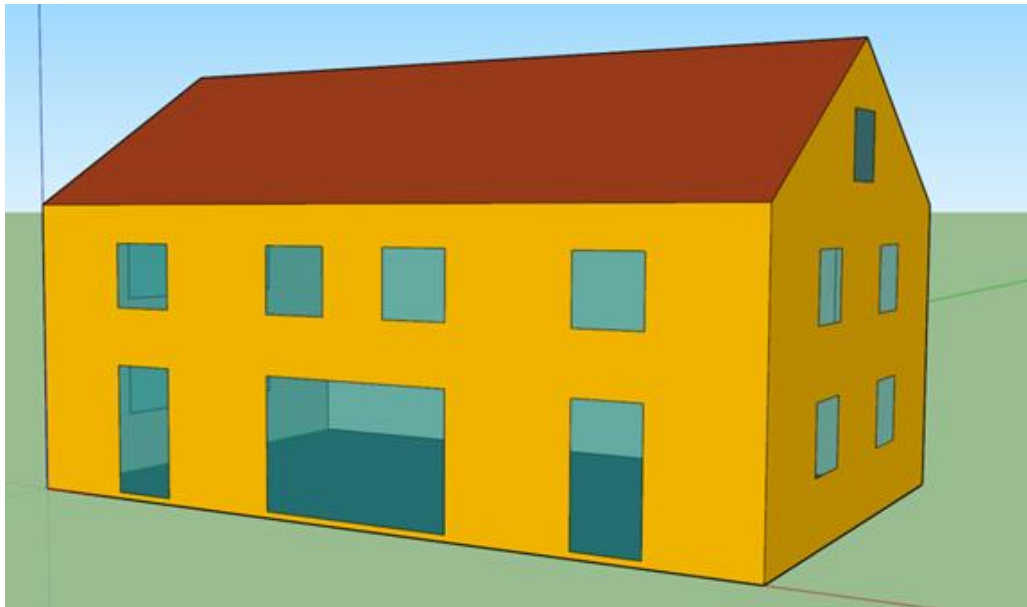


Abbildung 2: Referenz-Einfamilienhaus (südliche Ansicht)

Die Daten zu den verwendeten Materialien, den thermischen Eigenschaften und dem Wandaufbau basieren auf dem Referenzgebäudemodell des IEA SHC (International Energy Agency Solar Heating and Cooling Programme) Projektes 44 und sind in Tabelle 1 aufgeführt (Dott et al. 2013). Anhand dieser Daten wurde sowohl für das EFH als auch für das MFH ein detailliertes Gebäudemodell mit Hilfe des TRNSYS Types 56 entwickelt (TRANSSOLAR Energietechnik GmbH 2021).

Tabelle 1: Schichtaufbau der Bauelemente der Modellgebäude (Dott et al. 2013; Heimrath und Haller 2007)

Bauteil	Schicht	Schichtdicke [m]	Dichte [kg/m <sup>3</sup> ]	Wärmeleitfähigkeit [W/mK]	Kapazität [kJ/kgK]	U-Wert
Außenwand	Gips innen	0,015	1200	0,600	1,00	0,182
	Ziegel	0,021	1380	0,700	1,00	
	EPS	0,200	17	0,040	0,70	
	Gips außen	0,003	1800	0,700	1,00	
Boden Erdgeschoss	Holz	0,015	600	0,150	2,50	0,134
	Estrich	0,080	2000	1400	1,00	
	Beton	0,150	2000	1,330	1,08	
	XPS	0,220	38	0,037	1,45	
Dach	Gipsplatten	0,025	900	0,211	1,00	0,161
	Sperrholz	0,015	300	0,081	2,50	
	Steinwolle	0,200	60	0,036	1,03	
	Sperrholz	0,015	300	0,081	2,50	
Fenster						0,903
Türe						1,300

Die Annahmen zur Luftwechselrate, zur Verschattung der Gebäude und deren Steuerung sowie zu internen Wärmegewinnen wurden ebenfalls aus den Referenzgebäudemodellen der IEA Projekte 44, 32 und 26 übernommen (Dott et al. 2013; Heimrath und Haller 2007; Streicher und Heimrath 2003).

Das Diagramm in Abbildung 3 zeigt das Anwesenheitsprofil der Bewohner sowie die durch die Personen eingetragenen Wärmegewinne für das EFH. Dabei werden die Wärmegewinne in konvektive (20 W) und Strahlungsgewinne (40 W) unterteilt. Zusätzlich werden pro Person latente Wärmeeinträge von 40 W direkt durch die Luftfeuchtigkeit mit einem Massenstrom von 0,059 kg/h in dem Gebäudemodell berücksichtigt. In Abbildung 3 sind außerdem die durch die Abwärme elektrischer Geräte verursachten Wärmeeinträge dargestellt. Für das Gebäudemodell des MFHs wurden die Werte entsprechend der höheren Bewohnerzahl skaliert.

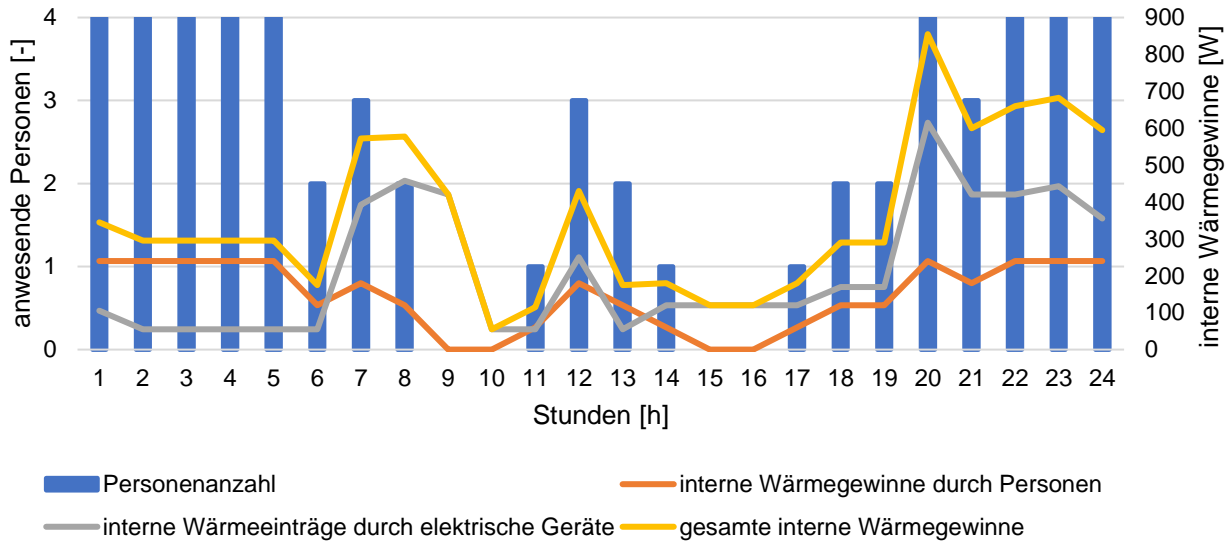


Abbildung 3: Tägliches Belegungsprofil und interne Wärmegewinne des Einfamilienhauses

Die Luftwechselrate der Lüftung wird mit  $0,4 \text{ h}^{-1}$  bezogen auf das Bruttovolumen der Gebäude angenommen. Diese Rate wird in den meisten europäischen Normen angesetzt (Weiss 2019). Zusätzlich zu dieser passiven Luftwechselrate wird ein nächtliches Fensterlüften in der Simulation dargestellt. Dafür müssen folgende Bedingungen erfüllt sein:

- Durchschnittstemperatur der letzten 24 Stunden über  $16^\circ\text{C}$
- Raumtemperatur über  $24^\circ\text{C}$
- Umgebungstemperatur mindestens  $2^\circ\text{C}$  unter der tatsächlichen Raumtemperatur

Außerdem wird eine Verschattungsautomatik durch außenliegende Jalousien berücksichtigt. Diese werden geschlossen, sobald die horizontale Einstrahlung größer als  $300 \text{ W/m}^2$  und die Raumtemperatur über  $23,8^\circ\text{C}$  liegt. Damit eine Verschattung während der Heizperiode ausgeschlossen wird, muss zusätzlich die mittlere Außentemperatur der letzten 24 Stunden über  $12^\circ\text{C}$  liegen.

Zur Ermittlung der Heizlastprofile der Modellgebäude ist eine Soll-Raumtemperatur von  $20^\circ\text{C}$  während der Heizperiode definiert. Die Heizperiode ist von 1. Oktober bis 30. April festgelegt. In Abbildung 4 sind für beide Modellgebäude die Heizlastgänge sowie die Außen- und Raumtemperatur gezeigt. Für das EFH resultiert ein jährlicher Heizwärmebedarf von  $8.066 \text{ kWh}$ , was einem spezifischen Wert von  $42,5 \text{ kWh/m}^2$  entspricht. Zur Wärmeversorgung des MFHs werden jährlich  $24.644 \text{ kWh}$  benötigt ( $43,2 \text{ kWh/m}^2$ ). Die monatlichen Heizwärmebedarfe sind in Abbildung 5 gegeben.

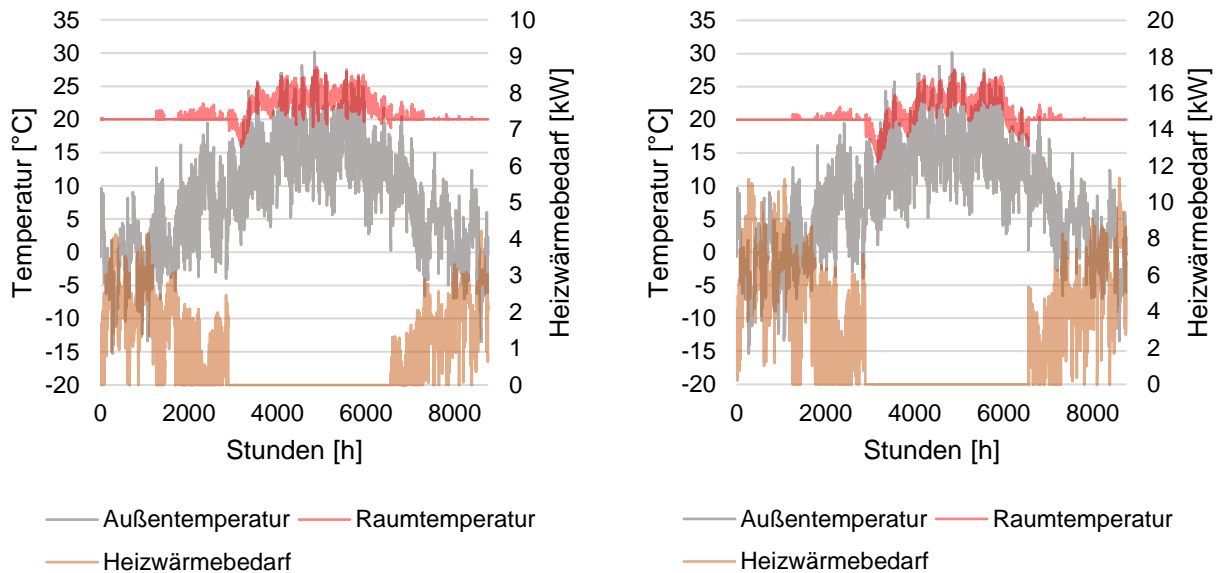


Abbildung 4: Heizlastgang des Einfamilienhauses (links) und des Mehrfamilienhauses (rechts)

Bei der Berechnung des Wärmebedarfs für die Warmwasserbereitung in Polysun wird ein täglicher Warmwasserbedarf von 40 l pro Person angenommen. Für die Warmwasserbezüge ist ein typisches Verbrauchsprofil mit drei Lastspitzen (morgens, mittags, abends) hinterlegt. Das Brauchwarmwasser wird mit einer Temperatur von 50 °C bereitgestellt. Da alle betrachteten Heizungssysteme entweder mit einem Hygienespeicher oder einer Frischwasserstation ausgestattet sind, wurde keine periodische Erhitzung des Speichers auf über 60 °C berücksichtigt. Für die Warmwasserversorgung des Vier-Personen-Haushalts werden jährlich 2.761 kWh benötigt. Bei dem MFH mit 12 Bewohnern entfallen insgesamt 8.271 kWh auf die Bereitstellung von Warmwasser.

Abbildung 5 zeigt für beide Modellgebäude den Wärmebedarf für die Warmwasser- und Raumwärmebereitstellung in monatlicher Auflösung. Es ist zu erkennen, dass in den Sommermonaten lediglich Energie zur Erwärmung des Warmwassers benötigt wird, wohingegen im Winter, bei niedrigen Außentemperaturen, der Großteil der Energie in Form von Raumwärme bereitgestellt werden muss.

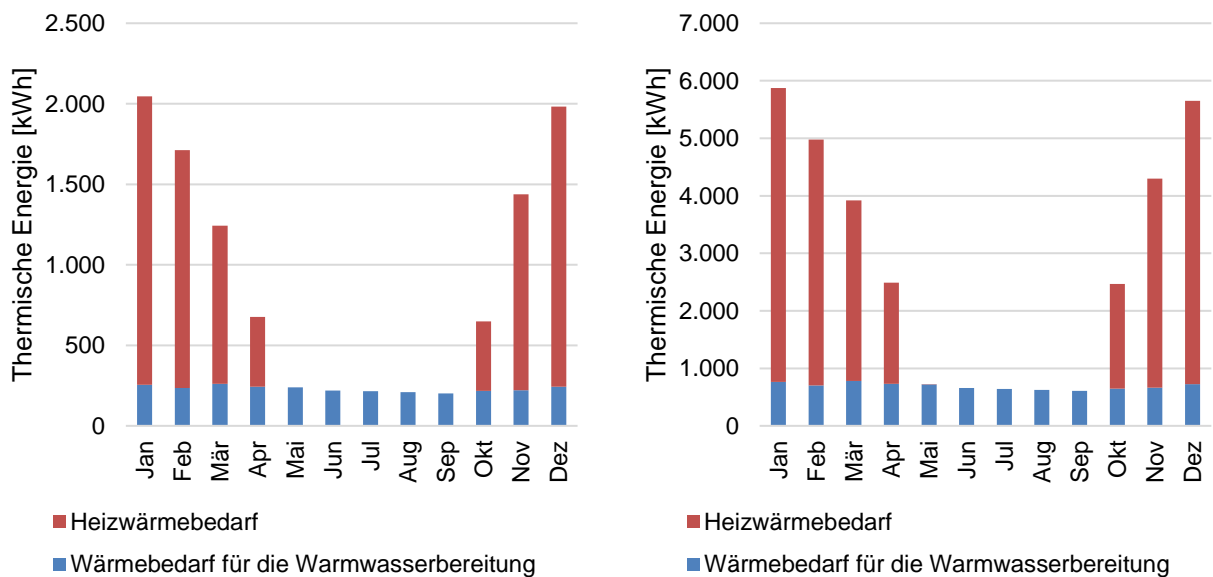


Abbildung 5: Monatlicher Wärmebedarf für Warmwasser und Raumwärme des Einfamilienhauses (links) und des Mehrfamilienhauses (rechts)

Für beide Modellgebäude wurde die Norm-Heizlast mit Hilfe des vereinfachten Verfahrens der DIN EN 12831 berechnet (Europäisches Komitee für Normung 2017). Die Heizlast entspricht dabei der Summe der Norm-

Transmissionswärmeverluste und der Norm-Luftwärmeverluste. Die Norm-Außentemperatur wird für den Standort München mit -12,9 °C angesetzt. Für die Bereitstellung von Warmwasser wird ein pauschaler Zuschlag in Höhe von 200 W pro Person berücksichtigt. Die Ergebnisse der Heizlastberechnung sind in Tabelle 2 gelistet.

*Tabelle 2: Ergebnisse der Heizlastberechnung nach DIN EN 12831*

	<b>Einfamilienhaus</b>	<b>Mehrfamilienhaus</b>
Norm-Transmissionswärmeverluste	3,28 kW	6,88 kW
Norm-Luftwärmeverluste	0,94 kW	2,87 kW
Aufschlag für Warmwasser	0,80 kW	2,40 kW
<b>Norm-Heizlast</b>	<b>5,02 kW</b>	<b>12,15 kW</b>

### **b) Heizungssysteme und Energieverbräuche**

Im Rahmen des Forschungsprojektes wurden für das EFH 13 und für das MFH 16 unterschiedliche Heizungssysteme untersucht. Aufgrund der geringen Heizlast des EFHs werden für dieses Gebäudemodell weder die Hackschnitzelsysteme noch ein Blockheizkraftwerk untersucht. Tabelle 3 liefert eine Übersicht der betrachteten Systeme. Die hier eingeführten Abkürzungen werden im weiteren Verlauf des Berichtes verwendet. In Tabelle 3 sind zusätzlich noch die in der ökonomischen und ökologischen Bewertung berücksichtigten Komponenten der jeweiligen Heizsysteme aufgelistet. Diese stellen die Systemgrenzen der Analysen dar. Die Kosten und Umweltauswirkungen des Wärmeverteils- und Wärmeübergabesystems werden von den Systemgrenzen ausgenommen, da bei allen Systemen eine Fußbodenheizung verbaut ist und sich die Systeme somit nicht voneinander unterscheiden.

*Tabelle 3: Übersicht der betrachteten Heizungssysteme und der jeweiligen berücksichtigten Komponenten*

<b>Heizsystem</b>	<b>Beschreibung</b>	<b>Berücksichtigte Komponenten</b>
Gas oST	Erdgas-Brennwertgerät	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Wärmeerzeuger</li> <li>• Erdgas-Hausanschluss</li> <li>• Schornstein</li> <li>• Wärmespeicher</li> </ul>
Gas mST	Erdgas-Brennwertgerät mit einer Solarthermieanlage zur solaren Heizungsunterstützung	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Wärmeerzeuger</li> <li>• Solarthermieanlage</li> <li>• Erdgas-Hausanschluss</li> <li>• Schornstein</li> <li>• Wärmespeicher</li> </ul>
Pellet oST	Pelletkessel	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Wärmeerzeuger</li> <li>• Brennstofflager</li> <li>• Schornstein</li> <li>• Wärmespeicher</li> </ul>
Pellet mST	Pelletkessel mit einer Solarthermieanlage zur solaren Heizungsunterstützung	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Wärmeerzeuger</li> <li>• Solarthermieanlage</li> <li>• Brennstofflager</li> <li>• Schornstein</li> <li>• Wärmespeicher</li> </ul>
Holz oST	Scheitholzvergaserkessel	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Wärmeerzeuger</li> <li>• Schornstein</li> <li>• Wärmespeicher</li> </ul>

Holz mST	Scheitholzvergaserkessel mit einer Solarthermieanlage zur solaren Heizungsunterstützung	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Wärmeerzeuger</li> <li>• Solarthermieanlage</li> <li>• Schornstein</li> <li>• Wärmespeicher</li> </ul>
Hack oST	Hackschnitzelkessel	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Wärmeerzeuger</li> <li>• Brennstofflager</li> <li>• Schornstein</li> <li>• Wärmespeicher</li> </ul>
Hack mST	Hackschnitzelkessel mit einer Solarthermieanlage zur solaren Heizungsunterstützung	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Wärmeerzeuger</li> <li>• Solarthermieanlage</li> <li>• Brennstofflager</li> <li>• Schornstein</li> <li>• Wärmespeicher</li> </ul>
WP_Luft	Luft-Wasser-Wärmepumpe	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Wärmeerzeuger</li> <li>• Wärmespeicher</li> </ul>
WP_Luft PV	Luft-Wasser-Wärmepumpe mit Photovoltaikanlage	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Wärmeerzeuger</li> <li>• Wärmespeicher</li> <li>• PV-Anlage</li> </ul>
WP_Sonde	Sole-Wasser-Wärmepumpe mit Erdsonde	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Wärmeerzeuger</li> <li>• Erdwärmesonde</li> <li>• Wärmespeicher</li> </ul>
WP_Sonde PV	Sole-Wasser-Wärmepumpe mit Erdsonde und Photovoltaikanlage	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Wärmeerzeuger</li> <li>• Erdwärmesonde</li> <li>• Wärmespeicher</li> <li>• PV-Anlage</li> </ul>
WP_Wasser	Wasser-Wasser-Wärmepumpe	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Wärmeerzeuger</li> <li>• Brunnen</li> <li>• Wärmespeicher</li> </ul>
WP_Wasser PV	Wasser-Wasser-Wärmepumpe mit Photovoltaikanlage	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Wärmeerzeuger</li> <li>• Brunnen</li> <li>• Wärmespeicher</li> <li>• PV-Anlage</li> </ul>
WP_Eis	Sole-Wasser-Wärmepumpe mit Eisspeicher und Sonnenkollektoren	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Wärmeerzeuger</li> <li>• Solarthermieanlage</li> <li>• Eisspeicher</li> <li>• Wärmespeicher</li> </ul>
BHKW	Erdgasbetriebenes Mini-Blockheizkraftwerk	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Wärmeerzeuger</li> <li>• Erdgas-Hausanschluss</li> <li>• Schornstein</li> <li>• Wärmespeicher</li> </ul>

Die mit TRNSYS erzeugten stündlichen Heizlastprofile der Modellgebäude werden für die Anlagensimulation an Polysun übertragen. Abbildung 6 zeigt beispielhaft das Simulationslayout des WP\_Sonde PV Systems. Neben dem Wärmeerzeuger System, bestehend aus Sole-Wasser-Wärmepumpe und Erdwärmesonde, ist der Wärmespeicher, das Wärmeverteilsystem, die Kaltwasserzufuhr, die Warmwasserentnahme, die Photovoltaikanlage, die Haushaltsstromverbraucher, das Stromnetz, das Gebäude sowie sämtliche Regelungen, Pumpen und Rohre dargestellt. Um eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu gewährleisten sind

Vorgaben zu Verteilsystem und Heizelementen für alle Varianten identisch. Die Vorlauftemperatur des Heizkreises wird anhand einer Heizkurve mit einer Steilheit von 0,46 witterungsführt geregelt. Für die Soll-Vorlauftemperatur bei Normbedingungen werden 35 °C vorgegeben.

Alle Systeme des EFHs sind mit einem Hygienespeicher ausgestattet, welcher das Warmwasser im Durchlaufprinzip erwärmt. Jedoch variiert das Volumen der Speicher je nach System, da beispielsweise für die optimale Nutzung der Solarthermieanlagen höhere Speichervolumen benötigt werden. Für die Auslegung der Speicher wurden gängige Auslegungsregeln angewendet. So wurde zum Beispiel für das System mit Scheitholzvergaser der Speicher nach dem vorhandenen Füllraumvolumen für das Stückholz ausgelegt (FNR 2020b). Da der betrachtete Scheitholzvergaserkessel einen Füllschachthinhalt von 80 l aufweist und als Auslegungswert 12 l je Brennstofffüllraum angesetzt werden, wurde das Speichervolumen für das System Holz oST mit 1000 l gewählt. Im MFH werden getrennte Puffer- und Warmwasserspeicher verwendet. Damit das Brauchwarmwasser ohne die Gefahr der Legionellenbildung bei 50 °C bereitgestellt werden kann, kommen hier bei allen Systemen Frischwasserstationen zum Einsatz.

Die Fläche der Solarkollektoren der Systeme mit solarer Heizungsunterstützung beträgt im EFH 10 m<sup>2</sup> und beim MFH 30 m<sup>2</sup>. Für die Photovoltaikanlage werden anhand der zur Verfügung stehenden Dachfläche 10,7 kWp bzw. 21,5 kWp bei südlicher Ausrichtung angesetzt.

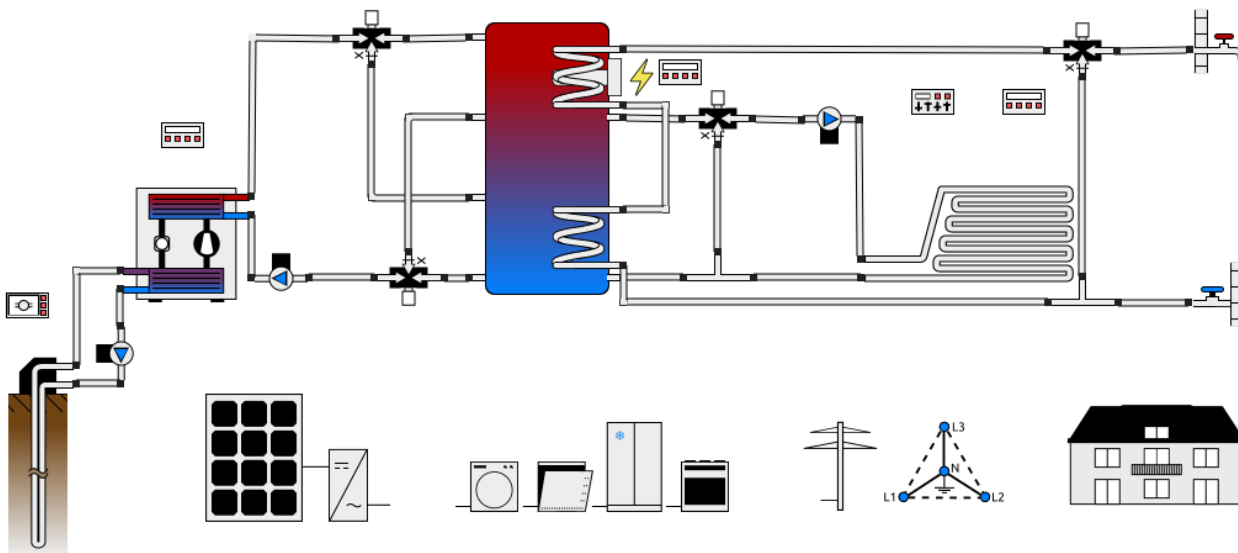


Abbildung 6: Polysun Simulationsansicht des Systems WP\_Sonde PV

In Tabelle 4 sind die Merkmale der ausgewählten Wärmeerzeuger gelistet. Die Leistungsgrößen sind entsprechend der Norm-Heizlasten der Modellgebäude gewählt. Sowohl das Erdgas-Brennwertgerät als auch der Pelletkessel ermöglichen eine modulierende Betriebsweise, weshalb für die Leistungswerte eine Spannweite angegeben ist. Die gegebenen Wirkungsgrade der Heizkessel beziehen sich auf den Heizwert. Da es sich bei Gas- und Pelletkessel um Brennwertgeräte handelt, beträgt der auf den Heizwert bezogene Wirkungsgrad über 100 %.

Mit 15 kW ist der Scheitholzvergaserkessel für das EFH überdimensioniert. Dies ist damit zu begründen, dass Scheitholzessel in kleinerer Leistungsgröße kaum auf dem Markt erhältlich sind. Für den Hackschnitzelkessel sind keine geeigneten Komponenten in Polysun vorhanden. Daher werden die Simulationsergebnisse der Systeme mit Scheitholzvergaserkessel für die Systeme Hack oSt und Hack mST übernommen.

Für die Wärmepumpen ist statt des Wirkungsgrades die Leistungszahl (COP) bei bestimmten Betriebsbedingungen gezeigt. Die Ergebnisse der Anlagensimulation sind in Tabelle 5 sowohl für das EFH als auch für das MFH gezeigt.

Tabelle 4: Eigenschaften der betrachteten Wärmeerzeuger des Einfamilienhauses und des Mehrfamilienhauses

Wärmeerzeuger	Modellgebäude	Leistung	Wirkungsgrad / COP
Erdgas-Brennwertgerät	EFH	15 – 1,7 kW	109,0 %
	MFH	15 – 1,7 kW	109,0 %
Pelletkessel	EFH	10 – 3 kW	105,5 %
	MFH	14 – 4,7 kW	106,2 %
Scheitholzvergaserkessel	EFH	15 kW	92,5 %
	MFH	15 kW	92,5 %
Hackschnitzelheizung	MFH	20 kW	92,5 %
Luft-Wasser-Wärmepumpe	EFH	7,8 kW (A2/W35)	3,9 (A2/W35)
		6,5 kW (A-7/W35)	3,2 (A-7/W35)
	MFH	17,4 kW (A2/W35)	3,7 (A2/W35)
		14,6 kW (A-7/W35)	3,1 (A-7/W35)
Sole-Wasser-Wärmepumpe	EFH	5,4 kW (B0/W35)	4,2 (B0/W35)
	MFH	10,4 kW (B0/W35)	4,3 (B0/W35)
Wasser-Wasser-Wärmepumpe	EFH	7,1 kW (W10/W35)	5,5 (W10/W35)
	MFH	12,9 kW (W10/W35)	5,2 (W10/W35)
Mini-Blockheizkraftwerk	MFH	5,5 kW (elektrisch)	27,2 % (elektrisch)
		13,5 kW (thermisch)	66,8 % (thermisch)

Tabelle 5: Ergebnisse der Anlagensimulation beider Modellgebäude

Heizsystem	Jährlicher Brennstoff- bzw. Stromverbrauch [kWh]	
	Einfamilienhaus	Mehrfamilienhaus
Gas oST	12.037	35.745
Gas mST	8.700	25.999
Pellet oST	12.013	35.540
Pellet mST	8.506	25.942
Holz oST	12.693	37.622
Holz mST	8.817	27.183
Hack oST	-	37.622
Hack mST	-	27.183
WP_Luft	3.353	10.473
WP_Luft PV	3.353	10.473
WP_Sonde	3.104	8.983
WP_Sonde PV	3.104	8.983
WP_Wasser	2.737	8.036
WP_Wasser PV	2.737	8.036

WP_Eis	2.096	6.857
BHKW	-	57.952

Alle betrachteten Wärmepumpensysteme werden auch in Kombination mit einer PV-Anlage untersucht. Die PV-Anlage des EFHs erzielt einen jährlichen Stromertrag von 11.819 kWh (siehe Tabelle 6). Mit den 21,5 kWp des MFHs lassen sich 23.447 kWh pro Jahr erzeugen. Der Haushaltsstromverbrauch ohne elektrische Wärmeerzeuger wird mit 1.000 kWh pro Person angenommen. Mit Hilfe eines Standardverbrauchsprofils wird dazu ein zeitlich aufgelöstes Lastprofil erstellt. In Abbildung 7 ist die monatliche PV-Stromerzeugung sowie die Verwendung des PV-Stroms des Systems Luft\_WP PV im EFH dargestellt. Insgesamt werden 79 % des erzeugten Stroms in das öffentliche Netz eingespeist. 15 % werden von den Haushaltsgeräten und 6 % direkt von der Wärmepumpe verbraucht. Demnach werden 23 % des Wärmepumpenstroms durch die PV-Anlage gedeckt, welche somit nicht aus dem öffentlichen Netz bezogen werden müssen. An dieser Stelle sei erwähnt, dass keine Eigenverbrauchsoptimierung der Systeme durchgeführt wurde. In Tabelle 6 sind die Ergebnisse für alle betrachteten Wärmepumpensysteme mit PV-Nutzung aufgeführt.

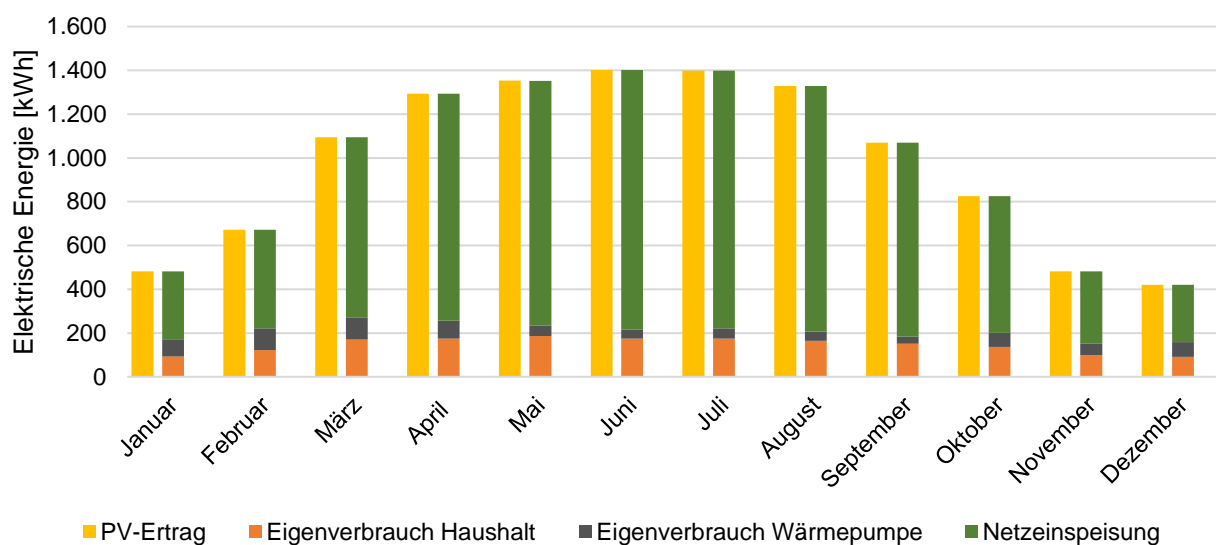


Abbildung 7: PV-Strom Erzeugung (linke Säule) und Verwendung (rechte Säule) des Systems WP\_Luft PV im Einfamilienhaus

Tabelle 6: Ergebnisse der PV-Simulationen

	WP_Luft PV		WP_Sonde PV		WP_Wasser PV	
	EFH	MFH	EFH	MFH	EFH	MFH
PV-Ertrag [kWh]	11.819	23.447	11.819	23.447	11.819	23.447
Eigenverbrauch Haushalt [kWh]	1.735	4.817	1.745	4.796	1.762	4.867
Eigenverbrauch Wärmepumpe [kWh]	755	2.430	819	2.689	749	2.288
Netzeinspeisung [kWh]	9.329	16.200	9.255	15.962	9.308	16.292
Netzbezug Wärmepumpe [kWh]	2.598	8.043	2.285	6.294	1.988	5.748

## Arbeitspaket 2: Ökonomische Bewertung

### a) Methode der ökonomischen Bewertung

Die ökonomische Bewertung der Heizungssysteme erfolgt im Rahmen einer dynamischen Investitionsrechnung mit Hilfe der Kapitalwertmethode nach folgender Gleichung:

$$K_0 = -I_0 + \sum_{t=1}^n K_t \cdot \frac{1}{(1+i)^t} \pm R_n \cdot \frac{1}{(1+i)^n}$$

- $K_0$ : Kapitalwert, kumulierter Barwert
- $I_0$ : Anfangsinvestition
- $K_t$ : Kosten im Jahr  $t$
- $i$ : Kalkulationszinssatz
- $R_n$ : Restwert am Ende der Laufzeit
- $n$ : Laufzeit

Wie in der VDI 2067 vorgeschlagen, wird für die Heizungssysteme ein Betrachtungszeitraum von 20 Jahren angesetzt (VDI 2012). Da die berücksichtigten Komponenten unterschiedliche Nutzungsdauern haben, werden auch innerhalb des Betrachtungszeitraum auftretende Ersatzinvestitionen einbezogen. Um die kapitalgebundenen Kosten der Ersatzinvestitionen zu berechnen, wird eine Inflationsrate von 2,4 % berücksichtigt. Dies entspricht der durchschnittlichen Inflationsrate in Deutschland der letzten 10 Jahre (Statistisches Bundesamt 2023). Die rechnerischen Nutzungsdauern aller Komponenten sind in Tabelle 7 gegeben und basieren weitestgehend auf den Angaben der VDI 2067. Für Komponenten, welche nicht in der Richtlinie gelistet sind, wurden Annahmen getroffen. Neben den Nutzungsdauern sind in Tabelle 7 die jährlichen Aufwendungen für Instandsetzung, Wartung und Inspektion der Komponenten als prozentualer Anteil der Investitionskosten aufgeführt. Diese basieren ebenfalls auf der VDI 2067. Für die Berechnung der Restwerte am Ende des Betrachtungszeitraumes wird eine lineare Abschreibung angenommen. Der Kalkulationszinssatz wird auf 4 % gesetzt, da von einer Fremdkapitalfinanzierung der Heizsysteme ausgegangen wird.

*Tabelle 7: Rechnerische Nutzungsdauern sowie Aufwendungen für Instandsetzung, Wartung und Inspektion der berücksichtigten Komponenten (VDI 2012)*

Anlagenkomponente	Nutzungsdauer [Jahre]	Aufwand für Instandsetzung, Wartung und Inspektion [%/Jahr]
Gas-Brennwertgerät	18	3
Gas-Hausanschluss	40	-
Pelletkessel	15	6
Pellet Brennstofflager	20	5
Scheitholzvergaserkessel	15	6
Hackschnitzelkessel	15	6
Hackschnitzel Brennstofflager	20	5
Blockheizkraftwerk	15	8
Luft-Wasser-Wärmepumpe	18	2,5
Sole-Wasser-Wärmepumpe	20	2,5
Erdsonde	50	3
Wasser-Wasser-Wärmepumpe	20	2,5
Brunnen	50	3
Eisspeicher	50	3

Solarthermieanlage	20	1,5
Wärmespeicher	20	2
Schornstein	50	3
PV-Anlage	20	1,5

Die kapitalgebundenen Kosten der betrachteten Heizsysteme sind in Tabelle 8 aufgeführt. Ausschlaggebend für die Höhe der Investitionskosten der Wärmeerzeuger sind die Leistungsklassen, welche aus den berechneten Norm-Heizlasten hervorgehen (siehe Tabelle 4). Neben den Kosten für die Wärmeerzeuger sind in den Gesamtkosten die Investitionskosten aller in Tabelle 3 aufgeführten Komponenten enthalten. Dementsprechend sind beispielsweise für das System Pellet mST Kosten für den Wärmeerzeuger, die Solarthermieanlage, das Brennstofflager, den Schornstein sowie für den Wärmespeicher berücksichtigt. Die aufgeführten Investitionskosten basieren auf Kostenstudien (bdew 2021a, 2021b; IWU 2015, 2021), Listenpreisen führender Hersteller und Erfahrungswerten. Die recherchierten Preise wurden, falls notwendig, auf die jeweilige Leistungsgröße mit folgender Formel skaliert:

$$I = I_{ref} \cdot \left( \frac{P}{P_{ref}} \right)^x$$

Darin sind  $I$  die zu ermittelnden Investitionskosten einer Anlage mit der Leistung  $I$ .  $I_{ref}$  repräsentieren dementsprechend die kapitalgebundenen Kosten der Referenzanlage mit der Leistung  $P_{ref}$ . Der Kostenexponent  $x$  wurde pauschal mit 0,6 angesetzt.

Manche der betrachteten Systeme wie beispielsweise das BHKW oder die Luft-Wärmepumpe in Verbindung mit einer PV-Anlage, erzeugen allerdings neben thermischer Energie auch elektrische Energie. Diese Systeme stellen multifunktionelle Systeme dar. Da in der vorliegenden Studie nur die der Wärme zurechenbaren ökologischen sowie ökonomischen Aspekte betrachtet werden sollen, muss eine Allokation durchgeführt werden. In der ökonomischen Bewertung bedeutet dies, dass beispielsweise die Investitionskosten der Stromerzeuger, sprich PV-Anlage und BHKW, alloziert werden müssen. Dadurch werden die kapitalgebundenen Kosten der Stromerzeuger nur zu dem der Wärmeversorgung allozierbaren Anteil einbezogen. Für die Wärmepumpensysteme, die mit einer PV-Anlage kombiniert werden, sowie für das BHKW sind die tatsächlich berücksichtigten Investitionskosten in Klammern gegeben.

Sowohl für die Kosten der Photovoltaikanlage als auch für die Kosten des Blockheizkraftwerkes wird eine ökonomische Allokation durchgeführt. Beispielsweise werden in der Variante WP\_Luft PV von den photovoltaisch erzeugten 11.819 kWh<sub>el</sub> insgesamt 2.511 kWh<sub>el</sub> von dem System selbst verbraucht. Hiervon sind 1.735 kWh<sub>el</sub> dem Haushaltsstrom und 755 kWh<sub>el</sub> dem Wärmepumpenstrom zurechenbar. Bei einem Wärmepumpenstrompreis von 27,9 ct/kWh<sub>el</sub>, einem Haushaltsstrompreis von 35,9 ct/kWh<sub>el</sub> und einer Einspeisevergütung von 8,2 ct/kWh<sub>el</sub> werden daher 14% der Investitionskosten der Photovoltaikanlage in die ökonomische Bewertung des Heizsystems einbezogen:

$$\text{Anteil } I_{PV} = \frac{755 \text{ kWh}_{el} \cdot 27,9 \frac{\text{ct}}{\text{kWh}_{el}}}{755 \text{ kWh}_{el} \cdot 27,9 \frac{\text{ct}}{\text{kWh}_{el}} + 1.735 \text{ kWh}_{el} \cdot 35,9 \frac{\text{ct}}{\text{kWh}_{el}} + 9.329 \text{ kWh}_{el} \cdot 8,2 \frac{\text{ct}}{\text{kWh}_{el}}} = 13,2\%$$

Der wärmebezogene Allokationsfaktor  $f_{th}$  des Blockheizkraftwerkes wird anhand folgender Gleichung berechnet:

$$f_{th} = \frac{\eta_{th} * \frac{K_{th}}{K_{th} + K_{el}}}{\eta_{th} * \frac{K_{th}}{K_{th} + K_{el}} + \eta_{el} * \frac{K_{el}}{K_{th} + K_{el}}}$$

Dabei repräsentieren  $\eta_{th}$  und  $\eta_{el}$  den thermischen bzw. elektrischen Nutzungsgrad des Blockheizkraftwerkes.  $K_{th}$  ist der alternative Wärmepreis pro kWh<sub>th</sub>, welcher mit 10,6 ct angesetzt wird. Der Strompreis  $K_{el}$  beträgt 25,3 ct/kWh<sub>el</sub>. Dabei wird berücksichtigt, dass von den 15.754 kWh produzierten Strom des BHKWs 5.589 kWh<sub>el</sub> selbst verbraucht werden und 10.165 kWh<sub>el</sub> in das öffentliche Netz eingespeist werden. Die KWK-

Netzeinspeisevergütung wird mit 17,2 ct/kWh<sub>el</sub> angesetzt. Für den selbstverbrauchten Strom wird ein KWK-Zuschlag in Höhe von 4 ct/kWh<sub>el</sub> berücksichtigt.

*Tabelle 8: Kapitalgebundene Kosten der untersuchten Heizsysteme; die allozierten, tatsächlich anrechenbaren Investitionskosten der Systeme mit PV-Anlage und des Blockheizkraftwerkes werden in Klammern dargestellt*

Heizsystem	Investitionskosten [€]	
	Einfamilienhaus	Mehrfamilienhaus
Gas oST	12.560	16.470
Gas mST	20.060	32.460
Pellet oST	22.330	32.440
Pellet mST	29.830	48.430
Holz oST	19.300	22.250
Holz mST	27.000	38.570
Hack oST	-	40.920
Hack mST	-	56.900
WP_Luft	16.130	25.550
WP_Luft PV	34.400 (18.540)	62.100 (32.510)
WP_Sonde	26.730	35.880
WP_Sonde PV	45.010 (29.320)	72.430 (43.480)
WP_Wasser	30.730	39.880
WP_Wasser PV	49.010 (33.110)	76.430 (46.460)
WP_Eis	40.730	59.570
BHKW	-	37.410 (23.210)

Die Energiepreise (Tabelle 9) basieren auf den bundesdeutschen Jahresmittelwerten der letzten fünf Jahre. Für die Energiepreisentwicklung werden die Durchschnittswerte der jeweiligen Preisänderungsraten der letzten 10 Jahre zugrunde gelegt (bdew 2023a, 2023b; C.A.R.M.E.N. 2022a, 2022b; Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft 2022).

*Tabelle 9: Energiepreise der jeweiligen Energieträger mit dazugehörigen Preisänderungsraten*

Energieträger	Energiekosten [€/kWh]	Preisentwicklung [%/Jahr]
Erdgas	0,101	4,9
Pellet	0,069	2,6
Scheitholz	0,064	1,9
Hackschnitzel	0,028	0,0
Strom Wärmepumpentarif	0,279	2,3

## b) Ergebnisse der Wirtschaftlichkeitsberechnungen

Die Ergebnisse der ökonomischen Bewertung der Heizsysteme des EFHs sind in Abbildung 8 gezeigt. Dabei ist zu beachten, dass die absoluten Ergebnisse der Kapitalwertrechnung gezeigt werden. Dementsprechend ist ein höherer Kapitalwert mit höheren Gesamtkosten des Systems verbunden. Die Systeme WP\_Luft PV, WP\_Luft und Gas oST weisen die niedrigsten Gesamtkosten auf. Demgegenüber sind Pellet mST, WP\_Eis

und Pellet oST mit den höchsten Aufwendungen verbunden. Die verbrauchsgebundenen Kosten, welche auf die Kosten für den Brennstoff bzw. die Stromkosten zurückzuführen sind, sind ausschließlich bei den beiden gasbetriebenen Heizsystemen der Hauptkostentreiber. Bei allen anderen Systemen haben die kapitalgebundenen Kosten den größten Einfluss auf das Gesamtergebnis. Während die betriebsgebundenen Kosten, welche durch Instandhaltung, Wartung und Inspektion verursacht werden, bei Gasheizungen eine untergeordnete Rolle spielen, machen sie bei biomassebasierten Systemen etwa ein Drittel der Gesamtkosten aus. Es ist für alle Brennstoffheizungen zu beobachten, dass die Kombination mit einer Solarthermieanlage zu höheren Kosten führt. Demgegenüber ist bei den Wärmepumpensystemen der Einsatz einer PV-Anlage trotz der höheren Investitionskosten mit keiner Erhöhung der Gesamtkosten verbunden.

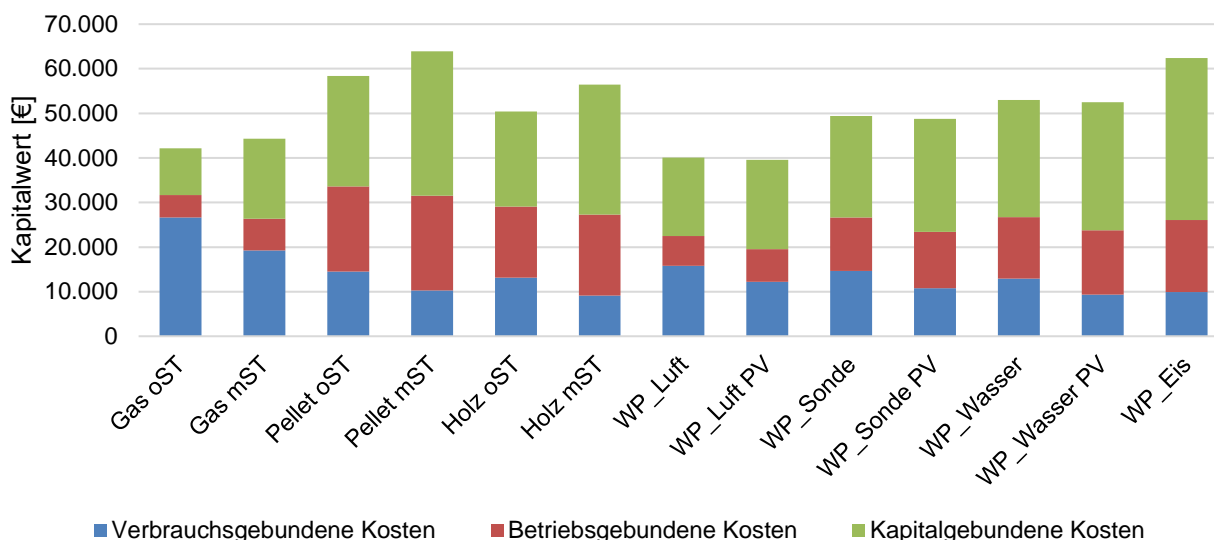


Abbildung 8: Ergebnisse der Wirtschaftlichkeitsberechnungen der untersuchten Heizungssysteme des Einfamilienhauses

Abbildung 9 zeigt die Gesamtkosten aller Heizsysteme des MFHs. Die niedrigsten Kosten sind für die Systeme Holz oST, WP\_Luft PV und WP\_Sonde PV zu beobachten. Insgesamt sind 8 Systeme auf einem ähnlich niedrigen Kostenniveau. Dies betrifft die beiden Scheitholzvergaserkesselsysteme und alle Wärmepumpensysteme, mit Ausnahme des Systems mit Eisspeicher. Der höhere Wärmebedarf des Mehrfamilienhauses führt dazu, dass bei diesem Modellgebäude die gasbefeueren Systeme aufgrund der hohen Brennstoffkosten höhere Gesamtkosten aufweisen. Im Gegensatz zu den Ergebnissen des EFHs sind die verbrauchsgebundenen Kosten bei der Mehrheit der Systeme der Hauptkostentreiber. Die höchsten Gesamtkosten sind für die Systeme Pellet mST, BHKW und Hack mST vorzufinden.

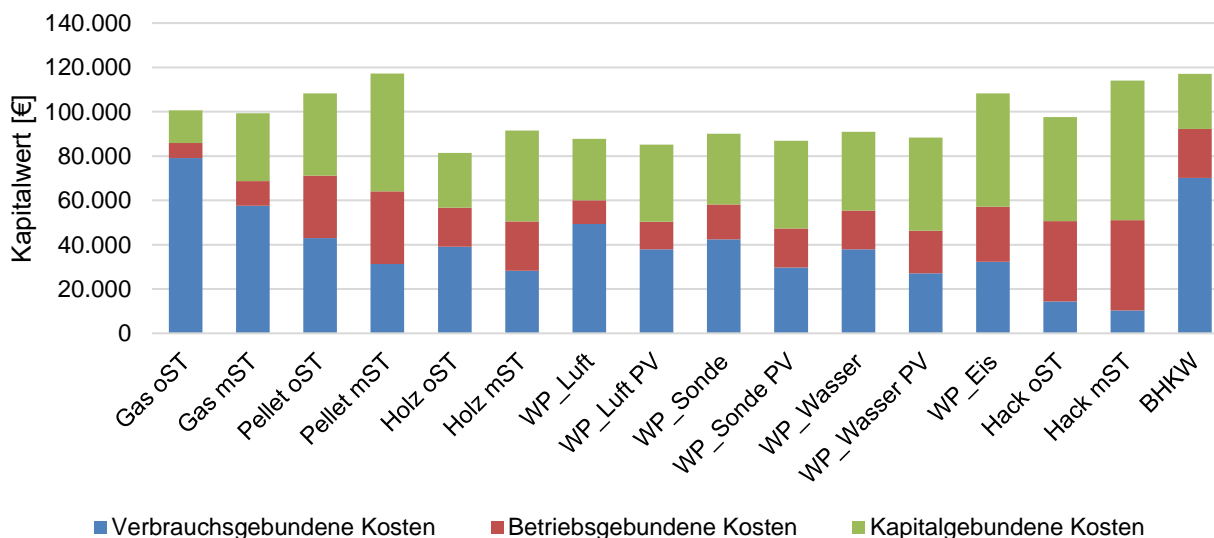


Abbildung 9: Ergebnisse der Wirtschaftlichkeitsberechnungen der untersuchten Heizungssysteme des Mehrfamilienhauses

### c) Sensitivitätsanalyse

Da die Ergebnisse der Wirtschaftlichkeitsberechnung eine starke Abhängigkeit von verschiedenen Parametern aufweisen, werden die Sensitivitäten in zwei weiteren Szenarien untersucht. Dafür werden ein Best-Case und ein Worst-Case-Szenario definiert. Die veränderten Parameter der beiden Szenarien sind in Tabelle 10 gelistet. Während zum einen die Wirkungsgrade bzw. Jahresarbeitszahlen (JAZ) der Wärmeerzeuger variiert werden, werden auch verschiedene Energiepreisentwicklungen untersucht. Da die Recherche zu den Investitionskosten der analysierten Heizsysteme eine breite Bandbreite an Ergebnissen liefert, werden zusätzlich die Investitionskosten der Systeme variiert. Im Best-Case-Szenario betragen diese 80 % der in Tabelle 8 gezeigten Kosten. Demgegenüber werden die kapitalgebundenen Kosten im Worst-Case-Szenario um 20 % erhöht.

*Tabelle 10: Parametervariationen im Best-Case- und Worst-Case-Szenario*

<b>Parameter</b>	<b>Best-Case-Szenario</b>	<b>Worst-Case-Szenario</b>
Wirkungsgrad Gas-Brennwertgerät	109 %	100 %
Wirkungsgrad Pelletkessel	106 %	92 %
Wirkungsgrad Scheitholzvergaserkessel	95 %	80 %
Wirkungsgrad Hackschnitzelkessel	95 %	80 %
Wirkungsgrad BHKW	98 %	85 %
JAZ Luftwärmepumpe	4,0	3,0
JAZ Solewärmepumpe	4,5	3,5
JAZ Grundwasserwärmepumpe	5,0	3,8
Investitionskosten	- 20 %	+ 20 %
Gaspreissteigerung	3,0 %/Jahr	6,0 %/Jahr
Strompreissteigerung	1,5 %/Jahr	3,0 %/Jahr
Pelletpreissteigerung	2,0 %/Jahr	3,0 %/Jahr
Scheitholzpreissteigerung	1,5 %/Jahr	2,5 %/Jahr
Hackschnitzelpreissteigerung	0,0 %/Jahr	1,0 %/Jahr

Die Ergebnisse der Wirtschaftlichkeitsberechnungen der Szenarien werden als Fehlerindikatoren in Abbildung 10 für das EFH gezeigt. Sie sind ein Maß für die Unsicherheit der Ergebnisse und repräsentieren die mögliche Bandbreite der jeweiligen Gesamtkosten. Es wird deutlich, dass die meisten Kosten-Bandbreiten der Heizungssysteme überlappen. Sobald es zu einer Überschneidung der Kosten kommt, kann keine Aussage über den wirtschaftlichen Vorteil eines Systems getroffen werden. Ein System ist jedoch wirtschaftlich vorteilhaft, wenn die Kosten des Worst-Case-Szenarios niedriger sind als die Kosten des Best-Case-Szenarios eines anderen Systems.

Im Worst-Case-Szenario ist das System WP\_Luft PV mit den niedrigsten Gesamtkosten verbunden. Im Vergleich dazu weisen die Systeme Pellet oST, Pellet mST, Holz mST und WP\_Eis im Best-Case-Szenario höhere Gesamtkosten auf. Demzufolge ist das Luft-Wasser-Wärmepumpensystem in Kombination mit einer Photovoltaikanlage (WP\_Luft PV) immer mit geringeren Kosten verbunden als diese Systeme. Dies gilt auch für die Systeme WP\_Luft und Gas oST.

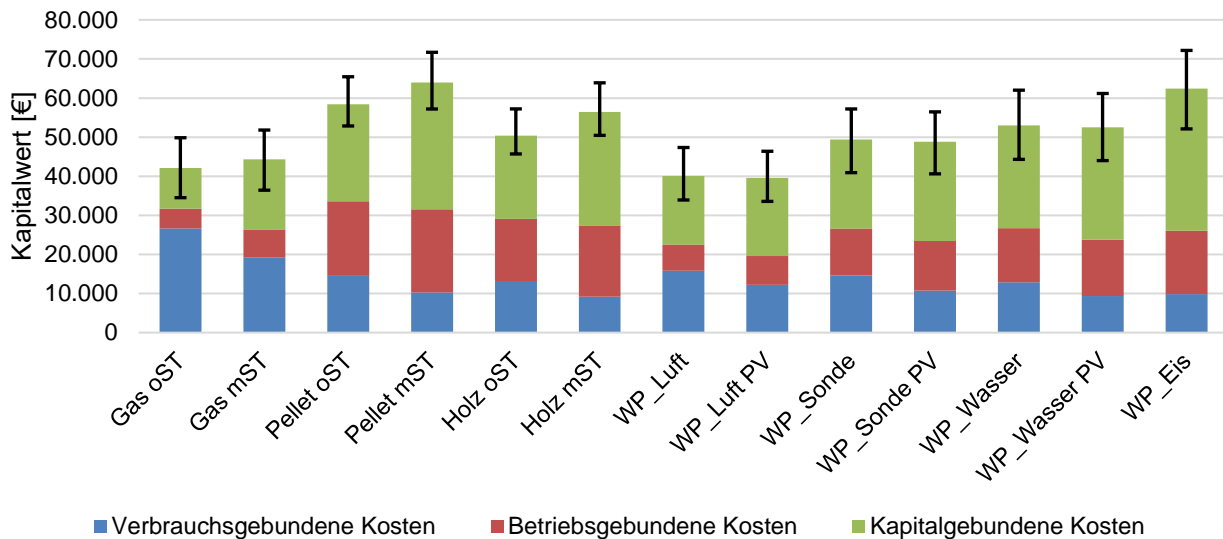


Abbildung 10: Ergebnisse der Wirtschaftlichkeitsberechnungen der untersuchten Heizungssysteme des Einfamilienhauses mit Fehlerindikatoren

Für die Heizsysteme des MFHs sind die Ergebnisse der ökonomischen Bewertung mit Fehlerindikatoren in Abbildung 11 dargestellt. Für die Scheitholzvergaserheizung (Holz oST) können gegenüber den Systemen Pellet oST, Pellet mST, Hack mST und BHKW niedrigere Gesamtkosten festgestellt werden. Ausgehend von dem Best-Case für Hack mST ist für die 15 weiteren Heizungssystemen für 11 eine Überlappung der Kosten zu beobachten, weshalb für keines dieser Systeme ein wirtschaftlicher Vorteil festzustellen ist. Lediglich die Systeme Holz oST, WP\_Luft, WP\_Luft PV und WP\_Sonde PV sind mit niedrigeren Gesamtkosten verbunden.

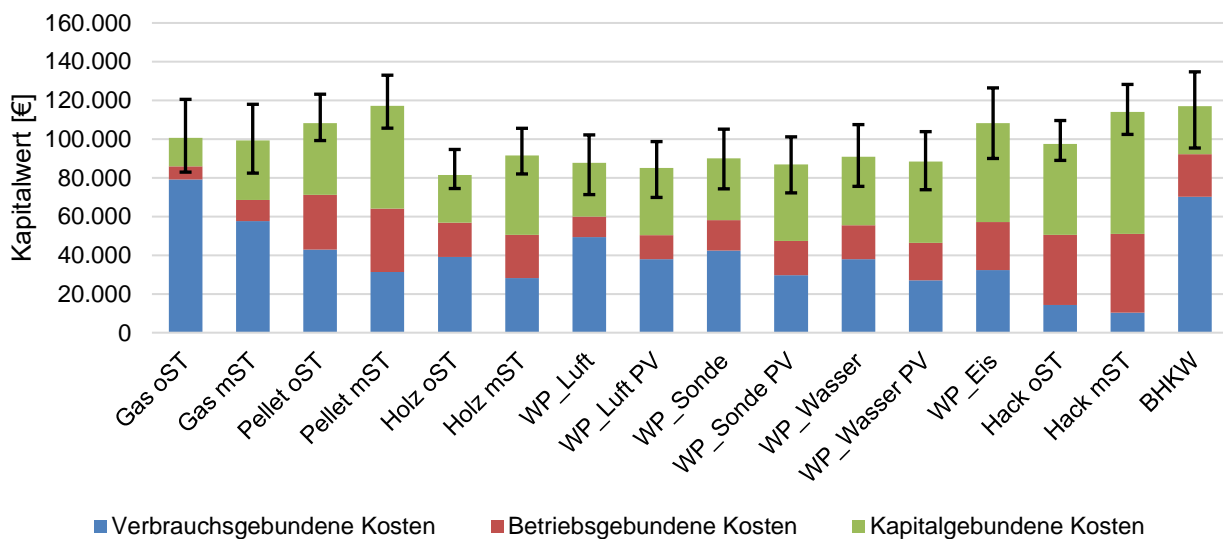


Abbildung 11: Ergebnisse der Wirtschaftlichkeitsberechnungen der untersuchten Heizungssysteme des Mehrfamilienhauses mit Fehlerindikatoren

Die Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse zeigen, dass die Wirtschaftlichkeit der Heizungssysteme stark von den getroffenen Randbedingungen abhängen. Zwar wurde in dem Basisszenario versucht, möglichst repräsentative Annahmen zu treffen, jedoch können diese in der Praxis erheblich davon abweichen. Die beiden entwickelten Szenarien zeigen, dass der Großteil der Heizungssystemen sowohl des EFHs als auch des MFHs keinen klaren ökonomischen Vorteil aufweisen. Dementsprechend können die hier getroffenen Schlussfolgerungen zu der Wirtschaftlichkeit der verschiedenen Heizungssysteme in der Praxis abweichend ausfallen.

### Arbeitspaket 3: Massen und Energiebilanzen

Ziel des Arbeitspaketes ist die Erstellung der Sachbilanzen, welche für die spätere ökologische Analyse benötigt werden. Aufgrund der inhaltlichen Überschneidung mit Arbeitspaket 4 sind dort die Ergebnisse beider Arbeitspakete aufgeführt.

### Arbeitspaket 4: Ökobilanz und Sensitivitätsanalyse

#### a) Methode der ökologischen Bewertung

Zur ganzheitlichen Bewertung der ökologischen Auswirkungen von Produkten eignet sich die Methode des Life Cycle Assessments (LCA), dt. Ökobilanz. Die LCA-Methode ist in den DIN EN ISO Normen 14040 und 14044 grundlegend standardisiert (DIN 2009, 2018). Das Grundprinzip der Methode liegt in der Betrachtung aller Auswirkungen eines Produktes oder einer Dienstleistung über dessen gesamten Lebensweg. Dieser Lebensweg beginnt bei der Gewinnung der Rohstoffe und geht über den Transport, der Produktion des Gutes sowie dessen Nutzung bis hin zum Ende des Lebenszyklus, an welchem das Produkt verwertet wird. Durch die Betrachtung des gesamten Lebenszyklus kann eine Umverteilung von Umweltauswirkungen eines Produkts beispielsweise von der Nutzungs- in die Produktionsphase aufgezeigt und vermieden werden. Den ISO Normen 14040 und 14044 zufolge, ist eine LCA in vier Abschnitte untergliedert (siehe Abbildung 12).

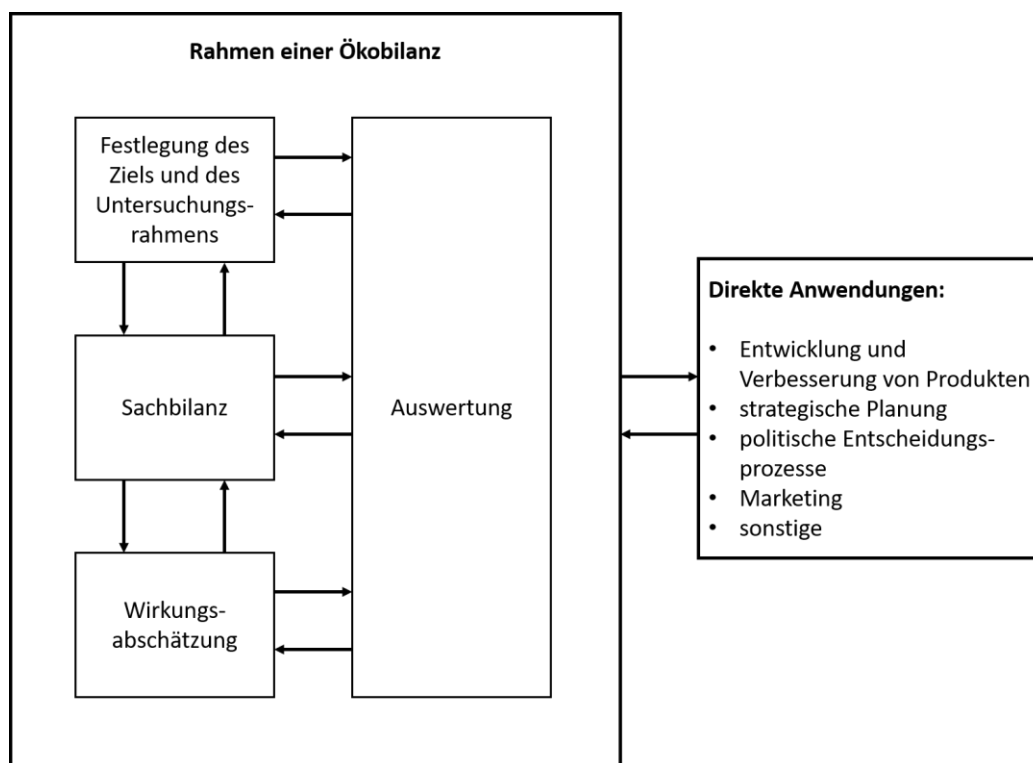


Abbildung 12: Vier Phasen der Ökobilanzierung sowie Interkonnektivität der verschiedenen Phasen nach DIN EN ISO 14040

Zu Beginn wird das Ziel und der Untersuchungsrahmen festgelegt. Aufbauend auf dieser Definition erfolgt die Analyse der Sachbilanz, in welcher Input- und Outputflüsse des Produktsystems quantifiziert werden. Darauf folgt die Wirkungsabschätzung, die es zum Ziel hat, den Input- und Outputflüssen eine Umweltwirkung zuzuweisen. Abschließend bedarf es einer Auswertung der LCA-Ergebnisse sowie der vorangegangenen Schritte. Wie in Abbildung 12 zu erkennen ist, handelt es sich bei der LCA um eine iterative Methode, die es immer wieder erfordert, getroffene Annahmen zu evaluieren und gegebenenfalls Anpassungen vorzunehmen.

Anhand der Ergebnisse einer LCA können Aussagen über die ökologischen Auswirkungen eines Produktes, wie zum Beispiel das Potential zum Klimawandel, zur Versauerung oder zur Eutrophierung beizutragen, getroffen werden. Die Ergebnisse können zur Weiterentwicklung und Verbesserung eines Produktes hinsichtlich der ökologischen Auswirkungen, zu Vermarktungszwecken und ähnlichem genutzt werden. Oftmals werden aber auch verschiedene Technologien oder Szenarien hinsichtlich ihrer ökologischen

Auswirkungen miteinander verglichen, um ein Ranking zu erstellen. Darauf aufbauend können strategische Entscheidungen getroffen werden.

## b) Definition von Ziel und Untersuchungsrahmen

Das Ziel dieses Arbeitspaketes ist die Quantifizierung der Umweltauswirkungen verschiedener Heizsysteme zur Bereitstellung von Raumwärme und Warmwasser in Deutschland. Die funktionelle Einheit ist definiert als die jährlich für Raumheizung und Warmwasser erzeugte Wärmeenergiemenge für die beiden Referenzgebäude in München. Für das Modell-EFH beträgt dieser Wert 10.827 kWh (8.066 kWh Raumwärme und 2.761 kWh Warmwasser) und für das MFH 32.925 kWh (24.644 kWh Raumwärme und 8.281 kWh Warmwasser).

Gemäß des Cradle-to-Grave-Ansatzes umfassen die Systemgrenzen der Studie alle Lebenszyklusphasen:

- Herstellungsphase: Gewinnung von Rohstoffen, Transport zum Produktionsstandort sowie die Herstellung der Produkte
- Betriebsphase: alle Prozesse im Zusammenhang mit der Nutzung des Systems
- End-of-Life-Phase (EoL): Demontage des Systems und der Komponenten und Entsorgung aller nicht recycelten Materialien durch Verbrennung oder Deponierung

Die in der Herstellungsphase untersuchten Komponenten für alle Heizsysteme sind in der Systemübersicht in Tabelle 3 gelistet. Für das System Pellet mST sind die Systemgrenzen beispielhaft in Abbildung 13 zusammengefasst. In der gesamten Analyse folgt die Ökobilanz dem Cut-off-Ansatz, d. h. recycelbare Materialien verlassen das Produktsystem in der EoL-Phase ohne die Umwelt zu belasten (Wernet et al. 2016).

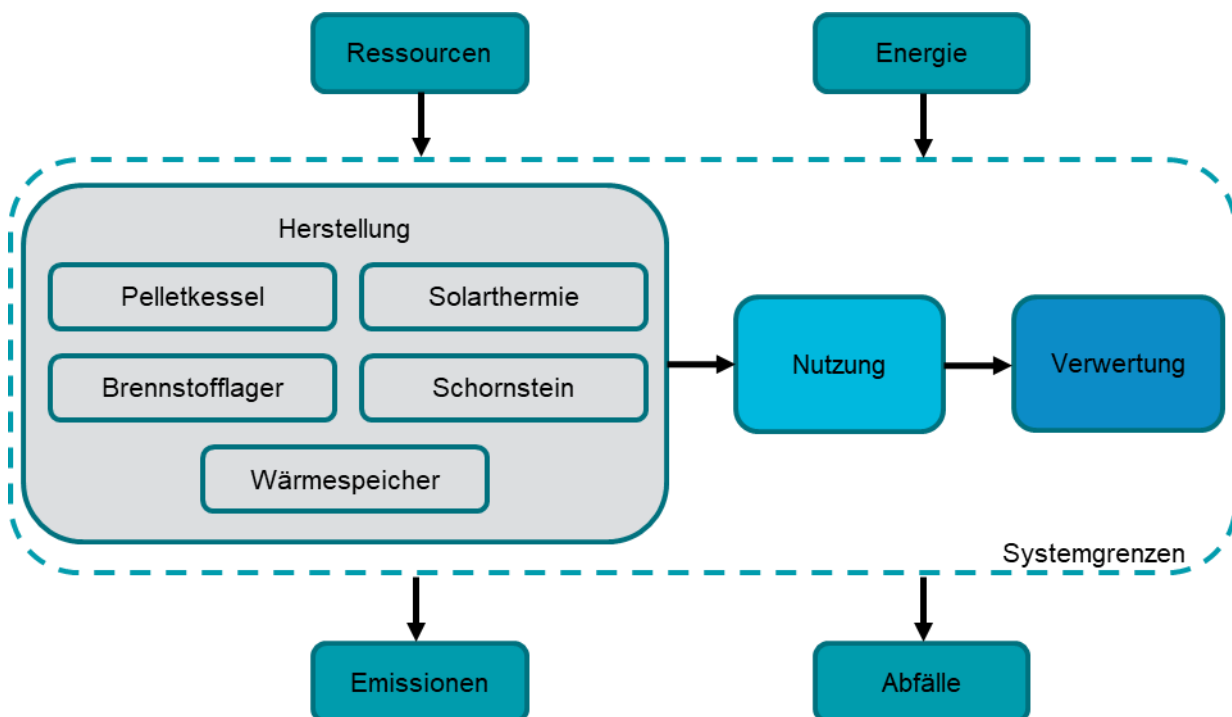


Abbildung 13: Systemgrenzen des Systems Pellet mST

Die ökologischen Modelle der Heizsysteme wurden in der Ökobilanzsoftware SimaPro 9.5 aufgebaut und mit Hilfe der Wirkungsabschätzungsmethode Environmental Footprint (EF) 3.1 der EF-Initiative der Europäischen Kommission hinsichtlich ihrer Umweltauswirkungen analysiert (SimaPro; Andreasi Bassi et al. 2023). Anhand dieser Methode wird den Materialflüssen, die in der Sachbilanz ermittelt wurden, eine Wirkung auf die Umwelt zugewiesen, welche wiederum in 16 verschiedene Kategorien unterteilt werden können (Tabelle 11). Zur Bildung der Single-Score Ergebnisse erfolgt eine Normierung und Gewichtung der Ergebnisse der einzelnen Wirkungskategorien. Die verwendeten Normierungs- und Gewichtungsfaktoren sind auch in Tabelle 11 aufgeführt. Diese werden ebenfalls vom Joint Research Center der Europäischen Kommission bereitgestellt (Crenna et al. 2019; Sala et al. 2018). Nach der Multiplikation der Wirkungskategorieergebnissen mit den Normierungs- und Gewichtungsfaktoren, können die nun dimensionslosen Ergebnisse aufaddiert und somit zu einem Single-Score zusammengefasst werden.

Tabelle 11: Wirkungskategorien der EF 3.1 Methode mit dazugehörigen Normalisierungs- und Gewichtungsfaktoren

Wirkungskategorie	Abkürzung	Einheit	Normalisierungsfaktor	Gewichtungsfaktor
Klimawandel	GWP	kg CO <sub>2</sub> eq	1,32E-04	2,11E-01
Ozonabbau	ODP	kg CFC-11 eq	1,91E+01	6,30E-02
Ionisierende Strahlung	IR	kBq U-235 eq	2,37E-04	5,00E-02
Photochemische Ozonbildung	POFP	kg NMVOC eq	2,45E-02	4,80E-02
Feinstaub	PM	Krankheitsinzidenz	1,68E+03	9,00E-02
Humantoxizität, nicht Krebs	HT_nc	CTUh	7,77E+03	1,80E-02
Humantoxizität, Krebs	HT_c	CTUh	5,80E+04	2,10E-02
Versauerung	AP	mol H+ eq	1,80E-02	6,20E-02
Eutrophierung, Süßwasser	EU_f	kg P eq	6,22E-01	2,80E-02
Eutrophierung, Meer	EU_m	kg N eq	5,12E-02	3,00E-02
Eutrophierung, terrestrisch	EU_t	mol N eq	5,66E-03	3,70E-02
Ökotoxizität, Süßwasser	ET	CTUe	1,76E-05	1,90E-02
Landnutzung	LU	Punkte	1,22E-06	7,90E-02
Wassernutzung	WU	m <sup>3</sup> entzogen	8,72E-05	8,50E-02
Ressourcennutzung, Fossil	RU_fo	MJ eq	1,54E-05	8,30E-02
Ressourcennutzung, Mineralien und Metalle	RU_m	kg Sb eq	1,57E+01	7,60E-02

### c) Sachbilanz

Für die Modellierung des Hintergrundsystems wird das „allocation and cut-off by classification“ Systemmodell der ecoinvent v3.9.1 Datenbank verwendet (Wernet et al. 2016). Im Folgenden werden die Sachbilanzen, aufgeteilt nach den Lebenszyklusphasen, erläutert.

#### Herstellungsphase

Tabelle 12 gibt einen Überblick über die verwendeten Sachbilanzdaten aller Anlagenkomponenten. Annahmen zu den Nutzungsdauern der Komponenten werden aus der Wirtschaftlichkeitsberechnung übernommen (Tabelle 7).

Die Daten von (Vignali 2017) repräsentieren einen modulierenden Gas-Brennwertboiler mit einer thermischen Leistung von 24 kW. Da das Gas-Brennwertgerät des EFHs und des MFHs eine thermische Leistung von 15 kW aufweist, werden die Sachbilanzdaten entsprechend der folgenden Formel skaliert:

$$S = S_{ref} \cdot \left( \frac{P}{P_{ref}} \right)^x$$

dabei ist  $S$  das zu bestimmende Sachbilanzinventar und  $P$  die Leistung. Entsprechend bezeichnen  $S_{ref}$  und  $P_{ref}$  die Referenzsachbilanzdaten bzw. die Referenzleistung (Bahlawan et al. 2019). Der Skalierungsexponent  $x$  hat gemäß der Economy of Scale einen Standardwert von 0,6, was für das Inventar des Gas-Brennwertgerätes in einem Korrekturfaktor von 0,75 resultiert (Caduff et al. 2014). Auf gleiche Weise werden die Daten des Pelletkessels, des Scheitholzvergaserkessels, des Hackschnitzelkessels und des Blockheizkraftwerkes angepasst, wobei das Blockheizkraftwerk entsprechend der elektrischen Leistung mit einem Skalierungsexponent von 0,64 korrigiert wird (Bahlawan et al. 2020). Der Wärmespeicher wird anhand des jeweiligen Volumeninhalts skaliert. Nach (Bahlawan et al. 2020) wird dafür ein Exponent von 0,81 verwendet. Das Inventar für die PV- und Solarthermieanlage wird linear entsprechend der Modul- bzw.

Kollektorfläche skaliert. Für die Dimensionierung des Wechselrichters werden 0,89 kW Wechselrichterleistung pro kWp angenommen (Stetz et al. 2011). Sowohl für die Komponenten der PV-Anlage als auch für das Blockheizkraftwerk werden zur Aufteilung der Umweltauswirkungen die in Arbeitspaket 2 entwickelten Allokationsfaktoren angewendet.

Die Sachbilanz für die Wärmepumpen von (Greening und Azapagic 2012) wird an das Gesamtgewicht der simulierten Wärmepumpen angepasst. Beispielsweise beträgt das Gewicht für die Luft-Wasser-Wärmepumpe des EFHs 255 kg, was zu einem Massenkorrekturfaktor von 1,21 führt (Vaillant 2023b). Darüber hinaus verwenden die betrachteten Wärmepumpen im Gegensatz zu (Greening und Azapagic 2012) das Kältemittel R-410A statt R-134a. Die Kältemittelfüllmengen entstammen von Herstellerangaben (Vaillant 2023b). R-410A ist ein Gemisch aus Difluormethan (R-32) und Pentafluorethan (R-125). Da die ecoinvent-Datenbank keinen Datensatz für R-125 enthält, wird stattdessen der Produktionsprozess von Hexafluorethan verwendet (Schleicher et al. 2020). Das Inventar für R-32 wird von (Jovell et al. 2022) übernommen, wobei der Multi-Output-Prozess durch eine ökonomische Allokation aufgelöst wird. Die Sachbilanzdaten der Erdwärmesonde werden entsprechend der Sondenlängen linear angepasst.

*Tabelle 12: Verwendete Sachbilanzdaten für die Herstellung der Anlagenkomponenten*

<b>Komponenten</b>	<b>Quelle der Sachbilanzdaten</b>
Gas-Brennwertgerät	(Vignali 2017)
Gas-Hausanschluss	ecoinvent 3.9.1
Pelletkessel	(Monteleone et al. 2015)
Pellet Brennstofflager	ecoinvent 3.9.1
Scheitholzvergaserkessel	ecoinvent 3.9.1
Hackschnitzelkessel	(Bauer 2007)
Hackschnitzel Brennstofflager	(Bauer 2007)
Blockheizkraftwerk	(Heck 2007)
Luft-Wasser-Wärmepumpe	(Greening und Azapagic 2012)
Sole-Wasser-Wärmepumpe	(Greening und Azapagic 2012)
Erdsonde	(Greening und Azapagic 2012)
Wasser-Wasser-Wärmepumpe	(Greening und Azapagic 2012)
Brunnen	(Greening und Azapagic 2012)
Eisspeicher	(Minder et al. 2016)
Solarthermieanlage	(Jungbluth 2007)
Wärmespeicher	(Jungbluth 2007)
Schornstein	ecoinvent 3.9.1
PV-Anlage	(Müller et al. 2021; Jungbluth et al. 2012)

## **Nutzungsphase**

In der Nutzungsphase werden die in Arbeitspaket 1 ermittelten Brennstoff- bzw. Strombedarfe inklusive der Vorketten der verschiedenen Heizsysteme berücksichtigt. Wie bereits in der Wirtschaftlichkeitsberechnung erfolgt, werden in der ökologischen Untersuchung der Heizsysteme sowohl ein Best-Case als auch ein Worst-Case-Szenario untersucht. Die Annahmen zu den Wirkungsgraden bzw. Jahresarbeitszahlen der Szenarien werden von der ökonomischen Bewertung übernommen (Tabelle 10).

Die wichtigsten Verbrennungsemissionen der Heizkessel sind pro MJ Brennstoffeinsatz in Tabelle 13 aufgeführt. Für die biomassebetriebenen Heizkessel sind die Kohlenstoffdioxid- und Methanemissionen

biogenen Ursprungs und daher in Klammern gegeben. Neben den in Tabelle 13 gelisteten Emissionen werden im Rahmen der ökologischen Untersuchung noch weitere Verbrennungsemissionen berücksichtigt, die jedoch der Übersicht halber hier nicht einzeln aufgeführt werden.

*Tabelle 13: Verbrennungsemissionen der Heizkessel pro MJ Brennstoffeinsatz*

Wärmeerzeuger	CO <sub>2</sub> [mg/MJ]	CO [mg/MJ]	CH <sub>4</sub> [mg/MJ]	NO <sub>x</sub> [mg/MJ]	Feinstaub [mg/MJ]
Erdgas-Brennwertgerät <sup>a</sup>	5,46E-02	4,17E-06	1,96E-06	7,22E-06	9,80E-08
Pelletkessel <sup>b</sup>	(1,18E-01)	6,00E-06	(4,88E-07)	7,30E-05	6,04E-06
Scheitholzvergaserkessel <sup>c</sup>	(1,40E-01)	6,85E-05	(2,14E-05)	1,14E-04	7,39E-06
Hackschnitzelheizung <sup>d</sup>	(1,46E-01)	8,73E-06	(1,29E-05)	6,31E-05	3,36E-06
Mini-BHKW <sup>e</sup>	5,46E-02	1,28E-04	4,30E-05	2,20E-05	1,50E-07

<sup>a</sup> (Vignali 2017; Faist-Emmenegger et al. 2007; Vaillant 2023a)

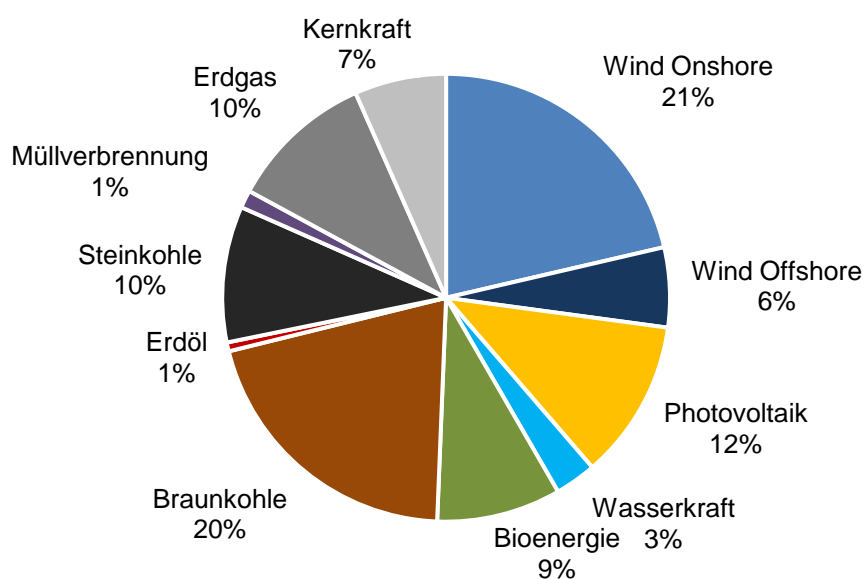
<sup>b</sup> (Monteleone et al. 2015; ÖkoFEN 2014; FNR 2020a)

<sup>c</sup> (Bauer 2007; FNR 2020b)

<sup>d</sup> (Bauer 2007; FNR 2017)

<sup>e</sup> (Heck 2007)

Für die ökobilanzielle Analyse des Stromverbrauchs der Wärmepumpensysteme wird ein Strommodell entwickelt, welches auf den stündlichen Stromerzeugungsdaten der ENTSO-E Transparency Plattform basiert (ENTSO-E). Für jede Erzeugungart werden die 5-Jahresmittel der jeweiligen Kapazitätsfaktoren berechnet. Die Kapazitätsfaktoren werden aus der Anzahl der Volllaststunden abgeleitet und stellen die relative Volllastauslastung in einem Jahr dar. Die gemittelten Kapazitätsfaktoren werden anschließend mit den dazugehörigen in Deutschland im Jahr 2022 installierten Leistungen multipliziert. Somit ergibt sich die in Abbildung 14 dargestellte Stromerzeugungsstruktur in Deutschland für das Jahr 2022. Die Verwendung von über 5 Jahre gemittelten Kapazitätsfaktoren gleicht jährliche Wetterschwankungen aus und ermöglicht somit die Analyse eines durchschnittlichen Jahres. Darüber hinaus beeinflussen spezifische Ereignisse wie die Covid-19-Pandemie oder der Ukraine-Krieg, die einen großen Einfluss auf die deutsche Stromerzeugungsstruktur hatten und haben, die Ökobilanzergebnisse nicht unverhältnismäßig stark.



*Abbildung 14: Zusammensetzung des in der ökologischen Bewertung verwendeten Strommixes für Deutschland*

Tabelle 14 zeigt die ecoinvent-Datensätze, die zur Modellierung der verschiedenen Energieumwandlungstechnologien verwendet werden. Da die ENTSO-e Transparency Plattform keine Anteile für die jeweiligen Energieumwandlungstechnologien bereitstellt, werden für jeden Energieträger die Anteile aus dem ecoinvent Marktdatensatz des deutschen Strommixes übernommen.

*Tabelle 14: ecoinvent-Datensätze, die zur Modellierung der Stromversorgung verwendet werden, mit den entsprechenden Anteilen der Energieumwandlungstechnologien*

<b>Energieträger</b>	<b>ecoinvent-Datensatz</b>	<b>Anteil [%]</b>
Biomasse	heat and power co-generation, biogas, gas engine - DE	83
	heat and power co-generation, wood chips, 6667 kW, state-of-the-art 2014 - DE	17
Braunkohle	electricity production, lignite - DE	97
	heat and power co-generation, lignite - DE	3
Erdgas	electricity production, natural gas, combined cycle power plant - DE	25
	electricity production, natural gas, conventional power plant - DE	15
	heat and power co-generation, natural gas, combined cycle power plant, 400MW electrical - DE	1
	heat and power co-generation, natural gas, conventional power plant, 100MW electrical - DE	59
Erdöl	electricity production, oil - DE	85
	heat and power co-generation, oil - DE	15
Kernkraft	electricity production, nuclear, boiling water reactor - DE	21
	electricity production, nuclear, pressure water reactor - DE	79
Müll	electricity, from municipal waste incineration to generic market for - CH	100
Solar	electricity production, photovoltaic, 3kWp slanted-roof installation, multi-Si, panel, mounted - DE	41
	electricity production, photovoltaic, 3kWp slanted-roof installation, single-Si, panel, mounted - DE	33
	electricity production, photovoltaic, 570kWp open ground installation, multi-Si - DE	26
Steinkohle	electricity production, hard coal - DE	82
	heat and power co-generation, hard coal - DE	18
Wasserkraft	electricity production, hydro, run-of-river - DE	84
	electricity production, hydro, reservoir, non-alpine region - DE	16
Wind Offshore	electricity production, wind, 1-3MW turbine, offshore - DE	100
Wind Onshore	electricity production, wind, <1MW turbine, onshore - DE	14
	electricity production, wind, >3MW turbine, onshore - DE	9
	electricity production, wind, 1-3MW turbine, onshore - DE	77

Neben dem Stromverbrauch wird während der Nutzungsphase der Wärmepumpensysteme berücksichtigt, dass jährlich 6 % des Kältemittels während des Betriebs der Wärmepumpen freigesetzt werden. Abgesehen

vom Nachfüllen des Kältemittels werden für alle Systeme keine weiteren Wartungsarbeiten im Rahmen der ökologischen Bewertung betrachtet.

### Verwertungsphase

Diese Phase bewertet die Verwertung der Anlagenkomponenten, welche sich in ihrer Lebensdauer unterscheiden (Tabelle 7). Wie bereits erwähnt, folgt die Studie dem Cut-off-Ansatz, d.h. recycelbare Materialien werden ohne Umweltbelastungen vom Produktsystem abgeschnitten.

Die EoL-Inventare wurden aus den entsprechenden Quellen zur Komponentenherstellung in Tabelle 12 übernommen. Jedoch werden die Sachbilanzen an die Recyclingraten einer Studie des deutschen Umweltbundesamtes angepasst (Umweltbundesamt 2016). Für Materialien, die in der Studie nicht erwähnt werden, wird angenommen, dass sie entweder vollständig verbrannt oder deponiert werden. In Tabelle 15 sind die berücksichtigten Recyclingraten und die Verwertungsmethode des nicht-recyclten Anteils zu sehen. Bezüglich des Kältemittels der Wärmepumpe werden die Annahmen von (Schleicher et al. 2020) übernommen. Sie gehen davon aus, dass bei der Verwertung von Wärmepumpen 40% des Kältemittels entweichen und 60% verbrannt werden.

*Tabelle 15: Übersicht der angenommenen Recyclingraten inklusiver Verwertungsmethoden des nicht-recyclten Anteils*

Material	Recyclingrate	Entsorgungsmethode
Aluminium	90 %	Deponierung
Edelstahl	95 %	Deponierung
Kunststoffe	0 %	Verbrennung
Kupfer	95 %	Deponierung
Stahl	90 %	Deponierung

#### d) Wirkungsabschätzung und Auswertung der Ökobilanz für das Einfamilienhaus

In Abbildung 15 sind die LCA-Ergebnisse der Heizsysteme des EFHs nach erfolgter Normierung und Gewichtung zu sehen. Die dargestellten Fehlerindikatoren repräsentieren die beiden zusätzlich betrachteten Szenarien.

Für biomassebasierte Heizungen sind die Ergebnisse mit und ohne Einbezug der biogenen Kohlenstoffdioxidemissionen, die während der Verbrennung der Holzbrennstoffe freigesetzt werden, gezeigt. Wie zu erkennen ist, hat die Betrachtungsweise einen großen Einfluss auf die Gesamtergebnisse. Fließt das biogene CO<sub>2</sub> mit in die Betrachtung, sind die Biomasseheizungen mit den höchsten Umweltauswirkungen verbunden. Demgegenüber weisen diese Heizungen bei einer Exklusion der biogenen Emissionen die niedrigsten Ergebnisse auf. Da sich die geographische Systemgrenze der Studie auf Deutschland bezieht, wird davon ausgegangen, dass die holzbasierten Feuerungskonzepte Energieholz aus einer nachhaltigen Waldwirtschaft beziehen. Das hat zur Folge, dass für das System Holz oST die geringsten Umweltauswirkungen zu beobachten sind. Jedoch liegen die Ergebnisse für die anderen biomassebasierten Systeme in einer ähnlichen Größenordnung. Die Emissionen biogener Herkunft werden nur exemplarisch bei der Auswertung der Ökobilanzergebnisse des EFHs dargestellt. Bei den nachfolgenden Betrachtungen werden diese nicht mehr ausgewiesen.

Die höchsten Emissionen sind für das System WP\_Luft und WP\_Eis vorzufinden. Für alle Wärmepumpensysteme führt die Kombination mit einer Photovoltaikanlage zu einer Reduktion der Umweltbelastungen. Der Klimawandel (GWP) hat den größten Einfluss auf die Ergebnisse der Gasheizungen und der Wärmepumpensysteme, außer auf das System mit Eisspeicher. Bei diesem weist die Ressourcennutzung mineralischer und metallischer Materialien (RU\_m) einen noch höheren Anteil an den Gesamtwirkungen auf.

Im Vergleich zu den anderen Systemen spielen die Partikelemissionen bei den Holzfeuerungen eine große Rolle. Bei Pellet oST sind die Feinstaubemissionen (PM) sogar der größte Treiber der Umweltwirkungen. Bei Holz oST ist die Landnutzung (LU) mit den höchsten Umweltbelastungen verbunden. Die Kombination der

beiden Holzfeuerungs-systeme mit einer Solarthermieanlagen ist aus ökologischer Sicht nachteilig, da der hohe Ressourcenverbrauch der Solarkollektoren die Gesamtergebnisse, trotz des verringerten Brennstoffbedarfs der Systeme, erhöht.

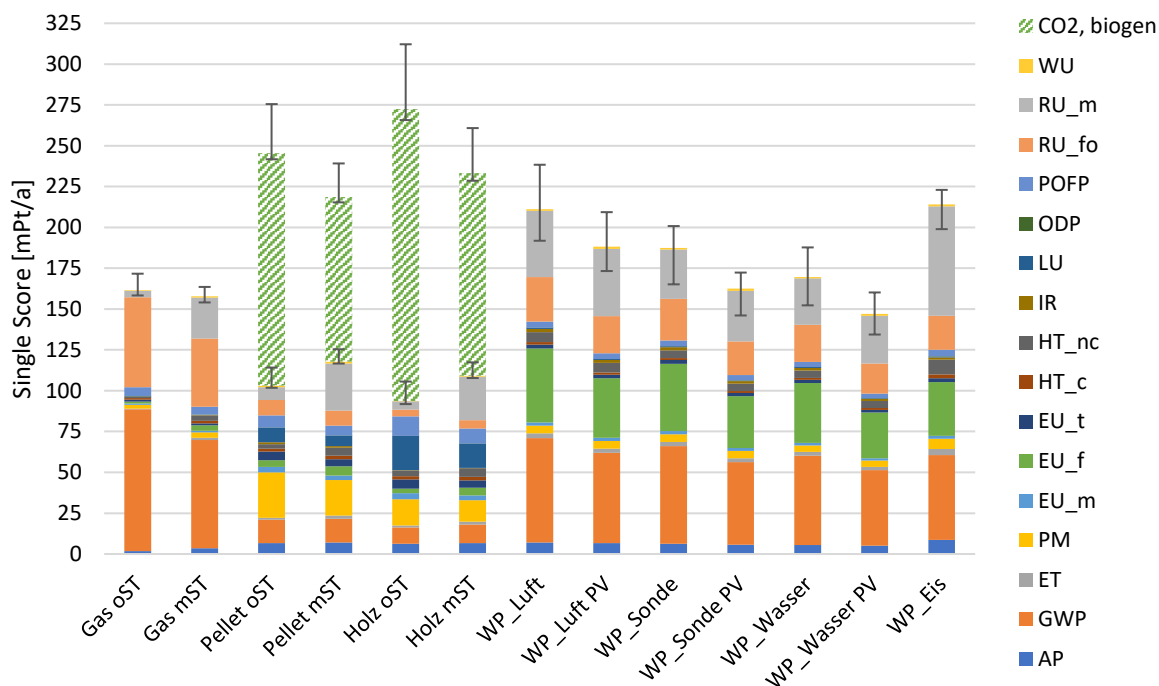


Abbildung 15: Single-Score Ergebnisse der Heizungssysteme des Einfamilienhauses, aufgeschlüsselt nach dem Beitrag der Wirkungskategorien

Abbildung 16 zeigt die Single-Score Ergebnisse der Heizungssysteme aufgeteilt nach den Lebenszyklusphasen. Es wird deutlich, dass die Nutzungsphase bei den meisten Systemen der größte Einflussfaktor ist. Nur für Holz mST und Pellet mST ist die Herstellung der Heizungen mit höheren Umweltauswirkungen verbunden, wobei für beide Systeme die Auswirkungen der Nutzungsphase auf einem ähnlichen Niveau sind. Die Umweltauswirkungen, die mit der Verwertungsphase verbunden sind, sind für alle Heizungssysteme vergleichsweise gering.

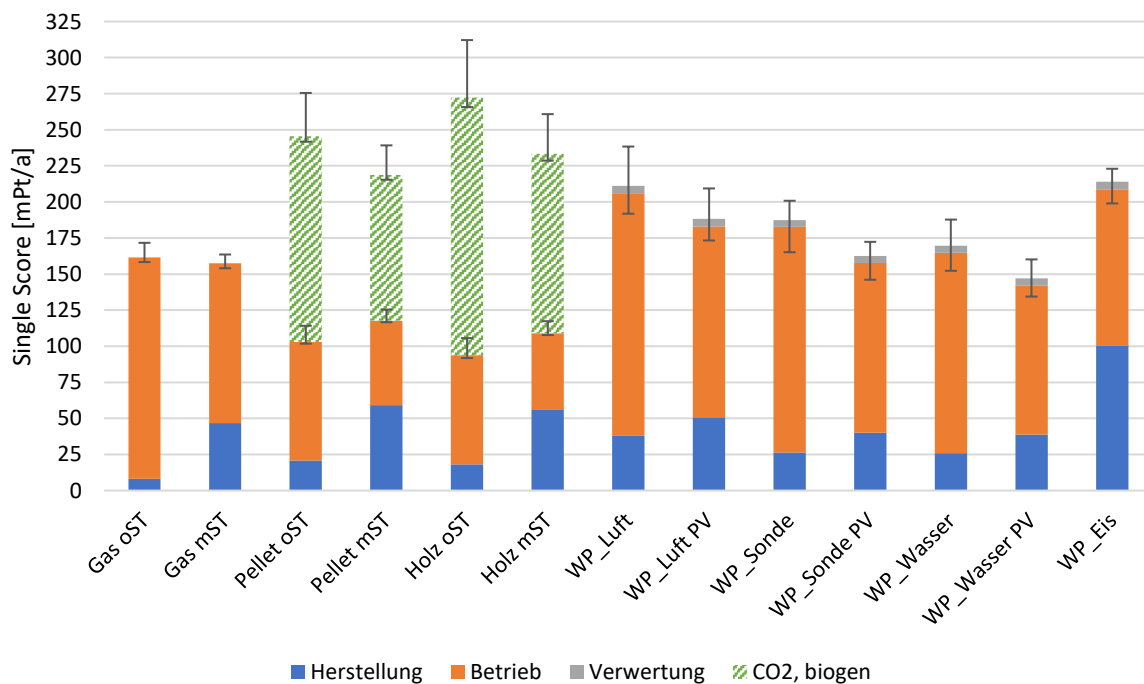


Abbildung 16: Single-Score Ergebnisse der Heizungssysteme des Einfamilienhauses, aufgeschlüsselt nach dem Beitrag der Lebenszyklusphasen

### e) Wirkungsabschätzung und Auswertung der Ökobilanz für das Mehrfamilienhaus

Für das MFH sind ähnliche Tendenzen festzustellen wie für die Ergebnisse des EFHs, wobei die niedrigsten Umweltauswirkungen bei Hack oST, Holz oST und Hack mST zu beobachten sind (Abbildung 17). Die höchsten Umweltwirkungen treten bei WP\_Luft, WP\_Luft PV und WP\_Sonde auf. Bei 9 von 16 Heizsystemen hat der Ausstoß von klimawirksamen Gasen den größten Einfluss auf die Umweltwirkungen. Dies betrifft die Gasheizungen sowie alle Wärmepumpensysteme.

Die Biomasseheizungen ohne solare Unterstützung werden von den Auswirkungen der Landnutzung (LU) und der Feinstaubemissionen (PM) dominiert. Eine Kombination mit einer Solarthermieanlagen führt in allen Fällen zu einer Erhöhung der Gesamtumweltauswirkungen. Bei allen Systemen mit solarer Heizungsunterstützung hat dadurch der Ressourcenverbrauch von Mineralien und Metallen den größten Einfluss.

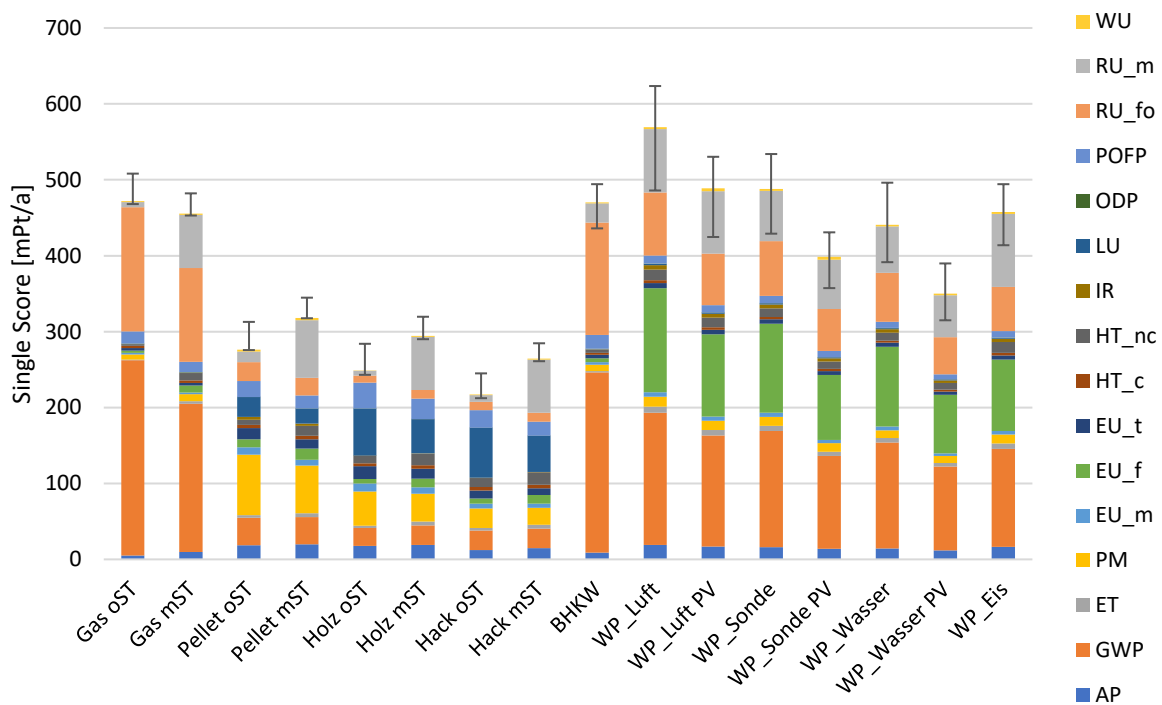


Abbildung 17: Single-Score Ergebnisse der Heizungssysteme des Mehrfamilienhauses, aufgeschlüsselt nach dem Beitrag der Wirkungskategorien

Im Vergleich mit den Ergebnissen des EFHs ist festzustellen, dass die Nutzungsphase eine noch größere Rolle für die gesamten Umweltbelastungen der Heizungssysteme des MFHs spielt. So werden die Ergebnisse von 15 Heizsystemen von der Nutzungsphase dominiert (Abbildung 18). Lediglich bei der Hackschnitzelheizung in Kombination mit einer Solarthermieanlage hat die Herstellung einen größeren Einfluss. Für das System WP\_Eis sowie alle Systeme mit solarer Heizungsunterstützung zeigt sich, dass die Herstellungsphase einen signifikanten Einfluss (> 20 %) auf die gesamte Umweltwirkungen der Heizungssysteme haben. Alle anderen Systeme unterschreiten einen Anteil von 20 % der Herstellungsphase am Gesamtergebnis.

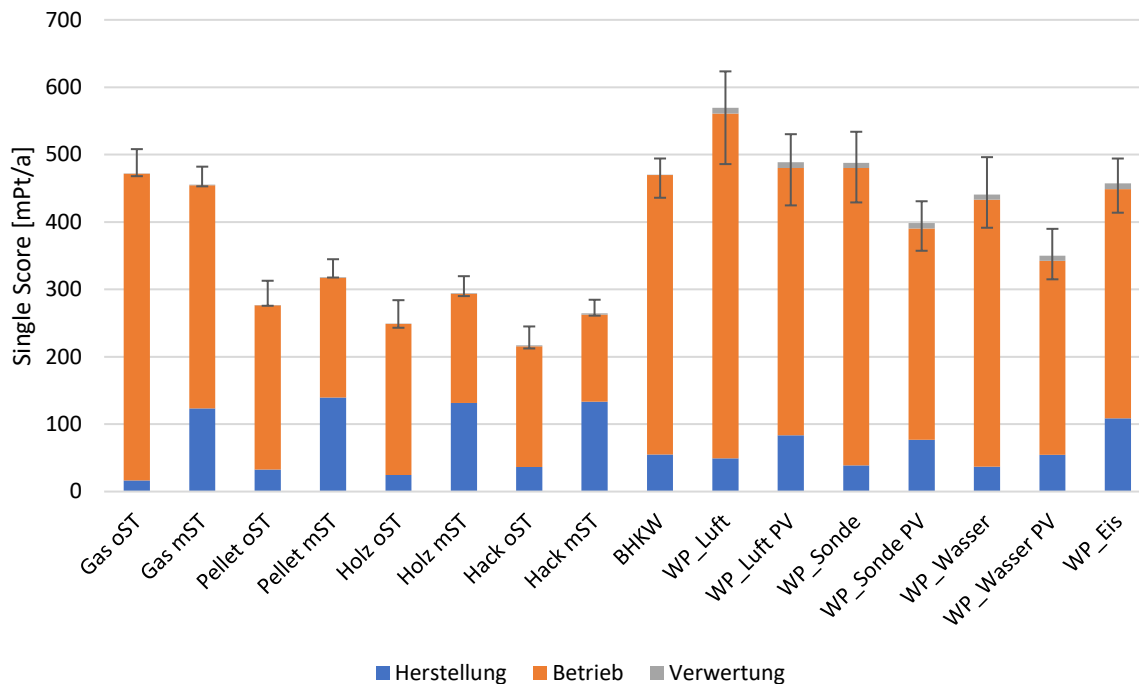


Abbildung 18: Single-Score Ergebnisse der Heizungssysteme des Mehrfamilienhauses, aufgeschlüsselt nach dem Beitrag der Lebenszyklusphasen

## Arbeitspaket 5: Ökoeffizienz und dynamische Ökobilanz

### a) Dynamische Ökobilanzierung

Die in Arbeitspaket 4 erstellten Ökobilanzen basieren auf statischen Ökobilanzmodellen. Die statische Betrachtungsweise hat zur Folge, dass die Systeme basierend auf den Umweltwirkungen mit Stand 2022 bilanziert werden und zukünftige Entwicklungen, z.B. in der Energiebereitstellung, keine Berücksichtigung finden. Vor allem für die Wärmepumpensysteme kann diese Annahme eine Verzerrung der realen Umweltwirkungen darstellen, da die Nutzungsphase und damit die Bereitstellung des Stroms in diesen Systemen einen großen Anteil an den gesamten Umweltwirkungen hat. Bei der Nutzungsphase gilt es zu beachten, dass sich diese über 20 Jahre erstreckt – folglich unterliegt die Nutzungsphase einer einem gewissen Wandel, welchem anhand der dynamischen Betrachtungsweise Rechnung getragen wird.

Damit Deutschland das Ziel der Treibhausgasneutralität bis zum Jahr 2045 erreichen kann, muss die Stromerzeugung aus erneuerbaren Energieträgern erfolgen. Somit ist von einem stetigen Ausbau der erneuerbaren Stromerzeugung in den kommenden Jahren auszugehen. Es ist notwendig, diesen Wandel in der Ökobilanzierung zu berücksichtigen, da sonst falsche Schlussfolgerungen getroffen werden können. Das Ziel der dynamischen Ökobilanzierung ist es daher, diese sich stetig veränderbaren Rahmenbedingungen zu berücksichtigen. Dadurch lassen sich die Umweltauswirkungen von Heizsystemen bestimmen, welche im Jahr 2022 installiert werden und anschließend 20 Jahre in Betrieb sind.

Die im dynamischen Ökobilanzmodell berücksichtigte Stromerzeugungsstruktur basiert auf der Studie „Klimaneutrales Deutschland 2045“, welche im Auftrag der Stiftung Klimaneutralität, Agora Energiewende und Agora Verkehrswende durchgeführt wurde (Prognos et al. 2021). Darin werden Prognosen zur Stromzusammensetzung in den Jahren 2025, 2030, 2035 und 2040 gegeben. In Abbildung 19 sind diese zusammen mit dem im statischen Ökobilanzmodell entwickelten Strommix für 2022 dargestellt. Es ist deutlich zu erkennen, dass insbesondere die Stromerzeugung aus Windkraft- und Photovoltaikanlagen bis zum Jahr 2040 stark anwächst. Demgegenüber wird in der Studie ein Kohleausstieg bis zum Jahr 2030 angenommen. Im dynamischen Ökobilanzmodell wird die Stromzusammensetzung der dazwischen liegenden Jahre linear interpoliert.

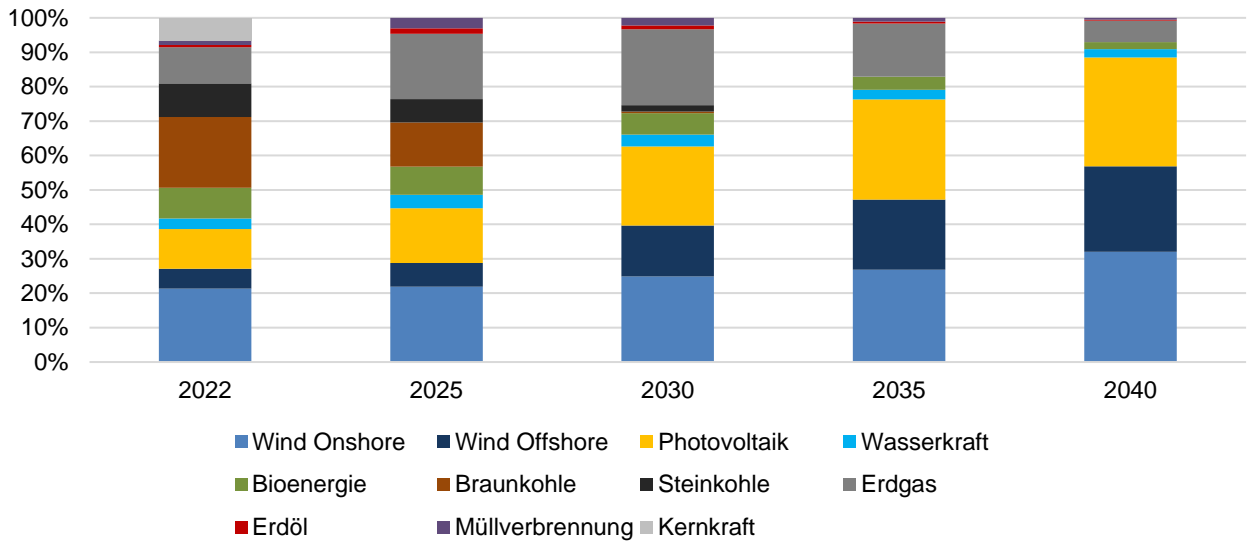


Abbildung 19: Stromzusammensetzung des dynamischen Ökobilanzmodells

Wie in Abbildung 20 am Beispiel des EFHs zu erkennen ist, führt die Verwendung eines dynamischen Strommixes zu erheblichen Reduktionen der Umweltauswirkungen der strombetriebenen Heizsysteme. Für das System WP\_Eis fällt die Reduktion mit 20 % am niedrigsten aus. Mit 34 % ist der größte Unterschied von dynamischer und statischer Betrachtung für die Sole-Wasser-Wärmepumpe zu beobachten. Die Ergebnisse verdeutlichen die Notwendigkeit einer dynamischen Ökobilanzierung. Für die brennstoffbasierten Systeme ergeben sich keine Unterschiede durch die dynamische Betrachtung, da davon ausgegangen wird, dass die Gewinnung sowie Herstellung der Brennstoffe in den nächsten Jahren vergleichsweise geringfügigen Änderungen unterworfen ist.

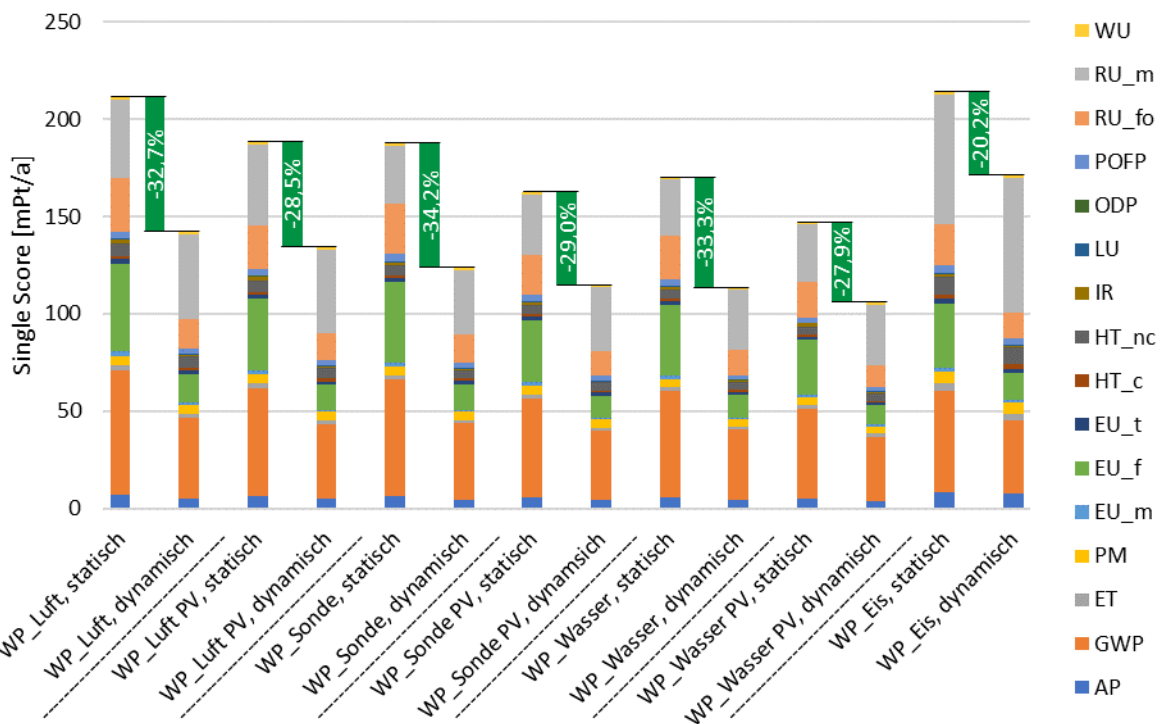


Abbildung 20: Statische versus dynamische Ökobilanzergebnisse der Wärmepumpensysteme des Einfamilienhauses

## b) Ergebnisse der dynamischen Ökobilanzierung des Einfamilienhauses

Die Ergebnisse für Heizungen mit Brennstoffeuerung sind gegenüber der statischen Modellierung unverändert. Jedoch reduziert die Einführung des dynamischen Strommixes die Umweltauswirkungen der Wärmepumpensysteme (siehe Abbildung 21). Die niedrigsten Ergebnisse sind für Holz oST, Pellet oST und WP\_Wasser PV festzustellen. Die Fehlerindikatoren dieser Systeme überlagern, sodass keine eindeutige

Aussage möglich ist, welches Heizungssystem mit den niedrigsten Umweltbelastungen einhergeht. Jedoch sind 6 Heizsystemen in allen Szenarien mit höheren Umweltauswirkungen verbunden: Gas oST, Gas mST, Pellet mST, WP\_Luft, WP\_Luft PV und WP\_Eis. Während die Ergebnisse der Gasheizungen von den Klimaauswirkungen und dem fossilen Ressourcenverbrauch bestimmt werden, sind bei den Wärmepumpensystemen der Ressourcenverbrauch von Mineralen und Metallen sowie der Klimawandel dominierend. Bei den Biomasseheizungen ohne Solarthermie sind die Partikelemissionen der größte Einflussfaktor. Die Erweiterung um eine Solarthermieanlage geht mit einem hohen Ressourcenverbrauch einher, sodass diese Kategorie am höchsten ist.

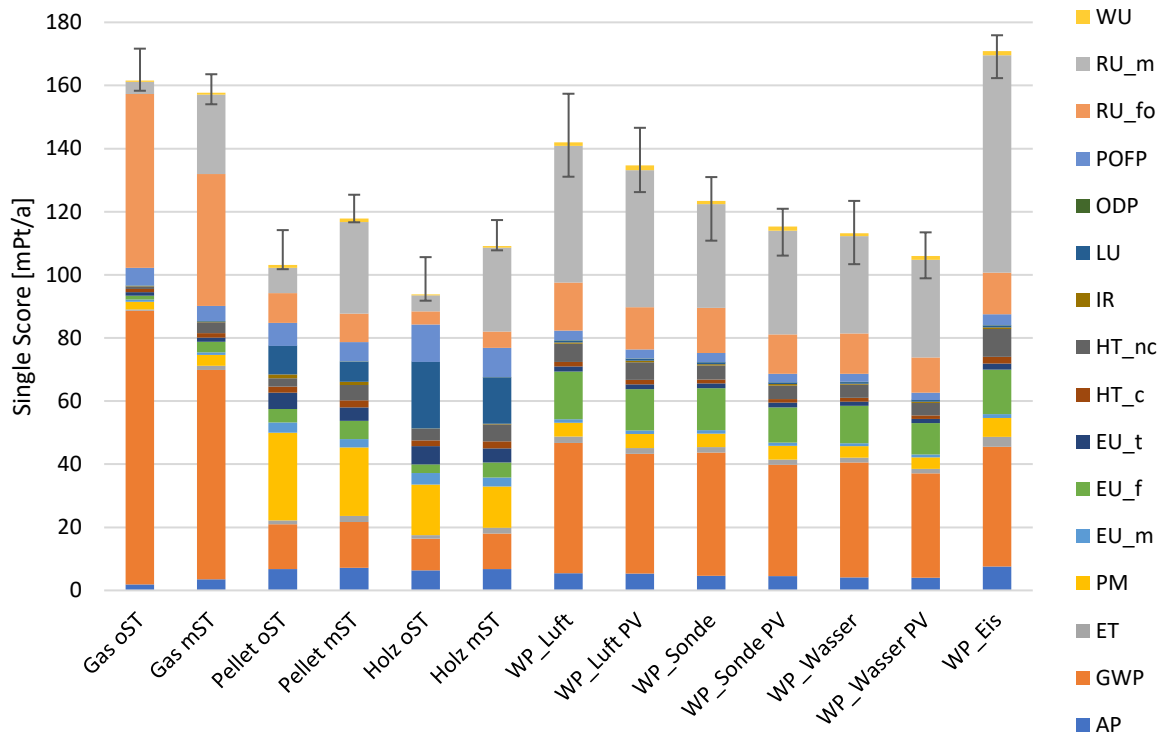


Abbildung 21: Single-Score Ergebnisse der dynamischen Ökobilanzierung der Heizungssysteme des Einfamilienhauses, aufgeschlüsselt nach dem Beitrag der Wirkungskategorien

Von den 13 betrachteten Heizsystemen hat die Nutzungsphase in 10 den größten Einfluss (siehe Abbildung 22). Lediglich bei Pellet mST, Holz mST und WP\_Eis ist der Einfluss der Herstellungsphase größer. Bei den Wärmepumpensystemen hat mit über 90 % der Strom den größten Einfluss auf die Nutzungsphase. Dementsprechend können die Umweltauswirkungen dieser Systeme erheblich reduziert werden, wenn die Stromversorgung auf erneuerbaren Energieträgern basiert. Bei den Heizungen mit Brennstofffeuerung sind die Umweltwirkungen der Nutzungsphase sowohl auf die Gewinnung und Bereitstellung der Brennstoffe als auch deren Verbrennung zurückzuführen. Der jeweilige Anteil unterscheidet sich je nach Heizung. Für Erdgas und Scheitholz haben Brennstoffbereitstellung und -verbrennung etwa die gleichen Auswirkungen. Bei den Pelletheizungen verursacht die Pelletherstellung sogar 70 % der Umweltbelastungen der Nutzungsphase.

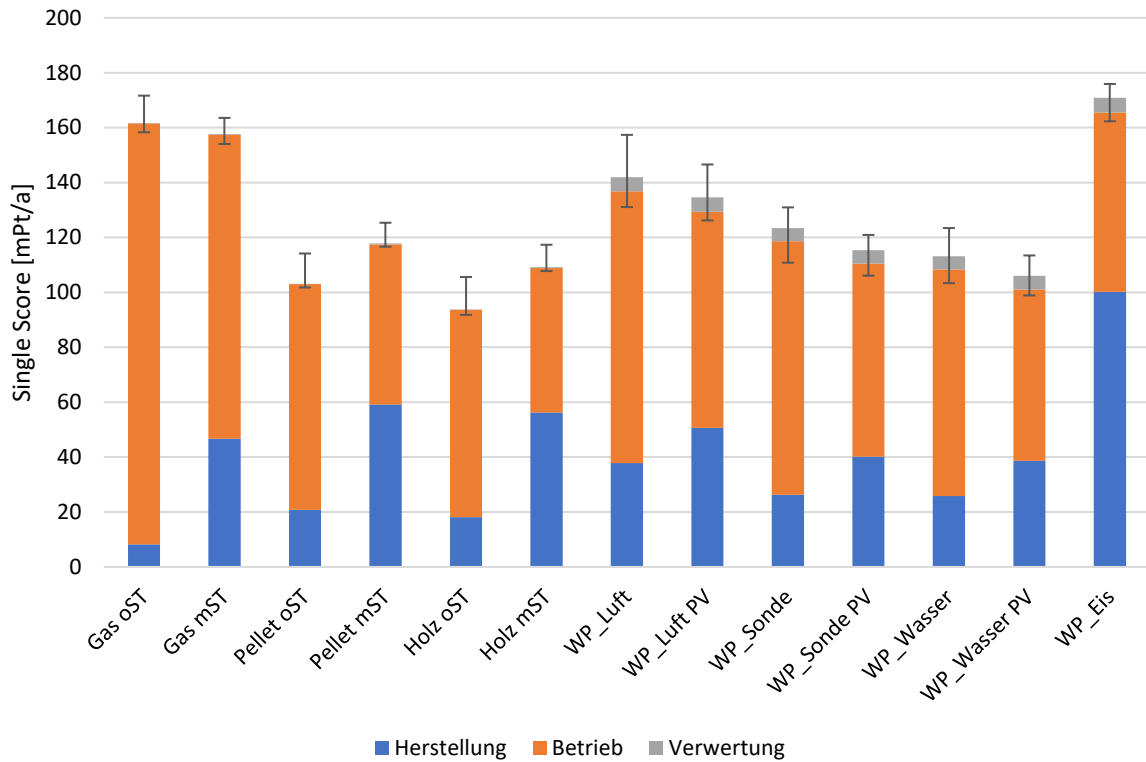


Abbildung 22: Single-Score Ergebnisse der dynamischen Ökobilanzierung der Heizungssysteme des Einfamilienhauses, aufgeschlüsselt nach dem Beitrag der Lebenszyklusphase

Abbildung 23 zeigt die klimaschädlichen Auswirkungen der betrachteten Heizsysteme. Bei einer nicht-nachhaltigen Forstwirtschaft wären die Biomasseheizungen mit dem höchsten Ausstoß von Treibhausgasen verbunden. Da in Deutschland die Waldwirtschaft jedoch unter dem Gesichtspunkt der Nachhaltigkeit verfolgt wird, und somit das bei der Verbrennung freigesetzte biogene CO<sub>2</sub> nicht beachtet wird, haben diese Heizungen das geringste GWP. Während der Treibhausgasausstoß der Gasheizungen nahezu vollständig aus der Erdgasbereitstellung und -verbrennung stammt, ist bei den Wärmepumpensystemen die Strombereitstellung in der Nutzungsphase der Hauptemittent. Dabei ist zu beobachten, dass die Größenordnung der Emissionen der Wärmepumpensysteme ähnlich ist.

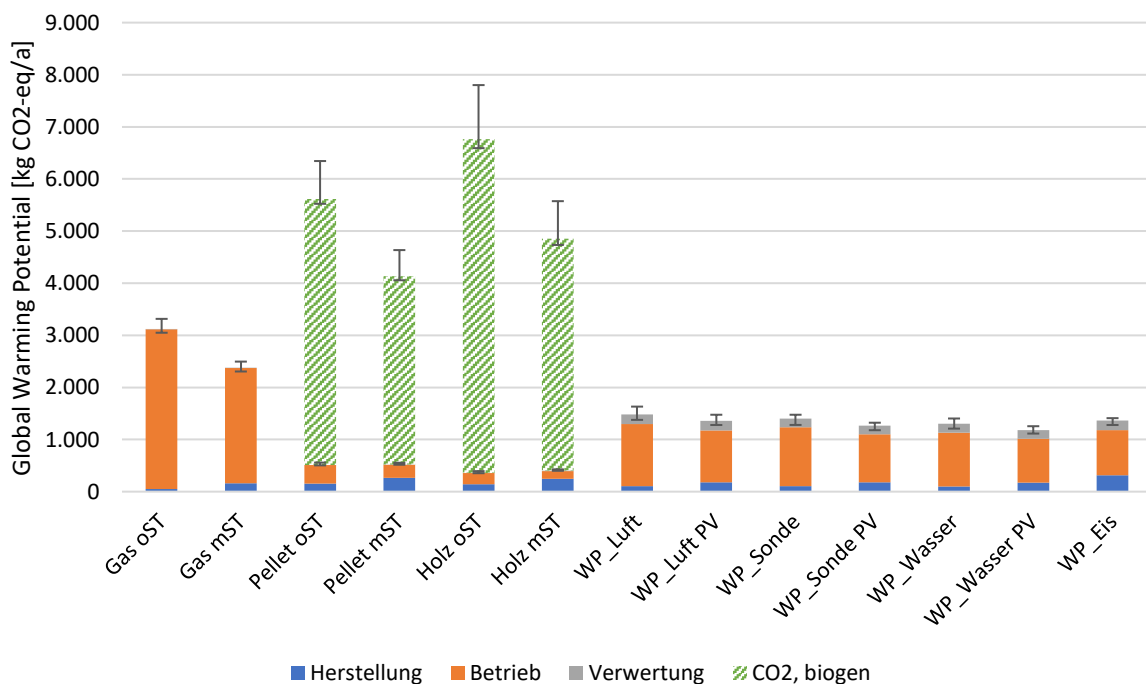


Abbildung 23: Treibhausgasemissionen der Heizsysteme des Einfamilienhauses

Feinstaubemissionen treten besonders bei den Holzfeuerungen auf. Zwar unterschreiten alle Biomasseheizungen den in der BImSchV vorgegeben Grenzwert bei weitem, trotzdem ist der Ausstoß von Feinstaubpartikeln im Vergleich zu den anderen Heizungssystemen um ein Vielfaches höher (Abbildung 24). Obwohl bei der Verbrennung von Pellets weniger Feinstaub als bei der Verbrennung von Scheitholz emittiert wird, sind höhere Emissionen bei der Pelletheizung festzustellen. Das ist auf die höheren Partikelemissionen in der Vorkette, das heißt bei der Pelletproduktion, zurückzuführen, deren Auswirkungen der Nutzungsphase zugeordnet werden. Für beide Biomassekessel ist die Kombination mit einer Solarthermieanlage hinsichtlich der Feinstaubemissionen vorteilhaft.

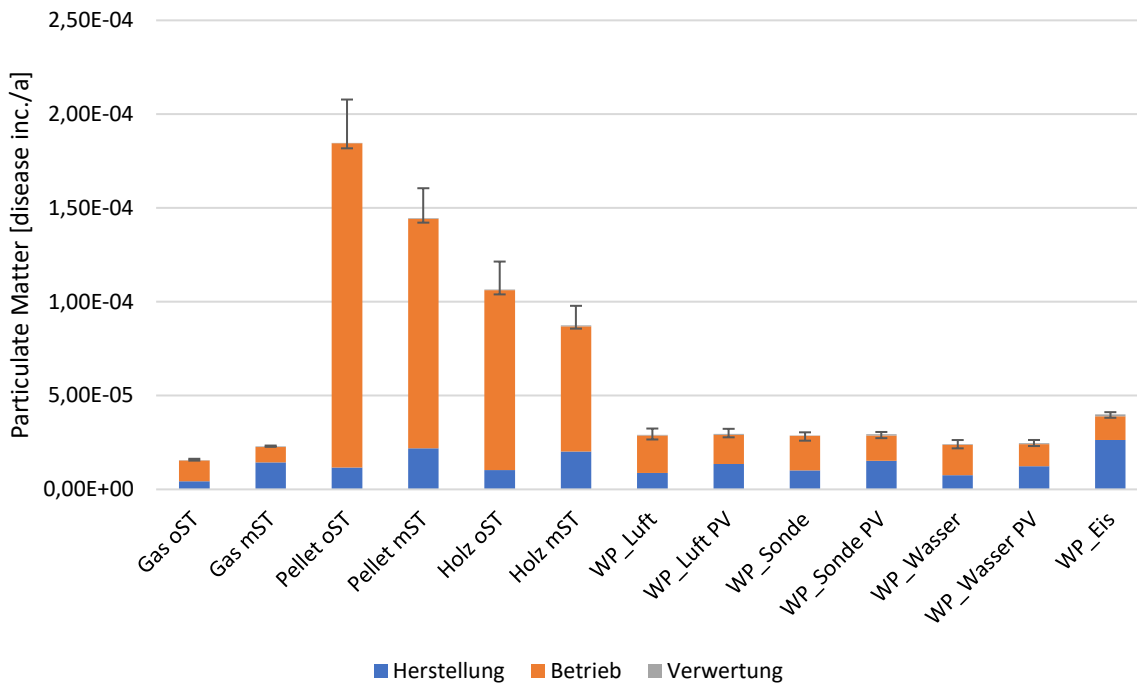


Abbildung 24: Feinstaubemissionen der Heizsysteme des Einfamilienhauses

Hinsichtlich des Ressourcenverbrauchs von Mineralien und Metallen sind die niedrigsten Ergebnisse für Brennstofffeuerungen festzustellen (Abbildung 25). Jedoch erhöht sich deren Ressourcenverbrauch durch die Kombination mit Solarkollektoren. Insgesamt ist bei 11 von 13 Heizsystemen der Verbrauch der Ressourcen während der Herstellung der Komponenten dominierend. Der höchste Verbrauch ist für das Eisspeicher-Wärmepumpensystem festzustellen, was hauptsächlich auf die Produktion der Solarkollektoren zurückzuführen ist. Im Vergleich zu den Brennstofffeuerungen mit Solarthermie sind bei dem Eisspeichersystem doppelt so viele Kollektoren verbaut, womit die extremen Unterschiede der absoluten Ergebnisse zu erklären sind. Im Gegensatz zu den Brennstofffeuerungen entstehen bei den Wärmepumpensystemen bis zu 50 % der Auswirkungen in dieser Wirkungskategorie aus dem Betrieb der Anlagen. Das ist hauptsächlich auf die Strombereitstellung aus erneuerbaren Energiequellen zurückzuführen, da vor allem die Solar- und Windstromerzeugung mit einem hohen Metall- und Mineralienverbrauch einhergeht.

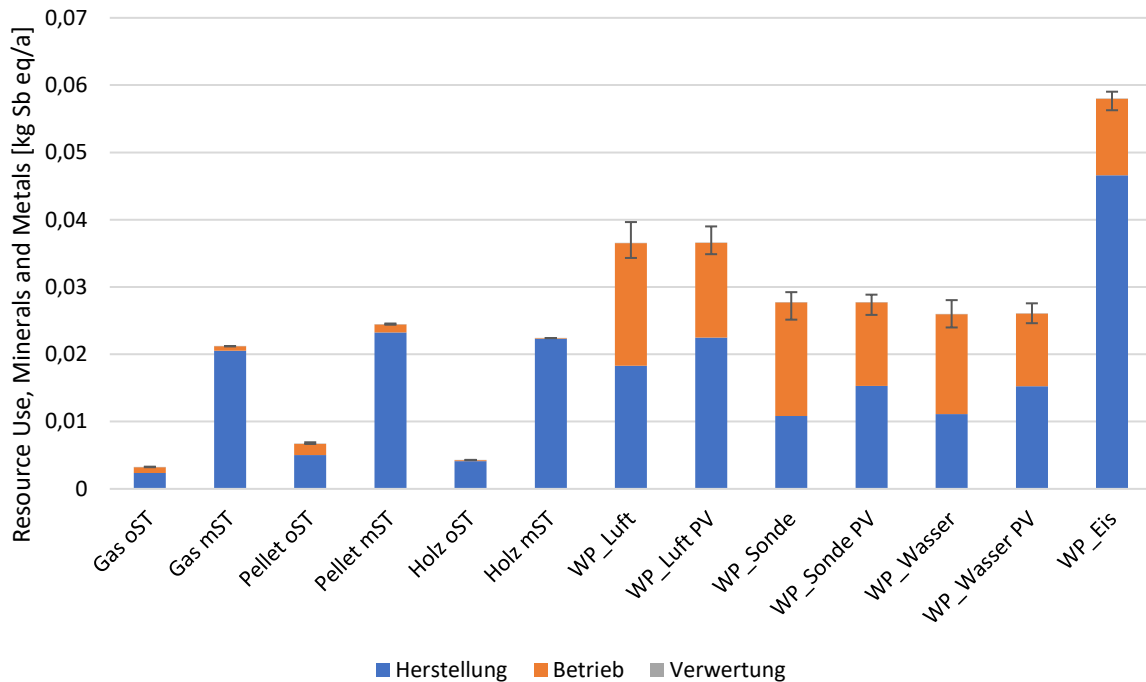


Abbildung 25: Ressourcenverbrauch von Mineralien und Metallen der Heizsysteme des Einfamilienhauses

### c) Ergebnisse der dynamischen Ökobilanzierung des Mehrfamilienhauses

Die gewichteten und normierten LCA-Ergebnisse der Heizsysteme des MFHs sind in Abbildung 26 zu sehen. Hack oST, WP\_Wasser PV und Holz oST weisen insgesamt die niedrigsten Ergebnisse auf. In allen Szenarien haben diese Systeme geringere Umweltauswirkungen als folgende 8 Systeme: Gas oST, Gas mST, Pellet mST, Holz mST, BHKW, WP\_Luft, WP\_Luft PV und WP\_Eis.

Die höchsten Ergebnisse sind für die drei gasbetriebenen Systeme festzustellen: Gas oST, BHKW und Gas mST. Die Auswirkungen dieser Systeme werden von dem Gasverbrauch und der damit einhergehenden Emission klimaschädlicher Gase und dem Verbrauch fossiler Ressourcen dominiert. Der Klimawandel hat zusammen mit dem Ressourcenverbrauch von Metallen und Mineralien den größten Einfluss auf die Ergebnisse der Wärmepumpensysteme. Bei den Biomassefeuerungen sind die Feinstaubemissionen sowie die Landnutzung die größten Einflussfaktoren. Wie auch beim EFH führt die Kombination der Holzfeuerungen mit Solarkollektoren aufgrund des Ressourcenverbrauchs zu höheren Umweltauswirkungen.

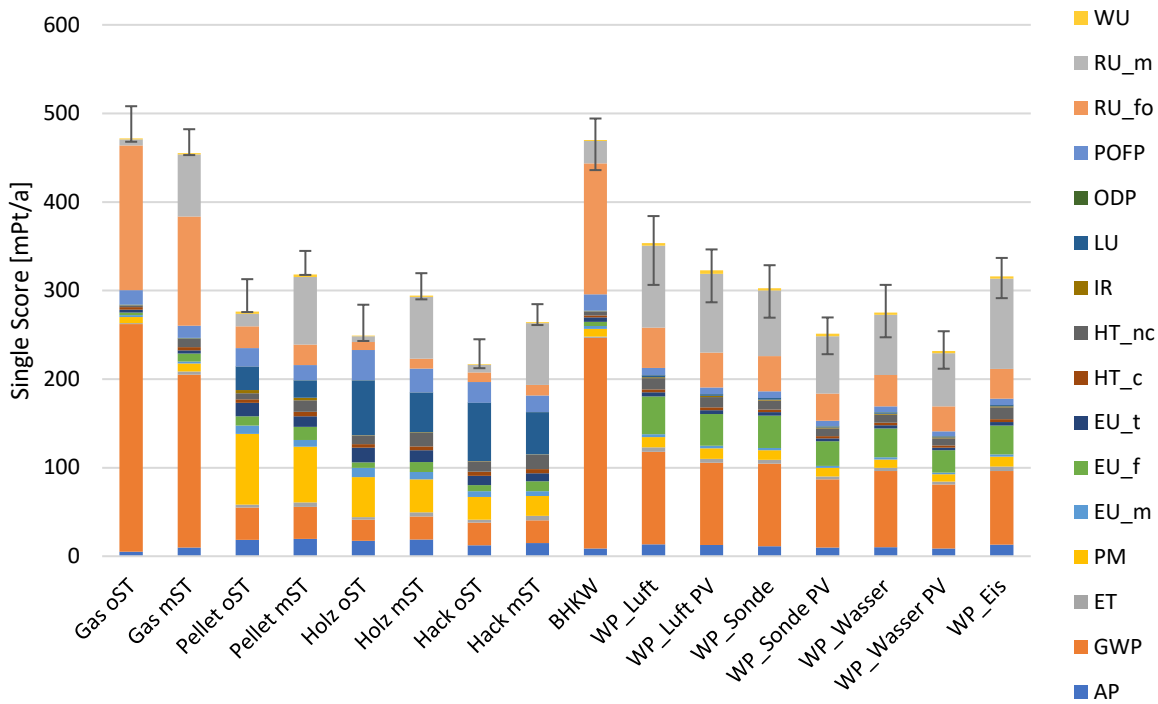


Abbildung 26: Single-Score Ergebnisse der dynamischen Ökobilanzierung der Heizungssysteme des Mehrfamilienhauses, aufgeschlüsselt nach dem Beitrag der Wirkungskategorien

In Abbildung 27 sind die Single-Score Ergebnisse für das MFH nach den Lebenszyklusphasen aufgeschlüsselt. Bei 15 von 16 Systemen gehen mit dem Betrieb der Heizsysteme die größten Umweltauswirkungen einher. Bei der Hälfte der Systeme beträgt der Anteil sogar über 80 %: Gas oST, Pellet oST, Holz oST, Hack oST, BHKW, WP\_Luft, WP\_Sonde und WP\_Wasser. Lediglich bei der Hackschnitzelheizung mit einer Solarthermieanlage sind die Auswirkungen der Herstellungsphase am größten. Der Einfluss der Verwertungsphase ist bei allen Systemen sehr gering. Für 9 Systeme trägt die EoL-Phase zu weniger als 1 % der Umweltauswirkungen bei. Für die Wärmepumpensysteme sind zwar etwas höhere Auswirkungen festzustellen, jedoch beträgt der maximale Einfluss der Verwertung auf die Gesamtergebnisse nur 3,4 % (WP\_Wasser PV).

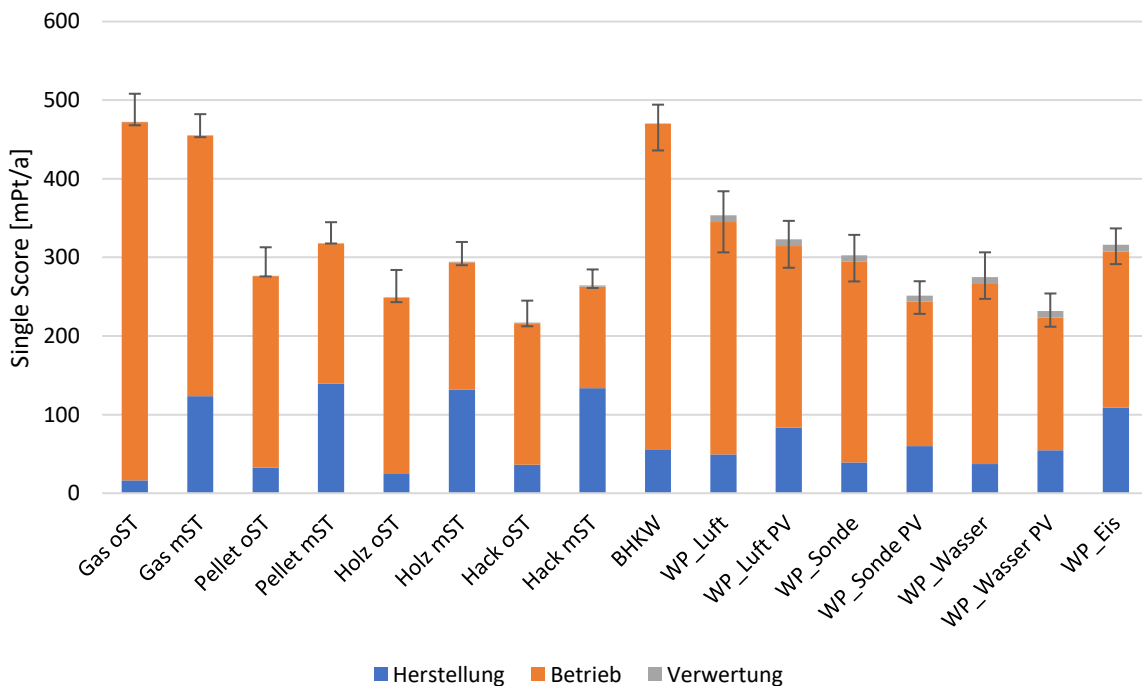


Abbildung 27: Single-Score Ergebnisse der dynamischen Ökobilanzierung der Heizungssysteme des Mehrfamilienhauses, aufgeschlüsselt nach dem Beitrag der Lebenszyklusphasen

Wie auch schon beim EFH haben die Holzfeuerungen des MFHs das geringste Klimawandelpotential (Abbildung 28). Die höchsten Treibhausgasemissionen können für die gasbetriebenen Heizungen festgestellt werden. Während des Betriebes dieser Heizungen werden 95 % der Treibhausgase emittiert. Von den 95 % ist wiederum der Großteil auf direkte Emissionen bei der Erdgasverbrennung zurückzuführen. Die Erdgasbereitstellung wird auch der Nutzungsphase zugeschrieben und ist für etwa 20 % der Treibhausgasemissionen dieses Lebenszyklus verantwortlich.

Bei den Wärmepumpensystemen ist das niedrigste Treibhausgaspotential für die Grundwasserwärmepumpe in Kombination mit einer PV-Anlage festzustellen. Demgegenüber weist die Luft-Wasser-Wärmepumpe das höchste Potential auf. Bei allen Systemen stammen etwa 80 % der Treibhausgasemissionen aus der Strombereitstellung. Die Kombination mit einer PV-Anlage führt bei allen Wärmepumpensystemen zu einer Reduktion des Treibhausgasausstoßes.

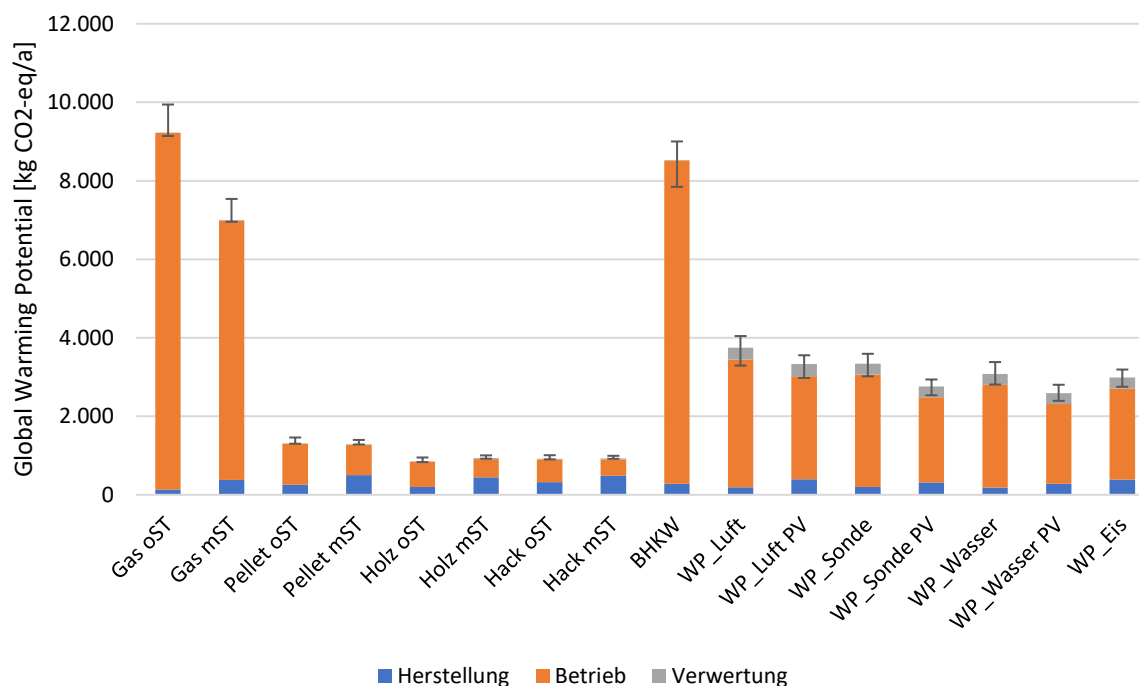


Abbildung 28: Treibhausgasemissionen der Heizsysteme des Mehrfamilienhauses

In Abbildung 29 sind die Feinstaubemissionen der Heizsysteme des MFHs, aufgeschlüsselt nach den Lebenszyklusphasen, dargestellt. Die Systeme mit Holzfeuerungen gehen mit einem vergleichsweise hohem Feinstaubausstoß einher. Diese treten bei diesen Systemen größtenteils als Direktemissionen bei der Verbrennung der Brennstoffe auf. Da die Kombination mit einer Solarthermieanlage den Brennstoffbedarf dieser Systeme reduziert, führt dies dementsprechend auch zu einer Reduktion der Feinstaubemissionen. Die höchsten Ergebnisse sind für den Pelletkessel festzustellen. Das ist auf die hohen Staubemissionen bei der Pelletproduktion zurückzuführen, die insgesamt 60 % der Gesamtemissionen verursachen. Demgegenüber wird bei der Produktion von Hackschnitzel kaum Feinstaub emittiert, womit die niedrigeren Ergebnisse für die Hackschnitzelsysteme zu erklären sind.

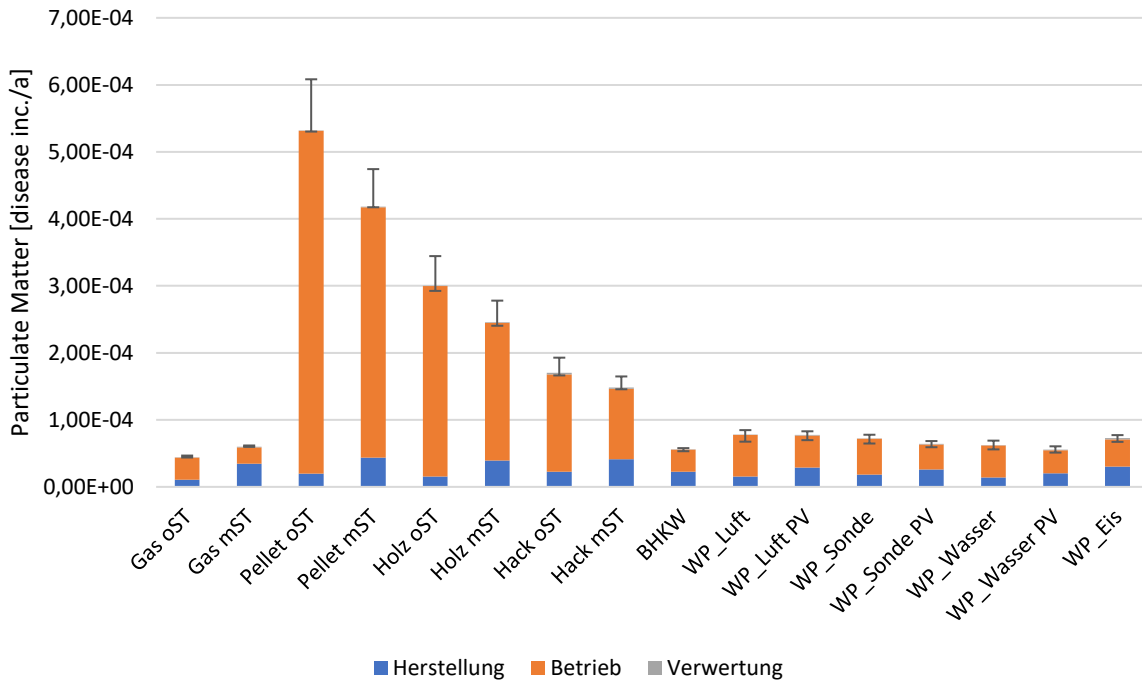


Abbildung 29: Feinstaubemissionen der Heizsysteme des Mehrfamilienhauses

Das Eisspeicher-Wärmepumpensystem weist den höchsten Ressourcenverbrauch von Mineralien und Metallen auf (siehe Abbildung 30), wofür größtenteils die Herstellung der Solarkollektoren verantwortlich ist. Bei den anderen Wärmepumpensystemen stammt der Ressourcenverbrauch hauptsächlich aus dem Betrieb der Wärmepumpen, was auf den hohen Mineralien- und Metallverbrauch der Solar- und Windstromerzeugung zurückzuführen ist.

Der Bedarf an mineralischen und metallischen Ressourcen der Heizungen mit Brennstoffeuerung sind auf einem vergleichsweise niedrigen Niveau. Die Verwendung einer Solarthermieanlage erhöht jedoch den Ressourcenverbrauch stark.

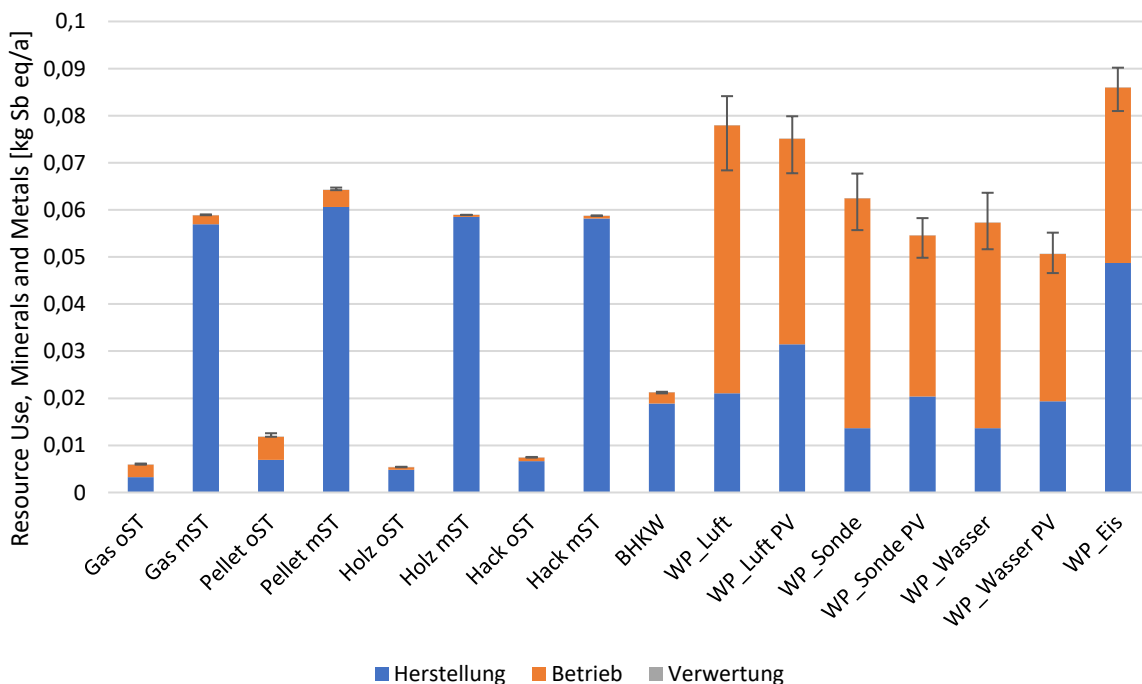


Abbildung 30: Ressourcenverbrauch von Mineralien und Metallen der Heizsysteme des Mehrfamilienhauses

#### d) Methode der Ökoeffizienzanalyse

Die LCA-Methode bildet die Auswirkungen einer Technologie auf die Umwelt ganzheitlich ab. Dabei vernachlässigt sie jedoch andere Dimensionen, die für eine nachhaltige Entwicklung von Bedeutung sind. Eine weitere wichtige Dimension sind die ökonomischen Auswirkungen eines Produktes oder einer Dienstleistung. Die Verbindung von ökologischen und ökonomischen Faktoren findet in der Ökoeffizienzbewertung statt. Das Ziel der Ökoeffizienzbewertung liegt darin, ökologische und ökonomische Aspekte in einer Kennzahl, der Ökoeffizienz, zu verbinden. Diese Methode ist in der DIN EN ISO Norm 14045 grundlegend standardisiert und definiert die in Abbildung 31 abgebildeten Schritte zur Durchführung einer Ökoeffizienzbewertung (DIN 2012).

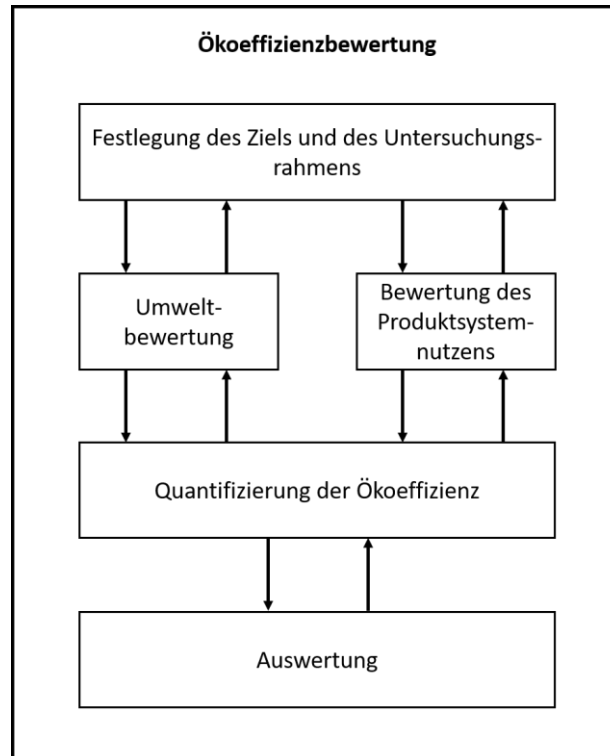


Abbildung 31: Schematischer Aufbau und Ablauf einer Ökoeffizienzbewertung nach DIN EN ISO 14045

Dabei bildet wie auch in der LCA die Festlegung des Ziels und des Untersuchungsrahmens die Grundlage. Darauf aufbauend wird eine Umweltbewertung sowie die Bewertung des Produktsystemnutzens durchgeführt. Für die Bewertung des Produktsystemnutzens können verschiedene Aspekte, wie beispielsweise funktionelle, monetäre oder auch ästhetische Faktoren, herangezogen werden. In den meisten Fällen wird der Produktsystemnutzen jedoch den ökonomischen Auswirkungen eines Produktes oder einer Dienstleistung gleichgesetzt.

Die Ökoeffizienz eines Produktes ergibt sich letztlich indem ökologische und ökonomische Kennzahlen in Relation gesetzt werden. Anhand der Ökoeffizienz können verschiedene Produkte und Szenarien untereinander verglichen und so die ökoeffizienteste Option bestimmt werden. Eine absolute Aussage mit dem alleinigen Ergebnis der Ökoeffizienzbewertung ist nicht möglich, da es sich um eine relative Methode handelt.

#### e) Ökoeffizienzergebnisse des Einfamilienhauses

Für die Bewertung des Produktsystemnutzens werden die in Arbeitspaket 2 ermittelten Kapitalwerte verwendet. Die Umweltbewertung basiert auf den Single-Score Ergebnissen der dynamischen Ökobilanzierung der Heizungssysteme. Die Kennzahlen werden zusammen in ein Ökoeffizienz-Portfolio eingetragen (siehe Abbildung 32 für die Bewertung der Heizungssysteme des EFHs). Für das Ökoeffizienzportfolio wird das Gas-Brennwertgerät (Gas oST) als Referenz verwendet. Aufgrund dessen befindet sich dieser Punkt in der Mitte des Graphen, welcher jeweils 0 % Abweichung der Umweltbelastung und der Kosten repräsentiert. Alle Punkte, die rechts der Referenz liegen, verursachen somit höhere Umweltbelastungen. Befinden sich die Punkte auch oberhalb des Referenzwertes sind sie außerdem mit höheren Kosten verbunden. Für das EFH trifft dies auf die Biomasseheizungen bei einer nicht-nachhaltigen Waldwirtschaft sowie auf das Eisspeicher-Wärmepumpensystem zu. Aufgrund höherer Umweltbelastungen

und zugleich höherer Kosten sind diese Systeme weniger ökoefizient als die Gasheizung. Die geringere Ökoefizienz ist außerdem anhand der Diagonale in Abbildung 32 ersichtlich: alle Punkte, die sich links unterhalb der Diagonalen befinden, sind ökoefizienter als das Referenzsystem Gas oST. Folglich haben mehrere Systeme trotz der höheren Kosten aufgrund der niedrigeren Umweltbelastungen ähnliche Ökoefizienzen wie das Referenzsystem. Dies ist für die Systeme Pellet oST, Holz mST, WP\_Wasser, WP\_Sonde und Gas mST der Fall.

Eine höhere Ökoefizienz ist für die Systeme WP\_Wasser PV, WP\_Sonde PV, WP\_Luft, WP\_Luft PV und Holz oST festzustellen. Dabei ist die Luftwärmepumpe mit PV-Anlage im Vergleich zur Gasheizung umweltfreundlicher und kostengünstiger und ist daher mit der höchsten Ökoefizienz verbunden. Diese ist jedoch sehr ähnlich zum Scheitholzvergaserkessel, welcher mit 42 % geringeren Umweltauswirkungen bei 20 % Mehrkosten ebenfalls eine hohe Ökoefizienz aufweist.

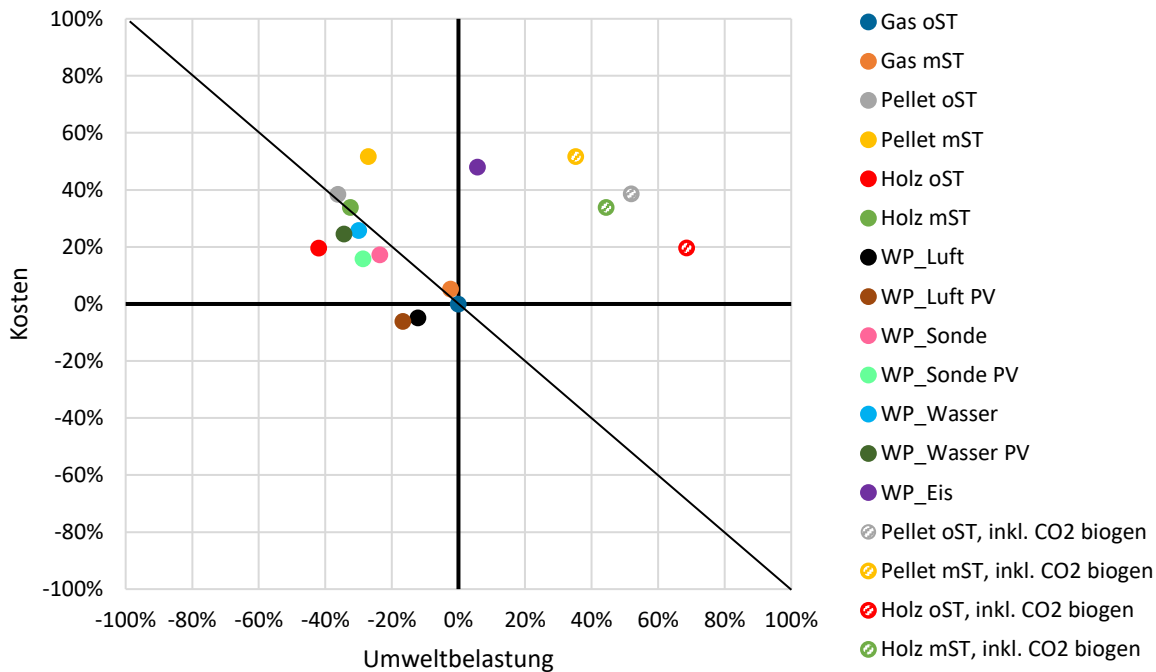


Abbildung 32: Ökoefizienzportfolio für die Heizsysteme des Einfamilienhauses

In Abbildung 33 ist nochmals das Ökoefizienzportfolio der Heizsysteme des EFHs gezeigt, jedoch werden die Systeme nicht durch Punkte, sondern durch Rechtecke repräsentiert. Die Kantenlängen der Rechtecke indizieren dabei die Bandbreite der Ergebnisse des Best-Case- und Worst-Case-Szenarios. Dadurch ist ersichtlich, welche Systeme in allen Szenarien ökoefizienter sind als andere.

Im Basisszenario hat das Luftwärmepumpe mit PV-Anlage bei 17 % geringeren Umweltauswirkungen und 6 % geringeren Kosten die höchste Ökoefizienz. Im schlechtesten Fall weist dieses System 9 % geringere Umweltauswirkungen bei 10 % Mehrkosten auf. Im Best-Case-Szenario weisen lediglich die Systeme Pellet mST und WP\_Eis schlechtere Ökoefizienzen auf, sodass geschlussfolgert werden kann, dass das System WP\_Luft PV in jedem Fall ökoefizienter ist. Dies trifft auch für den Holzvergaserkessel ohne Solarthermie zu.

Die Luftwärmepumpe mit PV-Anlage hat zwar in jedem Szenario auch geringere Kosten als Pellet oST und Holz mST, jedoch sind diese Systeme immer mit geringeren Umweltauswirkungen verbunden. Daher führt der Kostenvorteil des Wärmepumpensystems nicht in jedem Fall zu einer höheren Ökoefizienz im Vergleich zu Pellet oST und Holz mST.

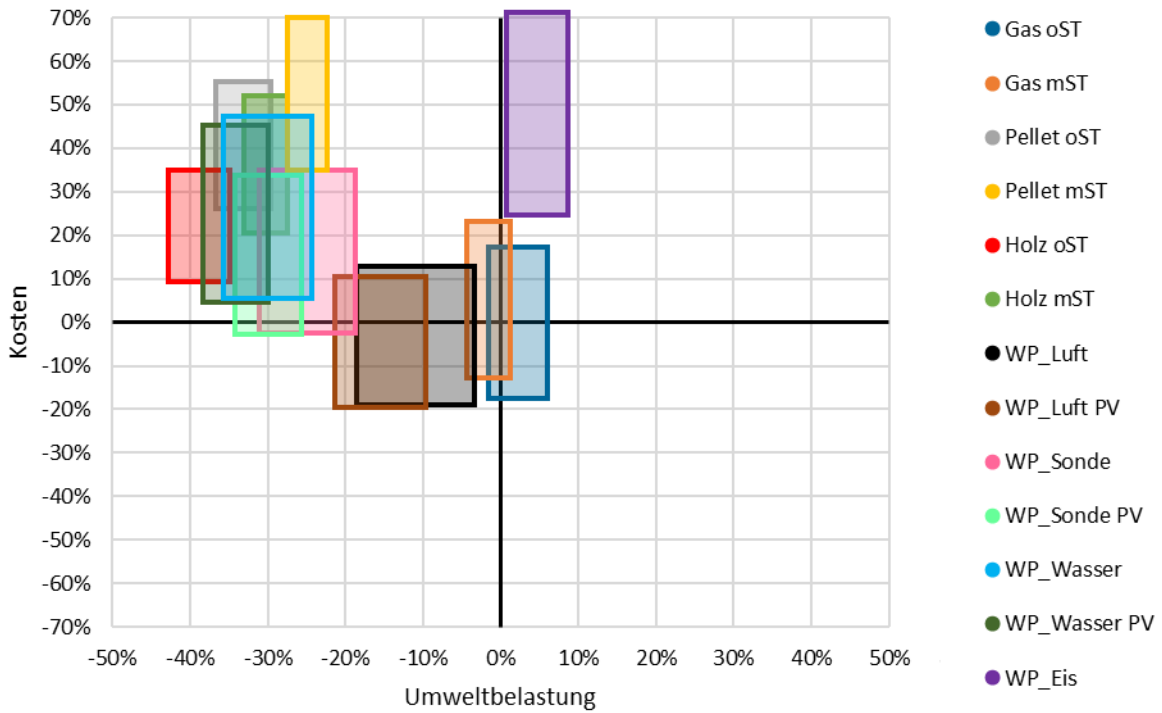


Abbildung 33: Ökoeffizienzportfolio für die Heizsysteme des Einfamilienhauses mit Unsicherheiten

#### f) Ökoeffizienzergebnisse des Mehrfamilienhauses

Wie für das EFH wird auch für die Heizsysteme des MFHs ein Ökoeffizienzportfolio erstellt (Abbildung 34). Das Gas-Brennwertgerät stellt wieder das Referenzsystem dar. Für dieses Modellgebäude weist lediglich das BHKW eine schlechtere Ökoeffizienz als die Gasheizung auf. Zwar sind die Systeme Hack mST, Pellet oST, WP\_Eis und Pellet mST mit höheren Kosten verbunden, jedoch werden diese Mehrkosten durch niedrigere Umweltbelastungen ausgeglichen. Für insgesamt 9 Systeme sind sowohl geringere Umweltauswirkungen als auch geringe Kosten festzustellen. Dabei weisen die Systeme Holz oST, WP\_Wasser PV und WP\_Sonde PV die besten Ökoeffizienzen auf. Während die Ökoeffizienz aller Wärmepumpensysteme durch die Kombination mit einer PV-Anlage gesteigert wird, führt bei den Heizungen mit Brennstofffeuerungen die Kombination mit einer Solarthermieanlage zu einer Reduzierung der Ökoeffizienz.

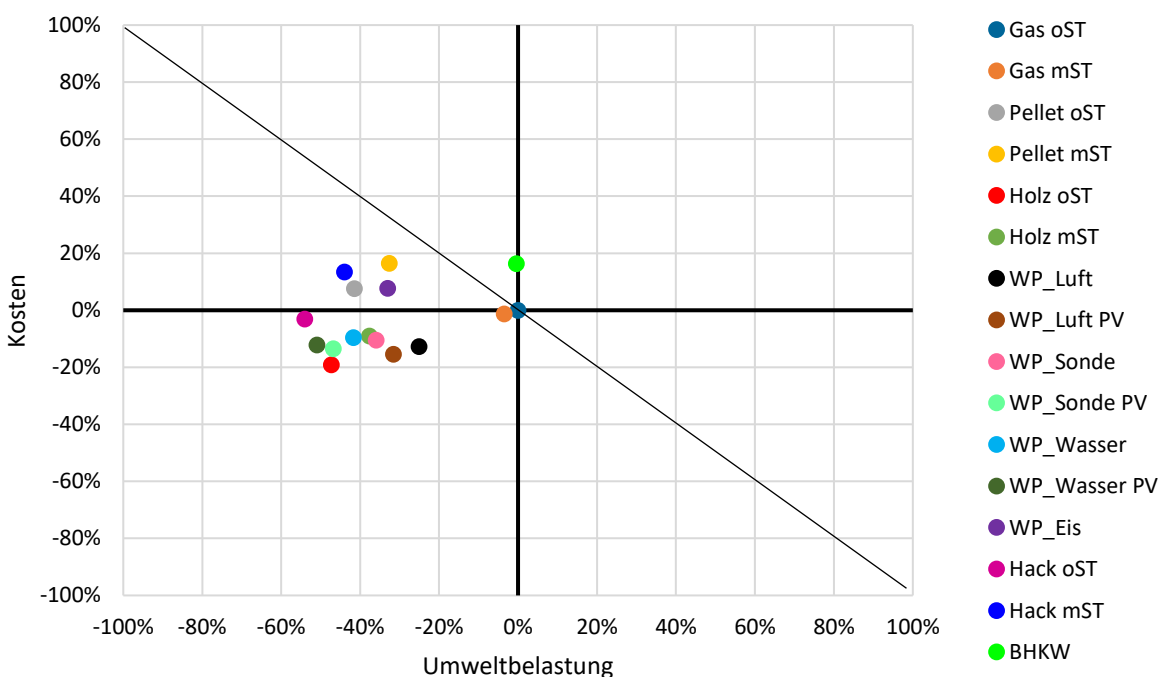


Abbildung 34: Ökoeffizienzportfolio für die Heizsysteme des Mehrfamilienhauses

Abbildung 35 zeigt das Ökoeffizienzportfolio der Heizungssysteme des MFHs mit dargestellten Unsicherheiten. Der Scheitholzvergaserkessel hat im Worst-Case-Szenario eine höhere Ökoeffizienz als die Systeme Gas oST, Gas mST, Pellet oST, Pellet mST, Hack mST und BHKW im Best-Case-Szenario. Die Systeme WP-Sonde PV und WP\_Wasser PV sind in jedem Szenario ökoeffizienter als die Heizungen Gas oST, Gas mST, Pellet mST und BHKW.

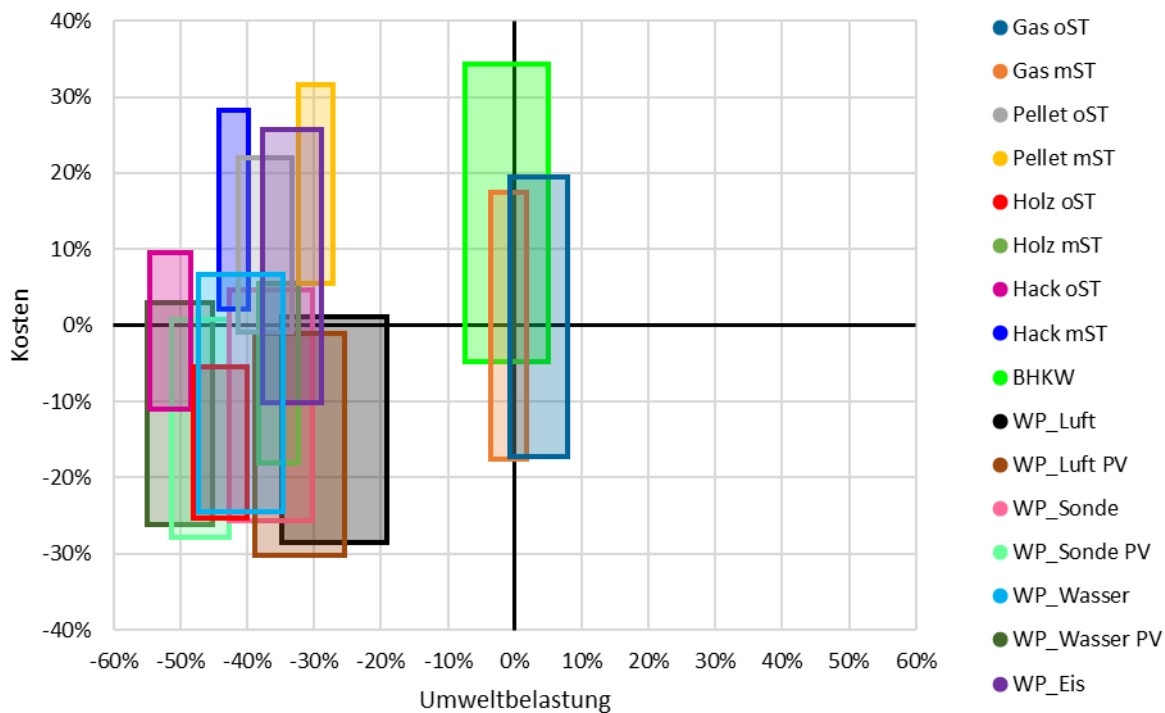


Abbildung 35: Ökoeffizienzportfolio für die Heizungssysteme des Mehrfamilienhauses mit Unsicherheiten

## **2. Verwertung**

### **a) Erfindungen/Schutzrechtsanmeldungen**

Das Forschungsvorhaben zielt nicht auf die Entwicklung der Technologien zur Treibhausgasminderung ab, sondern beschäftigt sich mit der Quantifizierung der Umweltauswirkung sowie der ökonomischen Auswirkungen der verschiedenen Heizungssysteme und Kombinationen der Heizungssysteme. Daher erfolgten im Rahmen des Projektes keine Erfindungen oder Schutzrechtsanmeldungen.

### **b) Wirtschaftliche Erfolgsaussichten nach Projektende**

Die Quantifizierung der Umweltauswirkungen sowie der Ökoeffizienz der verschiedenen Heizungssysteme weist einen deutlichen Forschungsfokus auf. So können die Ergebnisse zwar die wirtschaftlichen Erfolgsaussichten verschiedener Technologien indirekt verbessern, jedoch ist eine eigenständige kommerzielle Verwertung der Ergebnisse nicht vorgesehen. Dies birgt den Vorteil, dass die Annahmen unabhängig von kommerziell motivierten Interessen getroffen werden können und somit ein technologieoffenes Ergebnis gewährleistet wird.

Unter volkswirtschaftlichen Gesichtspunkten bietet die Analyse der ökonomischen Kennwerte der verschiedenen Heizungstechnologien sowie die Identifizierung der ökoeffizientesten Technologien der zukünftigen Wärmebereitstellung die Möglichkeit, die Gesamtkosten zu minimieren und gleichzeitig den Nutzen in Form der Reduzierung der Umweltauswirkungen zu maximieren.

### **c) Wissenschaftliche und/oder technische Erfolgsaussichten nach Projektende**

Die Ergebnisse des Forschungsvorhabens werden national und international veröffentlicht. Es wurden bereits Artikel veröffentlicht. Außerdem ist angedacht weitere Artikel in internationalen Journalen zu veröffentlichen und auf Konferenzen durch Vorträge oder Poster vorzustellen. Eine Auflistung der bereits erfolgten sowie geplanter Veröffentlichungen ist unter „4. Veröffentlichungen“ zu finden.

Im Rahmen des Forschungsvorhabens wird an der Professur für Regenerative Energiesysteme durch den bearbeitenden Mitarbeiter eine Promotionsarbeit durchgeführt. Im Zusammenhang mit anderen laufenden Projekten ist langfristig geplant die Forschung im Bereich Ökobilanzierung an der Professur für Regenerative Energiesysteme auszubauen. Das Forschungsvorhaben behandelt wie ein anderes Projekt, welches schon gestartet ist, das Thema der Ökobilanzierung und Ökoeffizienz. Sukzessive wollen wir die Expertise in diesem Bereich aufbauen und die Methodik über den Status quo hinaus weiterentwickeln. Das Forschungsvorhaben ermöglicht uns den Bereich zu beforschen. Außerdem trägt das Vorhaben zu dem Ziel, unsere Expertise in diesem Bereich weiterzuentwickeln bei. Weiterhin möchten wir die Chance nutzen, Anschlussprojekte im Bereich von Ökobilanzen zu generieren.

Die Methoden und Ergebnisse des Forschungsvorhabens fließen in die Lehre am TUM Campus Straubing für Biotechnologie und Nachhaltigkeit, beispielsweise in Vorlesungen wie „Energetic Use of Biomass and Residuals“ sowie „Energy and Economics“, ein. Außerdem gibt es die Möglichkeit über Studienarbeiten oder Forschungspraktika Studierenden einen Einblick in die Forschung zu geben.

Die ökologischen sowie ökonomischen Modelle der verschiedenen Heizungstechnologien sollen nach Projektende in weiteren Projekten verwendet werden. Dadurch ist es möglich, zukünftige Entwicklungen weiterhin in die Modelle mitaufzunehmen und weiterhin neue Trends ökologisch sowie ökonomisch zu bewerten. Letztlich kann anhand dieser Bewertungen ein vergleichendes Gesamtbild verschiedener Wärmeerzeugungstechnologien erzeugt werden und der Beitrag der einzelnen Technologien zur Erreichung der Umweltschutzziele evaluiert werden.

### **d) Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit**

Nach Ablauf der Projektzeit soll die Möglichkeit der Beantragung eines Anschlussprojekts genutzt werden. Mögliche Anknüpfungspunkte zum Forschungsvorhaben sind beispielsweise:

- Implementierung der Ergebnisse in öffentlich zugänglichen Wärmekostenrechner. Beispielsweise Erweiterung des Wärmekompasses von der Agentur für erneuerbare Energien mit

Ökobilanzergebnissen bzw. Ergebnissen der Ökoeffizienzanalyse inklusive einfacher Interpretation. Alternativ bietet sich auch die Entwicklung eines eigenen Tools an.

- Erweiterung der Systemgrenze auf weitere energetische Sanierungsmaßnahmen, beispielsweise Maßnahmen zur Wärmedämmung, Fensteraustausch, Integration von Lüftungsanlagen mit Wärmerückgewinnung mit anschließender Ökoeffizienzanalyse. Darauf aufbauend könnte ein vereinfachtes Tool zur Energie- und Ökobilanzierung von Bestandsgebäuden erstellt werden, welches Hausbesitzern und Energieberatern kostenfrei zur Verfügung gestellt wird, ihnen verschiedene Optionen aufzeigt und Anhaltspunkte zur Entscheidungsfindung gibt.

Darüber hinaus kann die Methodik und Vorgehensweise aus diesem Projekt genutzt werden, um in anderen Bereichen angewandt zu werden. Besonders die Weiterentwicklung von dynamischen Ökobilanzierungen zur Abschätzung zukünftiger Entwicklungen bietet weitere Möglichkeiten und Forschungsfelder. Eine Übertragung dieser Vorgehensweise kann für viele Anlagen und Objekte angewendet werden, welche über eine längere Lebensdauer bilanziert werden sollen. Damit lassen sich genauere Aussagen zu den Umweltwirkungen über den gesamten Lebenszyklus machen.

### 3. Erkenntnisse von Dritten

Während der Projektlaufzeit sind keine Ergebnisse von dritter Seite bekannt geworden, die für die Durchführung des Vorhabens relevant waren. Zwar sind vereinzelt Studien zur ökologischen oder ökonomischen Bewertung von Heizungstechnologien veröffentlicht worden, jedoch wurden hier jeweils nur einzelne Technologien untersucht. Zur Ökoeffizienzbewertung von Heizungssystemen sind während der Projektlaufzeit keine Veröffentlichung bekannt geworden.

### 4. Veröffentlichungen

#### Publikationen

- Naumann, Gabriel, Schropp, Elke, Gaderer, Mattias (2022) Life Cycle Assessment of an Air-Source Heat Pump and a Condensing Gas Boiler Using an Attributional and a Consequential Approach. Procedia CIRP; doi: 10.1016/j.ijhydene.2023.07.208
- Naumann, Gabriel, Schropp, Elke, Steegmann, Natascha, Möller, Marius C., Gaderer, Matthias (2023) Environmental performance of a hybrid solar-hydrogen energy system for buildings. International Journal of Hydrogen Energy; doi: 10.1016/j.ijhydene.2023.07.208

#### Konferenzen

Jahr	Konferenz	Art des Beitrags	Titel des Beitrags
2023	International Conference on Life Cycle Management	Poster	Life Cycle Assessment of a Hybrid Solar-Hydrogen Cogeneration System
2022	SETAC Europe LCA Symposium	Vortrag	Environmental Performance of a Hybrid Solar-Hydrogen Cogeneration System for Residential Applications
2022	Conference on Life Cycle Engineering	Vortrag	Life Cycle Assessment of an Air-Source Heat Pump and a Condensing Boiler Using an Attributional and a Consequential Approach
2020	Digitalisieren – Sektoren koppeln – Flexibilisieren; Systematische Integration der Bioenergie und weiterer erneuerbarer Energien in Gebäuden & Quartieren	Poster	Life Cycle Assessment and Economic Analysis of Heat Supply Technologies for Buildings

## Geplante Veröffentlichungen

- Naumann, Gabriel, Famiglietti, Jacopo, Schropp, Elke, Motta, Mario, Gaderer, Matthias; Development of dynamic European electricity emission factors. In Bearbeitung
- Naumann, Gabriel, Schropp, Elke, Gaderer, Matthias; Environmental and Eco-Efficiency Performance of Heating Systems in a German Context. In Bearbeitung
- An der Professur für Regenerative Energiesysteme wird der Projektmitarbeiter Gabriel Naumann eine Promotionschrift zu dem Projektinhalt verfassen

## Literaturverzeichnis

- Andreasi Bassi, S.; Biganzoli, F.; Ferrara, N.; Amadei, A.; Valente, A.; Sala, S.; Ardente, F. (2023): Updated characterisation and normalisation factors for the Environmental Footprint 3.1 method. Hg. v. Publications Office of the European Union. Luxembourg. Online verfügbar unter <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/145f8401-a82a-11ed-b508-01aa75ed71a1/language-en>.
- Bahlawan, Hilal; Morini, Mirko; Pinelli, Michele; Poganietz, Witold-Roger; Spina, Pier Ruggero; Venturini, Mauro (2019): Optimization of a hybrid energy plant by integrating the cumulative energy demand. In: *Applied Energy* 253, S. 113484. DOI: 10.1016/j.apenergy.2019.113484.
- Bahlawan, Hilal; Poganietz, Witold-Roger; Spina, Pier Ruggero; Venturini, Mauro (2020): Cradle-to-gate life cycle assessment of energy systems for residential applications by accounting for scaling effects. In: *Applied Thermal Engineering* 171, S. 115062. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2020.115062.
- Bauer, Christian (2007): Holzenergie. Sachbilanzen von Energiesystemen: Grundlagen für den ökologischen Vergleich von Energiesystemen und den Einbezug von Energiesystemen in Ökobilanzen für die Schweiz.
- Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft (2022): Energiekrise – Historisches Hoch bei Brennholzpreisen. Online verfügbar unter <https://www.lwf.bayern.de/forsttechnik-holz/holzverwendung/242554/index.php>.
- bdew (2021a): BDEW-Heizkostenvergleich Altbau 2021. Ein Vergleich der Gesamtkosten verschiedener Systeme zur Heizung und Warmwasserbereitung in Altbauten. Online verfügbar unter [https://www.bdew.de/media/documents/BDEW-HKV\\_Altbau.pdf](https://www.bdew.de/media/documents/BDEW-HKV_Altbau.pdf).
- bdew (2021b): BDEW-Heizkostenvergleich Neubau 2021. Ein Vergleich der Gesamtkosten verschiedener Systeme zur Heizung und Warmwasserbereitung in Neubauten. Online verfügbar unter [https://www.bdew.de/media/documents/BDEW-HKV\\_Nebau.pdf](https://www.bdew.de/media/documents/BDEW-HKV_Nebau.pdf).
- bdew (2023a): BDEW-Gaspreisanalyse Juli 2023. Die BDEW-Gaspreisanalyse zeigt die aktuelle Entwicklung der Gaspreise für Haushaltskunden in Deutschland. Online verfügbar unter <https://www.bdew.de/service/daten-und-grafiken/bdew-gaspreisanalyse/>.
- bdew (2023b): BDEW-Strompreisanalyse Juli 2023. Die BDEW-Strompreisanalyse zeigt die aktuelle Entwicklung der Strompreise in Deutschland. Online verfügbar unter <https://www.bdew.de/service/daten-und-grafiken/bdew-strompreisanalyse/>.
- C.A.R.M.E.N. (2022a): Preisentwicklung bei Holzpellets. Online verfügbar unter <https://www.carmen-ev.de/wp-content/uploads/2022/12/Pelletpreise-Jahresmittelwerte.pdf>.
- C.A.R.M.E.N. (2022b): Preisentwicklung bei Waldhackschnitzeln. Online verfügbar unter <https://www.carmen-ev.de/wp-content/uploads/2022/12/Hackschnitzelpreise-Jahresmittelwerte-Tonne.pdf>.
- Caduff, Marloes; Huijbregts, Mark A.J.; Koehler, Annette; Althaus, Hans-Jörg; Hellweg, Stefanie (2014): Scaling Relationships in Life Cycle Assessment. In: *Journal of Industrial Ecology* 18 (3), S. 393–406. DOI: 10.1111/jiec.12122.
- Crenna, Eleonora; Secchi, Michela; Benini, Lorenzo; Sala, Serenella (2019): Global environmental impacts: data sources and methodological choices for calculating normalization factors for LCA. In: *Int J Life Cycle Assess* 24 (10), S. 1851–1877. DOI: 10.1007/s11367-019-01604-y.
- DIN (2009): DIN EN ISO 14040. Umweltmanagement - Ökobilanz - Grundsätze und Rahmenbedingungen (ISO 14040:2006); Deutsche und Englische Fassung EN ISO 14040:2006.
- DIN (2012): DIN EN ISO 14045. Umweltmanagement - Ökoeffizienzbewertung von Produktsystemen - Prinzipien, Anforderungen und Leitlinien (ISO 14045:2012); Deutsche und Englische Fassung EN ISO 14045:2012.
- DIN (2018): DIN EN ISO 14044. Umweltmanagement - Ökobilanz - Anforderungen und Anleitungen (ISO 14044:2006 + Amd 1:2017); Deutsche Fassung EN ISO 14044:2006 + A1:2018.

- Dott, Ralf; Haller, Michel Y.; Ruschenburg, Jörn; Ochs, Fabian; Bony, Jacques (2013): The Reference Framework for System Simulations of the IEA SHC Task 44 / HPP Annex 38. Part B: Buildings and Space Heat Load. Online verfügbar unter [http://task44.iea-shc.org/data/sites/1/publications/T44A38\\_Rep\\_C1\\_B\\_ReferenceBuildingDescription\\_Final\\_Revised\\_130906.pdf](http://task44.iea-shc.org/data/sites/1/publications/T44A38_Rep_C1_B_ReferenceBuildingDescription_Final_Revised_130906.pdf).
- ENTSO-E: Transparency Platform. Online verfügbar unter <https://transparency.entsoe.eu/>.
- Europäisches Komitee für Normung (2017): DIN EN 12831-1. Energetische Bewertung von Gebäuden - Verfahren zur Berechnung der Norm-Heizlast - Teil 1: Raumheizlast, Modul M3-3; Deutsche Fassung EN 12831-1:2017.
- Faist-Emmenegger, Mireille; Heck, Thomas; Jungbluth, Niels; Tuchschnid, Matthias (2007): Erdgas. Sachbilanzen von Energiesystemen: Grundlagen für den ökologischen Vergleich von Energiesystemen und den Einbezug von Energiesystemen in Ökobilanzen für die Schweiz.
- FNR (2017): Hackschnitzelheizungen. Marktübersicht. Online verfügbar unter [http://www.fnr.de/fileadmin/allgemein/pdf/broschueren/hackschnitzel-heizungen\\_web.pdf](http://www.fnr.de/fileadmin/allgemein/pdf/broschueren/hackschnitzel-heizungen_web.pdf).
- FNR (2020a): Pelletheizungen. Marktübersicht. Online verfügbar unter [https://www.fnr.de/fileadmin/Projekte/2020/Mediathek/mue\\_pelletheizung\\_web\\_1.pdf](https://www.fnr.de/fileadmin/Projekte/2020/Mediathek/mue_pelletheizung_web_1.pdf).
- FNR (2020b): Scheitholzvergaser-/ Kombikessel. Marktübersicht. Online verfügbar unter [https://www.fnr.de/fileadmin/allgemein/pdf/broschueren/M-SHVK-2020\\_endweb.pdf](https://www.fnr.de/fileadmin/allgemein/pdf/broschueren/M-SHVK-2020_endweb.pdf).
- Greening, Benjamin; Azapagic, Adisa (2012): Domestic heat pumps: Life cycle environmental impacts and potential implications for the UK. In: *Energy* 39 (1), S. 205–217. DOI: 10.1016/j.energy.2012.01.028.
- Heck, Thomas (2007): Wärme-Kraft-Kopplung. Sachbilanzen von Energiesystemen: Grundlagen für den ökologischen Vergleich von Energiesystemen und den Einbezug von Energiesystemen in Ökobilanzen für die Schweiz.
- Heimrath, Richard; Haller, Michel (2007): The Reference Heating System, the Template Solar System of Task 32. A technical report of Subtask A. Online verfügbar unter [https://www.iea-shc.org/data/sites/1/publications/task32-Reference\\_Heating\\_System.pdf](https://www.iea-shc.org/data/sites/1/publications/task32-Reference_Heating_System.pdf).
- IWU (2015): Kosten energierelevanter Bau- und Anlagenteile bei der energetischen Modernisierung von Altbauten. Endbericht. Online verfügbar unter [https://www.iwu.de/fileadmin/publikationen/handlungslogiken/2015\\_IWU\\_Hinz\\_Kosten-energierelevanter-Bau-und-Anlagenteile-bei-der-energetischen-Modernisierung-von-Altbauten.pdf](https://www.iwu.de/fileadmin/publikationen/handlungslogiken/2015_IWU_Hinz_Kosten-energierelevanter-Bau-und-Anlagenteile-bei-der-energetischen-Modernisierung-von-Altbauten.pdf).
- IWU (2021): Anpassung der Kostenfunktionen energierelevanter Bau- und Anlagenteile bei der energetischen Modernisierung von Altbauten auf das Preisniveau 2020. Online verfügbar unter [https://www.iwu.de/fileadmin/publikationen/werkstattbericht/2021\\_IWU\\_KochEtAl\\_Werkstattbericht-Anpassung-Kostenfunktionen-2020.pdf](https://www.iwu.de/fileadmin/publikationen/werkstattbericht/2021_IWU_KochEtAl_Werkstattbericht-Anpassung-Kostenfunktionen-2020.pdf).
- Jovell, Daniel; Pou, Josep O.; Llovel, Fèlix; Gonzalez-Olmos, Rafael (2022): Life Cycle Assessment of the Separation and Recycling of Fluorinated Gases Using Ionic Liquids in a Circular Economy Framework. In: *ACS sustainable chemistry & engineering* 10 (1), S. 71–80. DOI: 10.1021/acssuschemeng.1c04723.
- Jungbluth, Niels (2007): Sonnenkollektoranlagen. Sachbilanzen von Energiesystemen: Grundlagen für den ökologischen Vergleich von Energiesystemen und den Einbezug von Energiesystemen in Ökobilanzen für die Schweiz.
- Jungbluth, Niels; Stucki, Matthias; Flury, Karin; Frischknecht, Rolf; Büsser, Sybille (2012): Life Cycle Inventories of Photovoltaics. Online verfügbar unter <https://esu-services.ch/fileadmin/download/publicLCI/jungbluth-2012-LCI-Photovoltaics.pdf>.
- Minder, Stefan; Hefti, Rita; Ettl, Nicolas; Weisskopf, Thomas (2016): Eisspeicher-Wärmepumpen-Anlagen mit Sonnenkollektoren. Wirtschaftlichkeit, Umweltbelastung und Marktpositionierung. Online verfügbar unter [https://www.velasolaris.com/wp-content/uploads/2018/12/be-eisspeicher\\_wirtschaft\\_uwb\\_160222\\_v2.pdf](https://www.velasolaris.com/wp-content/uploads/2018/12/be-eisspeicher_wirtschaft_uwb_160222_v2.pdf).
- Monteleone, B.; Chiesa, M.; Marzuoli, R.; Verma, V. K.; Schwarz, M.; Carlon, E. et al. (2015): Life cycle analysis of small scale pellet boilers characterized by high efficiency and low emissions. In: *Applied Energy* 155, S. 160–170. DOI: 10.1016/j.apenergy.2015.05.089.

- Müller, Amelie; Friedrich, Lorenz; Reichel, Christian; Herceg, Sina; Mittag, Max; Neuhaus, Dirk Holger (2021): A comparative life cycle assessment of silicon PV modules: Impact of module design, manufacturing location and inventory. In: *Solar Energy Materials and Solar Cells* 230, S. 111277. DOI: 10.1016/j.solmat.2021.111277.
- ÖkoFEN (2014): Prüfbericht. Pellematic Condens 20.
- Prognos; Öko-Institut; Wuppertal-Institut (2021): Klimaneutrales Deutschland 2045. Wie Deutschland seine Klimaziele schon vor 2050 erreichen kann. Online verfügbar unter [https://www.agora-verkehrswende.de/fileadmin/Projekte/2021/KNDE\\_2045\\_Langfassung/Klimaneutrales\\_Deutschland\\_2045\\_Langfassung.pdf](https://www.agora-verkehrswende.de/fileadmin/Projekte/2021/KNDE_2045_Langfassung/Klimaneutrales_Deutschland_2045_Langfassung.pdf).
- Sala, Serenella; Cerutti, Alessandro Kim; Pant, Rana (2018): Development of a weighting approach for the Environmental Footprint. Luxembourg (EUR, Scientific and technical research series). Online verfügbar unter <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC106545>.
- Schleicher, Tobias; Liu, Ran; Gröger, Jens; Heubes, Jonathan; Radermacher, Pascal; Gloel, Johanna (2020): Der Blaue Engel für Raumklimageräte – ein nationales Zeichen mit internationaler Wirkung. Abschlussbericht. Hg. v. Umweltbundesamt. Online verfügbar unter [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/479/publikationen/texte\\_153-2020\\_der\\_blaue\\_engel\\_fuer\\_raumklimageraete.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/479/publikationen/texte_153-2020_der_blaue_engel_fuer_raumklimageraete.pdf), zuletzt geprüft am 24.01.2023.
- SimaPro: LCA software for informed changemakers. Online verfügbar unter <https://simapro.com/>.
- Statistisches Bundesamt (2021): Wohnungsbestand Ende 2020: 42,8 Millionen Wohnungen. Pressemitteilung Nr. 326 vom 8. Juli 2021. Online verfügbar unter [https://www.destatis.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/2021/07/PD21\\_326\\_31231.html](https://www.destatis.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/2021/07/PD21_326_31231.html).
- Statistisches Bundesamt (2023): Bruttoinlandsprodukt von 1950 bis 2022 im Durchschnitt 3,1 % pro Jahr gewachsen. Pressemitteilung Nr. N 032 vom 1. Juni 2023. Online verfügbar unter [https://www.destatis.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/2023/06/PD23\\_N032\\_81.html](https://www.destatis.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/2023/06/PD23_N032_81.html).
- Stetz, T.; Appen, J. von; Braun, M.; Wirth, G. (2011): Cost-Optimal Inverter Sizing for Ancillary Services - Field Experience in Germany and Future Considerations. 6 pages / 26th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition; 3069-3074. DOI: 10.4229/26thEUPVSEC2011-4DP.2.2.
- Streicher, Wolfgang; Heimrath, Richard (2003): Structure of the Reference Buildings of Task 26. Online verfügbar unter [https://task26.iea-shc.org/Data/Sites/1/publications/task26-c-structure\\_reference\\_buildings.pdf](https://task26.iea-shc.org/Data/Sites/1/publications/task26-c-structure_reference_buildings.pdf).
- Thermal Energy System Specialists: TRNSYS. Transient System Simulation Tool. Online verfügbar unter <https://www.trnsys.com/>.
- TRANSSOLAR Energietechnik GmbH (2021): Trnsys 18. Multizone Building Modeling with Type 56 and TRNBuild.
- Umweltbundesamt (2016): Ableitung von Recycling und Umwelanforderungen und Strategien zur Vermeidung von Versorgungsrisiken bei innovativen Energiespeichern. Online verfügbar unter [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/texte\\_07\\_2016\\_ableitung\\_von\\_recycling-und\\_umwelanforderungen.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/texte_07_2016_ableitung_von_recycling-und_umwelanforderungen.pdf).
- Vaillant (2023a): Gas-Brennwertgerät ecoTEC exclusive. Online verfügbar unter <https://www.vaillant.de/heizung/produkte/gas-brennwertgerat-ecotec-exclusive-183616.html>.
- Vaillant (2023b): Wärmepumpen: Nachhaltiger Komfort. Online verfügbar unter <https://www.vaillant.at/downloads/bro/waermepumpen-2/vaillant-b2c-waermepumpen-broschuere-230105-2570058.pdf>.
- VDI (2012): VDI 2067. Wirtschaftlichkeit gebäudetechnischer Anlagen.
- Vela Solaris AG: Polysun. Online verfügbar unter <https://www.velasolaris.com/>.
- Vignali, Giuseppe (2017): Environmental assessment of domestic boilers: A comparison of condensing and traditional technology using life cycle assessment methodology. In: *Journal of Cleaner Production* 142, S. 2493–2508. DOI: 10.1016/j.jclepro.2016.11.025.
- Weiss, Werner W. (2019): Solar heating systems for houses. A design handbook for solar combisystems. London, New York: Routledge.

Wernet, Gregor; Bauer, Christian; Steubing, Bernhard; Reinhard, Jürgen; Moreno-Ruiz, Emilia; Weidema, Bo (2016): The ecoinvent database version 3 (part I): overview and methodology. In: *Int J Life Cycle Assess* 21 (9), S. 1218–1230. DOI: 10.1007/s11367-016-1087-8.