

*LCA-Screeninganalyse unterschiedlicher Gebäudeenergiesysteme
am Beispiel eines Einfamilienhauses*

BACHELORARBEIT 2

Studierender Josef Roitner, 1910731013

Betreuer DI Dr. Markus Leeb

Studiengang Smart Building

Salzburg, am 18.11.2022

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre hiermit eidesstattlich, dass ich die vorliegende Bachelorarbeit selbstständig und ohne fremde Hilfe verfasst, und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe. Des Weiteren versichere ich hiermit, dass ich die den benutzten Quellen wörtlich oder inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Die Arbeit wurde bisher in gleicher oder ähnlicher Form keiner anderen Prüfungskommission weder im In- noch im Ausland vorgelegt und auch nicht veröffentlicht.

.....
Datum

.....
Unterschrift

Zusammenfassung

Diese Arbeit vergleicht unterschiedliche Gebäudeenergiesysteme bei Einfamilienhäusern in Bezug auf die Umweltwirkungen. Konkret wird ein System mit einer Photovoltaikanlage und elektrischer Fußbodenheizung mit einem Heizsystem mit Luft/Wasser-Wärmepumpe verglichen. Mittels Literaturrecherche werden Datengrundlagen zu den einzelnen Komponenten der Systeme erhoben und auf dieser Basis ein Vergleich unterschiedlicher Varianten durchgeführt. Es zeigte sich, dass bei Gebäuden mit niedrigen Heizwärmebedarf ein System bestehend aus einer Photovoltaikanlage und einer elektrischen Fußbodenheizung geringere Umweltwirkungen hat als ein System bestehend aus einer wasserführenden Fußbodenheizung mit einer Luft/Wasser-Wärmepumpe.

Schlüsselwörter: Photovoltaik, Wärmepumpe, Heizung, Treibhauspotenzial, Ökobilanz

Abstract

This paper compares different building energy systems for single-family houses in terms of environmental impact. Specifically, a system with a photovoltaic system and electric underfloor heating is compared with a heating system with an air/water heat pump. Literature research is used to collect data on the individual components of the systems and, on this basis, a comparison of different variants is carried out. It was found that for buildings with low heating requirements, a system consisting of a photovoltaic system and an electric underfloor heating system has a lower environmental impact than a system consisting of a water-bearing underfloor heating system with an air/water heat pump.

Key words: Photovoltaics, heat pump, heating, global warming potential, life cycle assessment

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	1
1.1. Motivation	1
1.2. Zielsetzung	1
1.3. Methodik	2
2. Grundlagen der Ökobilanz	3
2.1. Ökobilanzierung und LCA-Screeninganalyse	3
2.1.1. Allgemeines	3
2.1.2. Phasen einer Ökobilanz	3
2.1.3. Lebenszyklusphasen	5
2.1.4. LCA-Screeninganalyse	6
2.2. Wirkungskategorien	7
2.2.1. Allgemeines	7
2.2.2. Treibhauspotenzial (GWP)	8
2.2.3. Primärenergieinhalt (PE)	9
3. Stand der Forschung	10
4. Grundlagen zu den verwendeten Ökobilanzdaten	12
4.1. Herstellung	12
4.1.1. Photovoltaikanlage	12
4.1.2. Elektrische Fußbodenheizung	21
4.1.3. Wärmepumpe	22
4.1.4. Wassergeführte Wärmeverteilungs- und abgabesysteme	25
4.1.5. Warmwasserbereitung	25
4.2. Nutzung	26
4.2.1. Strom	26
4.2.2. Kältemittel	29
4.2.3. Wartung und Instandhaltung	33
5. Vergleich der Systeme	34
5.1. Varianten	34
5.2. Vorgehensweise	36

5.3. Eingabedaten	37
5.3.1. Photovoltaikanlage	37
5.3.2. Elektrische Fußbodenheizung, Wärmeabgabesysteme	37
5.3.3. Warmwasserbereitung	38
5.3.4. Wärmepumpe und Kältemittel	38
5.3.5. Warmwasserbedarf und Strommix	39
5.3.6. Heizwärmebedarf	40
5.4. Berechnungsweg	41
5.5. Ergebnisse	42
5.5.1. Varianten mit einem Heizwärmebedarf von 30 kWh/(m ² a)	42
5.5.2. Varianten mit einem Heizwärmebedarf von 15 kWh/(m ² a)	45
5.5.3. Varianten mit einem Heizwärmebedarf von 80 kWh/(m ² a)	48
6. Conclusio	51
Abbildungsverzeichnis	53
Tabellenverzeichnis	54
Literaturverzeichnis	55
Anhang	1

1. Einleitung

1.1. Motivation

Im Jahr 2015 hat sich die Weltgemeinschaft im Pariser Abkommen geeinigt, die globale Erwärmung auf unter 2 Grad, besser auf 1,5 Grad zu begrenzen. Im Zuge dessen hat sich Österreich verpflichtet seine Emissionen bis 2030 um 36 % im Vergleich zu 2005 zu reduzieren. („Mission2030 – Die Klima- und Energiestrategie der österreichischen Bundesregierung“; *Parlamentarische Enquete des Nationalrates (Stenographisches Protokoll)*, 2018, S. 6-14)

Derzeit zweifeln viele Klimaaktivisten und -aktivistinnen an der Erreichung der gesetzten Klimaziele. Mit immer radikaleren Formen des Protests – wie etwa dem Festkleben auf Fahrbahnen und Schüttaktionen in Museen – wollen sie Aufmerksamkeit erregen und die Politik zum Handeln auffordern. Auch in Zeitungen und Online-Newsportalen sind die Klimaerwärmung und der CO₂-Ausstoß zum omnipräsenten Thema geworden, nicht zuletzt wegen Naturkatastrophen oder Messrekorden.

Der Anteil der Gebäude an den gesamten Treibhausgasemissionen betrug im Jahr 2019 10,2%, wobei der Großteil aus der Verbrennung fossiler Brennstoffe stammt (Anderl et al., 2021, S.144). Abgesehen vom Umweltgedanken ist auch durch die zuletzt stark gestiegenen Energiepreise das Interesse für Gebäudetechnik in der Bevölkerung gestiegen, Photovoltaikanlagen erleben 2022 einen regelrechten Boom. Immer mehr wollen auch „raus aus Öl und Gas“ und setzen auf Pellets und Wärmepumpen. Dabei muss jedoch berücksichtigt werden, dass den meisten Haushalten nur ein begrenztes Budget für die Umrüstung zur Verfügung steht und dies die Auswahl an möglichen Maßnahmen beeinflusst.

Diese Arbeit befasst sich daher mit der Frage, wie wirkungsvoll unterschiedliche Gebäudeenergiesysteme in Bezug auf die ökologischen Auswirkungen sind.

1.2. Zielsetzung

Ziel der Arbeit ist es zwei unterschiedliche Gebäudeenergiesysteme am Beispiel eines fiktiven Einfamilienhauses in Hinblick auf die ökologischen Auswirkungen zu evaluieren.

Es handelt sich hierbei um folgende Systeme:

- Eine direktelektrische Fußbodenheizung und Warmwasserbereitung in Kombination mit einer Photovoltaikanlage.

- Eine wassergeführte Fußbodenheizung und Warmwasserbereitung, die die Energie von einer Luft/Wasser-Wärmepumpe bezieht. Der Strom wird in diesem Fall zur Gänze aus dem Netz bezogen.

Der Vergleich umfasst das Treibhauspotenzial und den nicht erneuerbaren Primärenergieinhalt. Das Treibhauspotenzial (GWP) beschreibt welche Mengen an CO₂ und anderen Treibhausgasen ausgestoßen wird. Es wurde aufgrund der Relevanz für den Klimawandel ausgewählt. Der Primärenergieinhalt beschreibt wieviel Energie zum Betrieb eines Gebäudes notwendig ist, er ist ein Indikator für die Energieeffizienz eines Gebäudes. In dieser Arbeit erfolgt eine Beschränkung auf den nicht erneuerbaren Primärenergieinhalt. Da erneuerbare Energiequellen als unerschöpflich angesehen werden können, spielt dieser Bedarf eine vernachlässigbare Rolle (Hengstler et al., 2021, S. 127).

Mit der Arbeit soll folgende Hypothese belegt werden:

Direkt elektrische Heizsysteme haben in Verbindung mit einer Photovoltaikanlage geringere Umweltbelastungen als wassergeführte Heizsysteme mit Wärmepumpen.

1.3. Methodik

In dieser Arbeit werden im ersten Schritt die Grundlagen einer Ökobilanz und Wirkungskategorien erläutert, um einen Einstieg in das Thema zu ermöglichen. Anschließend wird ein kurzer Überblick über den Stand der Forschung und bisher durchgeführte Vergleiche gegeben. Zur konkreten Ermittlung der ökologischen Auswirkungen wird eine Grundlagenerhebung zu den Ökobilanzdaten der einzelnen Komponenten der Gebäudeenergiesysteme durchgeführt, diese findet sich im nächsten Kapitel.

Um die Zielsetzung der Arbeit zu erreichen und die aufgestellte Hypothese zu beantworten, ist es notwendig einen Berechnungsweg zu wählen. Für die Berechnungen wird ein Excel-Tool erstellt, um anhand der erhobenen Daten unterschiedliche Systeme zu vergleichen. Die Ermittlung der jährlichen Energieverbräuche wird unter Zuhilfenahme des Simulationsprogramms Polysun[®] durchgeführt.

Nach der Erstellung des Tools und Eingabe der Daten können insgesamt 24 Varianten der zwei zugrunde gelegten Gebäudeenergiesysteme verglichen werden.

Es wurden bei den Berechnungen die Umweltwirkungen der Herstellung und der Nutzung betrachtet, Umweltwirkungen der Entsorgung wurden nicht beachtet. Der Betrachtungszeitraum beträgt 30 Jahre, der Standort des fiktiven Einfamilienhauses ist in Linz.

Die gewonnenen Ergebnisse können herangezogen werden um die ursprünglich formulierte Hypothese zu überprüfen und weitere Erkenntnisse aus den Ergebnissen abzuleiten.

2. Grundlagen der Ökobilanz

2.1. Ökobilanzierung und LCA-Screeninganalyse

2.1.1. Allgemeines

Um die Umweltauswirkungen von Produkten oder Materialien zu ermitteln kann die Ökobilanz, die auch als Lebenszyklusanalyse, im Englischen als Life Cycle Assessment (LCA) bezeichnet wird, herangezogen werden. Dabei werden die Umweltauswirkungen über den gesamten Lebensweg ermittelt und abgebildet. (Eberle et al., 2015, S. 2)

Eine Ökobilanz wurde erstmals von Patrick Geddes, einem schottischen Biologen und Ökonomen, im 19. Jahrhundert vorgeschlagen. Dabei ging es ihm in erster Linie um eine Verbesserung des Wirkungsgrades der Kohlenutzung. Anfang der 1970er-Jahre wurden Methoden zum Vergleich der atmosphärischen Schadstoffbelastungen verschiedener Kraftwerkstypen entwickelt und vermehrt Untersuchungen über die Energiekosten unterschiedlicher Produkte und Prozesse durchgeführt. Auch erste quantitative Ökobilanzen nach umfassenderen ökologischen Kriterien wurden in den 1970er Jahren erstellt. (Frischknecht, 2005, S. 5-6)

Heute wird die Vorgehensweise für Ökobilanzierungen in der ÖNORM EN ISO 14040 beschrieben. Dabei wird in Sachbilanz-Studien und Ökobilanz-Studien unterschieden. Sachbilanz-Studien enthalten im Gegensatz zu Ökobilanz-Studien keine Wirkungsabschätzung (ÖNORM EN ISO 14040, 2021, S. 9).

Die ÖNORM EN ISO 14040 (2021) bezeichnet die Ökobilanz als *„Zusammenstellung und Beurteilung der Input- und Outputflüsse und der potentiellen Umweltwirkungen eines Produktsystems im Verlauf seines Lebensweges“*.

2.1.2. Phasen einer Ökobilanz

Die ÖNORM EN ISO 14040 unterteilt die Erstellung von Ökobilanz-Studien in vier Phasen (siehe hierzu auch Abbildung 1):

- Festlegung des Ziels und des Untersuchungsrahmens
- Sachbilanz
- Wirkungsabschätzung
- Auswertung / Interpretation

(ÖNORM EN ISO 14040, 2021, S. 16)



Abbildung 1: Phasen einer Ökobilanz (Eberle et al., 2015, S. 6)

1. Bei Zieldefinition werden unter anderem die funktionelle Einheit, die Systemgrenze, die Methode der Wirkungsabschätzung und die Datenquellen festgelegt. Die funktionelle Einheit ist die Bezugsgröße, auf die die Daten normiert werden, z.B. ein Gebäude oder m² Bruttogeschossfläche. Bei den Systemgrenzen ist zu beachten, dass die allgemeinen Schlussfolgerungen der Studie nicht wesentlich verändert werden. Dabei wird der Detaillierungsgrad der Ökobilanz festgelegt. Bei der Methode der Wirkungsabschätzung müssen die zu berücksichtigenden Wirkungskategorien und deren Wirkungsindikatoren bestimmt werden. Eine Wirkungskategorie ist zum Beispiel die Klimaänderung, der zugehörige Wirkungsindikator ist das Kilogramm der CO₂-Äquivalente je funktioneller Einheit. Als Datenquellen können entweder an Produktionsstandorten gesammelte Werte oder Datenquellen aus der Fachliteratur herangezogen werden. (ÖNORM EN ISO 14044, 2021, S. 16ff)
2. Beim Erstellen der Sachbilanz werden die notwendigen Daten zur Berechnung der Input- und Outputflüsse gesammelt. Dabei werden Masse- und Energiebilanzen für die einzelnen Prozesse erstellt. Da in der Praxis viele Daten nicht bekannt sind, wird eine größtmögliche Annäherung mit einer Ökobilanzsoftware versucht oder Daten aus veröffentlichten Quellen entnommen. Mit den erhobenen Daten wird dann eine entsprechende Bilanz bezogen auf eine funktionelle Einheit erstellt. Die aufzunehmenden Daten sollen auf einer Sensitivitätsanalyse beruhen. Im Zuge der Sensitivitätsanalyse kann es dazu kommen, dass einzelne Lebenswegabschnitte vernachlässigt werden können oder neue Inputs und Outputs aufgenommen werden. (ÖNORM EN ISO 14044, 2021, S. 21ff; Eberle et al., 2015, S. 8)
3. Die Wirkungsabschätzung verdichtet Informationen aus der Sachbilanz auf wenige Parameter. Die Sachbilanzdaten werden mit den zu Beginn festgelegten Wirkungs-

kategorien und Wirkungsindikatoren verknüpft. Dabei wird versucht die resultierenden potenziellen Wirkungen zu erkennen. (ÖNORM EN ISO 14040, 2021, S. 24; Eberle et al., 2015, S. 10)

4. Den Abschluss einer Ökobilanz bilden die Auswertung und Interpretation der Ergebnisse. Dabei werden Schlussfolgerungen und Empfehlungen aus der Sachbilanz und der Wirkungsabschätzung diskutiert. (ÖNORM EN ISO 14040, 2021, S. 8)

2.1.3. Lebenszyklusphasen

Für die Ökobilanz werden die Daten aller verwendeten Produkte, Inhaltsstoffe und Verarbeitungsprozesse über den gesamten Lebensweg ermittelt (Eberle et al., 2015, S. 5).

Die nachfolgende Abbildung 2 veranschaulicht, dass der Lebensweg eines Produktes nicht ausschließlich auf die Nutzungszeit beschränkt ist. Der Lebensweg startet mit dem Abbau des Rohstoffes und endet mit dem Recycling der Bestandteile nach der Nutzung.

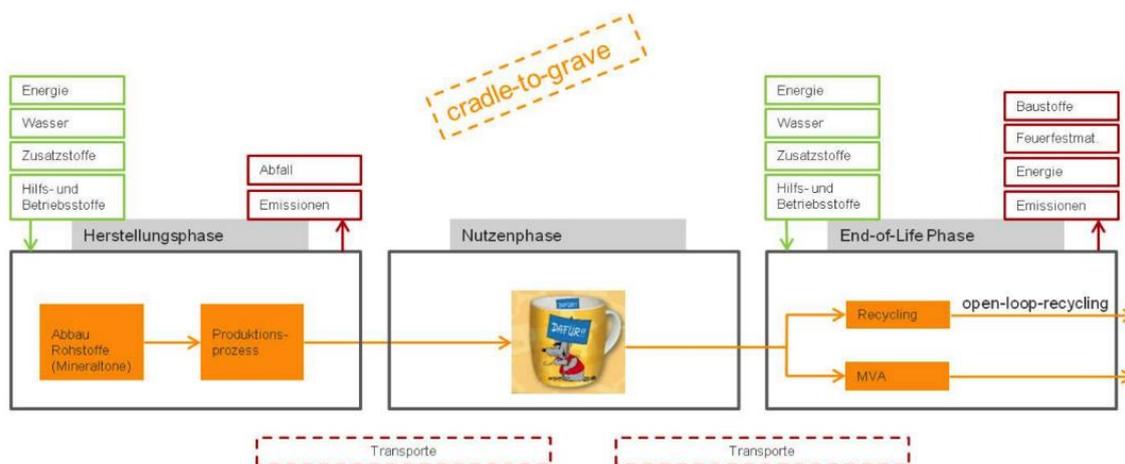


Abbildung 2: Erfassung aller Materialien und Prozesse im Zuge einer Ökobilanz (Eberle et al., 2015, S. 5)

Die ÖNORM EN 15804 (2022) unterteilt den Lebenszyklus in folgende Phasen:

- Phase A: Herstellungs- und Errichtungsphase
- Phase B: Nutzungsphase
- Phase C: Entsorgungsphase
- Phase D: Lasten und Vorteile außerhalb der Systemgrenze

Eine detaillierte Darstellung der einzelnen Phasen ist der Tabelle 1 zu entnehmen.

Tabelle 1: Lebenszyklusphasen nach ÖNORM EN 15804 (2022) (eigene Darstellung)

Phase	Beschreibung	
A1	Rohstoffgewinnung und -verarbeitung und Verarbeitungsprozess von als Input dienenden Sekundärstoffen (z.B. Recyclingprozesse)	Herstellungsphase
A2	Transport zum Hersteller	
A3	Herstellung	
A4	Transport zur Baustelle	Errichtungsphase
A5	Einbau in das Gebäude	
B1	Nutzung oder Anwendung des eingebauten Produkts	Nutzungsphase bezogen auf die Bausubstanz
B2	Inspektion, Wartung, Reinigung	
B3	Reparatur	
B4	Austausch, Ersatz	
B5	Verbesserung, Modernisierung	
B6	Energieeinsatz für das Betreiben des Gebäudes (z.B. Betrieb eines Heizsystems und anderer technischer Gebäudeausrüstungen)	Nutzungsphase bezogen auf den Betrieb des Gebäudes
B7	Wassereinsatz für das Betreiben des Gebäudes	
C1	Rückbau, Abriss	Entsorgungsphase
C2	Transport zur Abfallbehandlung	
C3	Abfallbehandlung zur Wiederverwendung, Rückgewinnung und/oder zum Recycling	
C4	Beseitigung	
D	Wiederverwendungs-, Rückgewinnungs- und/oder Recyclingpotenziale, als Nettoflüsse und Vorteile angegeben	Vorteile und Lasten außerhalb der Systemgrenze

2.1.4. LCA-Screeninganalyse

Bei einer LCA-Screeninganalyse (Screening LCA) handelt es sich um eine überschlägige Ökobilanz. Ziel ist es, die wirklich relevanten Parameter zu erfassen, dies müssen nicht alle Parameter sein. Dementsprechend sind die Ergebnisse auch zu bewerten. Bei vergleichenden Studien haben knappe Ergebnisse keine Aussagekraft. (Eberle et al., 2015, S. 20)

2.2. Wirkungskategorien

2.2.1. Allgemeines

Zur Wirkungsabschätzung gibt es unterschiedliche Ansätze zur Bewertung (Eberle et al., 2015, S. 10; Weißenberger, 2016, S. 10):

- Schadensorientiert (Endpoint-Indikatoren)
- Wirkungsorientiert (Midpoint-Indikatoren)

Die schadensorientierten Wirkungsindikatoren zeigen den „Endpunkt“ einer Ursachens- und Wirkungskette (Blom et al., 2010, S 2363).

Einen Überblick über diese Wirkungskategorien gibt die Tabelle 2.

Tabelle 2: schadensorientierte Wirkungskategorien (Goedkoop et al., 2009, S. 8)

Wirkungskategorie	Abk.	Wirkungsindikator
Schädigung der menschlichen Gesundheit	HH	Verlust an Lebensjahren
Schädigung der Vielfalt der Ökosysteme	ED	Verlust an Arten während eines Jahres
Schädigung der Ressourcenverfügbarkeit	RA	Erhöhte Kosten

Um Endpoint-Indikatoren zu bestimmen, werden die Berechnungen der Midpoint-Indikatoren herangezogen (Goedkoop et al., 2009, S. 6). Der schadensorientierte Ansatz liefert zusätzliche Informationen über Schäden, hat jedoch einen höheren Interpretationsgrad und führt zu mehr Unsicherheiten. Im Vergleich dazu ermöglicht der wirkungsorientierte Ansatz eine zuverlässigere Bewertung und ist daher vorzuziehen. (Dong & Ng, 2014, S. 1421)

In der ÖNORM EN ISO 14040 wird eine Abschätzung gefordert die einer wirkungsorientierten Methode entspricht (Eberle et al., 2015, S 10).

Beispiele solcher (Midpoint-)Wirkungskategorien sind (Weißenberger, 2016, S. 11):

- Treibhauspotenzial
- Primärenergieinhalt gesamt/erneuerbar/nicht erneuerbar
- Ozonabbaupotenzial
- Versauerungspotenzial
- Eutrophierungspotenzial
- Sommersmogpotenzial
- Abiotischer Ressourcenverbrauch

Diese Wirkungskategorien unterscheiden sich in input-bezogene, output-bezogene und toxizitätsbezogene Wirkungskategorien.

Input-bezogene Wirkungskategorien beziehen sich auf die Ressourcennutzung, beispielsweise Naturraumbeanspruchung oder fossiler Ressourcenverbrauch. Output-bezogene Wirkungskategorien zielen auf die potenziellen Umweltwirkungen von Emissionen wie zum Beispiel das Ozonabbaupotenzial oder das Treibhauspotenzial. Toxizitätsbezogene Wirkungskategorien schätzen die Auswirkungen von Schadstoffen auf das Ökosystem ab. Da Schadstoffe nicht einfach aufgerechnet werden können, ist die Ermittlung sehr schwierig. (Eberle et al., 2015, S. 14 - 15)

In den folgenden Kapiteln werden die in dieser Arbeit verwendeten Wirkungskategorien näher beschrieben.

2.2.2. Treibhauspotenzial (GWP)

Treibhausgase absorbieren die infrarote Wärmestrahlung, die von der Erdoberfläche ausgesendet wird und in den Weltraum abgestrahlt würde. Dieser Effekt bewirkt, dass die Erde ein wärmeres Klima aufweist, das Leben ermöglicht.

Der rasch gestiegene Ausstoß von Treibhausgasen im letzten Jahrhundert ist laut dem IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change, Weltklimarat) die Hauptursache für den Temperaturanstieg seit Mitte des 20. Jahrhunderts. Seit Beginn der Industrialisierung nahm die CO₂-Konzentration in der Atmosphäre kontinuierlich zu, von 280 ppm im Jahr 1800 auf 412 ppm im Jahr 2020. Diese Konzentration ist vergleichbar mit jener in der Warmzeit vor 3,6 Millionen Jahren. Damals war der Meeresspiegel um 24 Meter höher als heute, ebenso war die Durchschnittstemperatur um bis 4,0 °C höher als in der vorindustriellen Zeit.

Auch die Konzentration anderer Treibhausgase in der Atmosphäre steigt kontinuierlich an. Um die Klimaerwärmung auf 2,0 °C zu begrenzen, sind ab dem Jahr 2070 Netto-Null-Emissionen erforderlich, bis zum Jahr 2050 müssen die Emissionen in den Industriestaaten um 80 - 95 % reduziert werden. (Anderl et al., 2021, S. 20 - 25)

Um die Auswirkungen auf die Klimaerwärmung zu quantifizieren, wird die Wirkungskategorie des Treibhauspotenzials ermittelt. Das Treibhauspotenzial, abgekürzt GWP (Global Warming Potential) repräsentiert die durch den Treibhauseffekt ausgelöste globale Erwärmung, die verwendete Einheit ist kg CO₂-Äquivalent (ÖNORM EN 15804, 2022, S. 43). Die Treibhausgase werden für eine Zeitraum von 100 Jahren bestimmt (ÖNORM EN 15804, 2022, S. 35).

Die unterschiedlichen zum Treibhauseffekt beitragenden Gase wie Methan (CH₄), Distickstoffmonoxid (Lachgas, N₂O) und das bekannteste, Kohlendioxid (CO₂), werden unter dieser

Wirkungskategorie zusammengefasst (Eberle et al., 2015, S. 15). Gemäß dem 4. Sachstandsbericht des IPCC beträgt das GWP von Methan 25 kg CO₂-Äq., Lachgas hat ein GWP von 298 kg CO₂-Äq. (Anderl et al., 2021, S. 37).

2.2.3. Primärenergieinhalt (PE)

Der Primärenergieinhalt ist ein inputbezogener Parameter der den energetischen Ressourceneinsatz abbildet. Die Ressourcen werden in Form von Rohenergie bewertet, beispielsweise Öl, das noch nicht gefördert wurde. (IBO - Österreichisches Institut für Bauen und Ökologie GmbH, 2016, S. 8 - 9)

Die Einheit ist Kilowattstunden oder Megajoule (kWh bzw. MJ). Der gesamte Primärenergieinhalt beinhaltet die **erneuerbare Primärenergie (PE_{RT})** und die **nicht erneuerbare Primärenergie (PE_{NRT})**. Auch wenn der Begriff „erneuerbar“ physikalisch falsch ist, ist diese Begrifflichkeit allgemein bekannt und wird daher verwendet. Nicht erneuerbare Energien sind beispielsweise Kohle oder Erdgas. Zu den erneuerbaren Energien zählen unter anderem Wasserkraft, Solarenergie oder Biomasse bezeichnet. (Weißberger, 2016, S. 11 -12)

Diese Parameter drücken als inputbezogene Parameter keine potenziellen Umweltauswirkungen aus, zur Analyse der Energieeffizienz und des Ressourcenverbrauchs sind sie dennoch üblich (Weißberger, 2016, S. 12).

Graue Energie

Die Begrifflichkeit der grauen Energie wurde in der Schweiz geprägt, und wird als Summe der nicht erneuerbaren Primärenergien definiert (Weißberger, 2016, S. 12).

Die Graue Energie eines Gebäudes errechnet sich aus der Summe der Werte aller Bauteile aus den vorgelagerten Prozessen, den nötigen Ersatzinvestitionen und der Entsorgung. Der Energieinput für den Betrieb und Unterhalt gehören gemäß SIA 2032 nicht dazu. (Gugerli et al., 2008, S. 3 und 7).

Die graue Energie wird auf Fläche und Zeitspanne bezogen, um sie mit der Energie für den Betrieb vergleichbar zu machen (EnergieSchweiz, Bundesamt für Energie BFE, 2017, S. 5).

3. Stand der Forschung

In diesem Kapitel soll ein kurzer Überblick über bereits durchgeführte Forschungen gegeben werden.

2008 wurde von Thyholt und Hestnes in Norwegen eine Studie durchgeführt, in der Elektroheizungen mit Fernwärmeheizungen bei Wohnbauprojekten verglichen wurden. In Norwegen gab es zu dem Zeitpunkt die Problematik, dass den Bauträgern ein Fernwärmeanschluss in Verbindung mit Niedrigenergie-Wohngebäuden zu teuer war um eine akzeptable Rentabilität zu erreichen. Ziel war es zu untersuchen, ob es im Hinblick auf die CO₂-Emissionen und die Stromversorgung besser ist, ein Niedrigenergie-Wohngebäude mit Elektroheizung oder ein nach Bauvorschriften gebautes Wohngebäude mit einem Fernwärmeanschluss zu bauen. Es wurde ein fiktives Gebäude mit 1200 m² und 24 Wohneinheiten untersucht. Dabei wurde die Referenzvariante (nach Bauvorschriften) mit zwei anderen Varianten verglichen. Die Varianten hatten einen um 35 % bzw. 65 % niedrigeren Energiebedarf als die Referenzvariante. Zur Energiebedarfsdeckung wurde angenommen, dass die Referenzvariante mit Fernwärme versorgt wird. Die zwei anderen Varianten wurden elektrisch beheizt und in einer weiteren, kombinierten Variante (Heizung elektrisch, Warmwasser über Fernwärme) mit Heizenergie versorgt. Es wurden zwei Varianten für die CO₂-Emissionen der Fernwärme angenommen. Die Emissionen für die Stromerzeugung im Elektrizitätsmodell wurden ebenfalls in zwei Varianten angenommen, mit Erzeugung aus Kohle und Gas. Im Ergebnis waren die CO₂-Emissionen bei der Referenzvariante niedriger als bei den Varianten mit elektrischer Heizung. Es wurde auch festgestellt, dass bei geringeren Emissionen der Stromerzeugung die elektrische Beheizung von Niedrigenergie-Wohngebäuden ökologisch besser sein kann als der Bau von Wohngebäuden nach Bauvorschriften. (Thyholt & Hestnes, 2008)

Blom et al. haben 2010 unterschiedliche Heizsysteme in Bezug auf neun Umweltwirkungen bei einem fiktiven Gebäude mit 70 Wohneinheiten in den Niederlanden untersucht. Dabei wurden vier Varianten von Gasheizungen und eine Variante mit Wärmepumpe verglichen. Die Wartung wurde sehr detailliert berücksichtigt, hatte jedoch sehr geringe Auswirkungen auf das Ergebnis. Die Jahresarbeitszahl der Wärmepumpe wurde mit 3,2 für die Heizung und 2,3 für die Warmwasserbereitung angenommen, als Kältemittel wurde R-134A verwendet. Für die Stromerzeugung wurde der Strommix aus den Niederlanden im Jahr 2004 angesetzt. Dieser bestand zu ca. 20 % aus Kohle, 55 % aus Gas und Öl, je 3 % Kernkraft und erneuerbare Energieträger. Der Rest wurde aus Deutschland und Belgien importiert sowie zu einem geringen Teil aus Abfall gewonnen. Für die Kältemittelleckage gibt es keine direkte Angabe. In dieser Arbeit hatte die Wärmepumpe die höchste Umweltbelastung aller Varianten, insbesondere beim Ozonabbaupotenzial. Das GWP der Variante mit Wärmepumpe war um etwa

25 % höher als bei der höchsten Varianten der Gasheizung. Es wurde auch ein Stromerzeugungsszenario mit 58 % fossilen Energieträgern, 33 % erneuerbaren Energieträgern und etwa 9 % Import, Kernkraft und Abfall getestet. Unter diesem Szenario hat die Wärmepumpe ein etwa gleich hohes GWP wie die schlechteste Gasheizung. Bei einer Stromerzeugung ausschließlich aus Photovoltaik sinkt das GWP auf 25 % der schlechtesten Gasheizung. In den meisten anderen Wirkungskategorien (mit Ausnahme des ADP) war die Wärmepumpe trotzdem schlechter, die Auswirkungen des Kältemittels wurden leider nicht konkret ausgewiesen. (Blom et al., 2010)

In der Arbeit von Johnson wurde 2011 das Treibhauspotenzial einer Luft/Wasser-Wärmepumpe berechnet. Dabei wurde ein GWP 0,2 kg CO₂-Äq. pro kWh Wärme ermittelt. Der Anteil des Kältemittels, bei einer Leckagerate von 6% pro Jahr, betrug etwa 16 % an den Gesamtemissionen, der Anteil des Stromverbrauchs 81 %. Die Jahresarbeitszahl wurde mit 3,9 bzw. 2,6 angesetzt, der Konversionsfaktor für Strom mit 550 g CO₂-Äq. pro kWh. Das GWP wurde mit nicht nachvollziehbaren Werten der Defra / DECC verglichen um zu dem Ergebnis zu kommen, dass die Emissionen der Wärmepumpe etwa auf dem Niveau einer Gasheizung liegen. (DEFRA / DECC, 2010, S. 9) (Johnson, 2011)

In der Arbeit von Lin et al. wurde eine Hybrid-Wärmepumpe (Kombination mit Gasheizung) mit einer Gasheizung bei einem Doppelhaus in Großbritannien verglichen. Der Betrachtungszeitraum betrug 20 Jahre, es wurde lediglich die Heizung ohne Warmwasserbereitung verglichen. Die Aufteilung der Hybrid-Wärmepumpe wurde mit 80 % Wärmepumpe / 20 % Gas angenommen, als Kältemittel R-410A. Die Kältemittelleckage wurde mit 6 %, die Jahresarbeitszahl der Wärmepumpe mit 2,7 angesetzt. Der Strommix wurde für Großbritannien 2018 (ca. 40 % fossil / 14 % Kernkraft / 41 % erneuerbar / 5 % Import) angenommen. Auch in diese Studie war der Anteil der Kältemittelleckage etwa 17 % am GWP. Im Ergebnis war die Hybrid-Wärmepumpe beim Treibhauspotenzial 30% besser als die Gasheizung. Auch in den meisten anderen Wirkungskategorien war die Wärmepumpe besser als die Gasheizung. (Lin et al., 2021)

Beim Forschungsprojekt „IR-Bau“ wurde der Fragen nachgegangen ob elektrische Infrartheizungen bei sehr gut gedämmten Wohngebäuden eine Alternative zu Wärmepumpensystemen sein können. Die Forschungen erfolgten in einem Wohngebäude, in Laborräumen und durch Simulationen. Der Vergleich wurde sowohl in ökologischer wie auch in ökonomischer Hinsicht durchgeführt. Beim elektrischen Heizsystem wurde eine Variante mit und eine ohne Photovoltaikanlage angenommen. In der Gesamt-Ökobilanz betragen die CO₂-Emissionen der Wärmepumpe ca. 21 kg CO₂-Äq. pro m² NGF und Jahr, die IR-Variante mit PV erreichte 21 kg CO₂-Äq. pro m² NGF und Jahr, während die IR-Variante ohne PV ein GWP von ca. 32 21 g CO₂-Äq. pro m² NGF und Jahr hatte. (Heider et al., 2020)

4. Grundlagen zu den verwendeten Ökobilanzdaten

4.1. Herstellung

4.1.1. Photovoltaikanlage

4.1.1.1. Allgemeines

In der Vergangenheit wurden zahlreiche wissenschaftliche Studien zur Bewertung der Umweltwirkungen von PV-Anlagen durchgeführt (Hengstler et al., 2021, S. 41).

Im Jahr 2012 wurden großangelegte Metastudien zur Harmonisierung der Ökobilanzergebnisse unterschiedlicher Arbeiten durchgeführt. Dabei wurden die Annahmen angeglichen um eine einheitliche Vergleichsbasis zu erhalten. Die Ergebnisse reichten von 14 g CO₂-Äq./kWh bis 54 g CO₂-Äq./kWh. Auch später wurden Metastudien zur Harmonisierung durchgeführt, jedoch mit teilweise anderen Annahmen in Bezug auf beispielsweise die Degradation oder Lebensdauer von PV-Anlagen. Die Ergebnisse der Studien zeigen insgesamt hohe Bandbreiten auf. (Hengstler et al., 2021, S. 53–78)

Die IEA PVPS Task 12 Arbeitsgruppe legt Mindestanforderungen an die Dokumentation von Ökobilanzergebnissen fest und gibt Empfehlungen zu methodischen Fragestellungen (Hengstler et al., 2021, S. 80).

Sie entwickelte folgende Empfehlungen zu den technischen Standardmerkmalen einer PV-Anlage:

1. Lebensdauer:
 - 30 Jahre bei PV-Modulen mit ausgereifter Technologie, bei der Unterkonstruktion von Dach und Fassadenanlagen sowie der Verkabelung
 - 15 Jahre bei Wechselrichtern in kleinen Anlagen, 30 Jahre bei großen Anlagen mit einem Austausch von 10 % der Teile alle 10 Jahre
 - 30 Jahre oder kürzer bei den Produktionsanlagen
2. Ausrichtung: optimale Ausrichtung bezogen auf den Breitengrad oder die tatsächliche Einstrahlung bei einem konkreten Gebäude.
3. Performance Ratio: Das Performance Ratio (PR) gibt das Verhältnis zwischen dem Endertrag der Anlage im Verhältnis zum Referenzertrag an. Damit werden die Gesamtverluste der Anlage durch Verschmutzung, Abschattung, Temperatureinflüsse und Ineffizienz der Anlage quantifiziert. Für diesen Wert wird empfohlen, einen Standardwert von 0,75 oder standortspezifische Werte zu verwenden.
4. Degradation: Hier wird von einer linearen Degradation von 0,7 % ausgegangen. Das entspricht einem durchschnittliche Wirkungsgradverlust von 10,5 % über die Lebenszeit von 30 Jahren im Vergleich zum anfänglichen Wirkungsgrad.
5. Empfehlungen, wenn der Netzbetreiber die Einspeiseleistung begrenzt.

6. Backupsysteme wie Stromspeicher werden als außerhalb der Systemgrenze betrachtet. (Frischknecht et al., 2020, S. 12–15)

Weiters werden Empfehlungen zur Modellierung und den Systemgrenzen abgegeben. Als funktionelle Einheit sollte zum Vergleich mit anderen Energieerzeugungssystemen die Kilowattstunde (kWh) verwendet werden. Alternativ kann auch ein Bezug pro m² Fläche oder pro kWp Leistung verwendet werden. (Frischknecht et al., 2020, S. 12–20)

Die Europäische Kommission gibt Vorgaben für die Erstellung eines ökologischen Fußabdrucks (Product Environmental Footprint – PEF) von PV-Anlagen. Das entsprechende Regelwerk (Product Environmental Footprint Categories Rules PEFCR) für die PV-Stromerzeugung wurde im Jahr 2018 veröffentlicht. Das Ziel hierbei ist die Vergleichbarkeit am Markt konkurrierender Produkte sicherzustellen. (Hengstler et al., 2021, S. 80,83)

Aufgrund der technischen Weiterentwicklungen im Produktionsprozess sowie steigender Modulwirkungsgrade ist eine laufende Aktualisierung der Datengrundlagen notwendig. Die Mehrheit der Studien ist in Bezug auf die Wirkungsgrade der PV-Module zum Zeitpunkt der Veröffentlichung auf dem Stand der Technik. Die Sachbilanzdaten in Bezug auf die Modulherstellung sind jedoch häufig veraltet, was unter anderem an der Notwendigkeit meist vertraulicher Herstellerdaten liegt. (Hengstler et al., 2021, S. 90–91)

Hengstler et al., 2021 haben daher im Auftrag des deutschen Umweltbundesamtes eine Aktualisierung der Ökobilanzdaten für PV-Anlagen vorgenommen, die in den folgenden Punkten näher erläutert wird. Ihre grundlegende Vorgehensweise ist in Abbildung 3 ersichtlich.

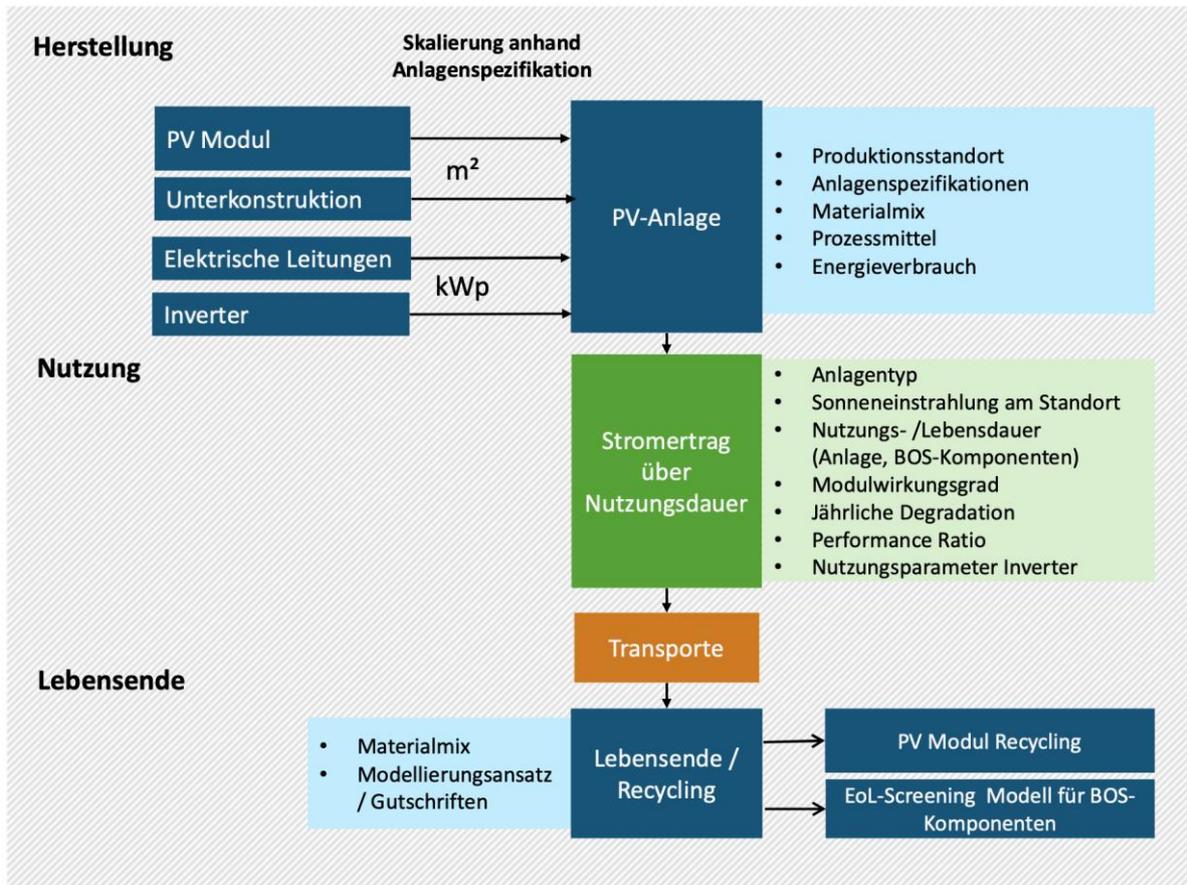


Abbildung 3: Modellstruktur zur Ökobilanzierung von PV-Anlagen (Hengstler et al., 2021, S. 141)

Die Herstellung von Infrastrukturen an den Produktionsstandorten wurde nicht berücksichtigt. (Hengstler et al., 2021, S. 121,125).

4.1.1.2. Inverter

Bei den Invertern wurde eine Nutzungsdauer von 20 Jahren angenommen, es wurden 3 Inverter mit einer Bemessungsleistung von 2,5 kW, 25 kW und 2,2 MW berechnet (Hengstler et al., 2021, S. 147).

Die wichtigsten Kennwerte der beiden kleineren Inverter sind in Tabelle 3 dargestellt. Wie aus diesen Daten hervorgeht, hat der größere Inverter ein etwas sechsmal so hohes Gewicht bei einer zehnmal höheren Leistung. Das verwendete Aluminium wurde als Sekundäraluminium angenommen, bei einem Einsatz von Primäraluminium würde sich der Anteil des Gehäuses an den Ökobilanzergebnissen signifikant erhöhen. (Hengstler et al., 2021, S. 147–155)

Tabelle 3: Kennwerte Inverter (Hengstler et al., 2021, S. 147–155)

Parameter	Inverter 2,5 kW	Inverter 25 kW
Gesamtmasse	ca. 9 kg	ca. 61 kg
Massenanteile	ca. 61 % Aluminium ca. 16 % bestückte Leiterplatten ca. 23 % Sonstiges (Kabel, Drosseln...)	ca. 25 % Aluminium ca. 70 % Drosseln ca. 5 % Sonstige (Leiterplatten, Lüfter...)
Wirkungsgrad	96,7 %	98,1 %
Transporte	Elektronik – Schiff (13 400 km) und LKW (900 km), andere Materialien Transporte innerhalb Europas (1 200 km)	
Lebensdauer	20 Jahre	
Eigenstromverbrauch (nachts) mit EU-Strommix	0,16 W	1 W

In der nachfolgenden Tabelle 4 sind die Ökobilanzergebnisse in Bezug auf das Treibhauspotenzial und die nicht erneuerbare Primärenergie dargestellt. Dabei werden die Ergebnisse sowohl mit als auch ohne Recyclinggutschrift dargestellt. Bei dem kleineren Wechselrichter ist der Anteil der recyclingfähigen Materialien vermindert. Es zeigt sich, dass der größere Inverter in beiden Wirkungskategorien geringere Umweltwirkungen hat.

Tabelle 4: Ökobilanzergebnisse Inverter (Hengstler et al., 2021, S. 155)

Ergebnisse je kWp bei einer Nutzungsdauer von 20 Jahren (Herstellung, Lebensende und Nachtstromverbrauch)	Inverter 2,5 kW	Inverter 25 kW
GWP ohne Recyclinggutschrift	53,6 kg CO ₂ -Äq.	20,0 kg CO ₂ -Äq.
GWP mit Recyclinggutschrift	52,6 kg CO ₂ -Äq.	17,7 kg CO ₂ -Äq.
PE _{NRT} [MJ] ohne Recyclinggutschrift	730 MJ	279 MJ
PE _{NRT} [MJ] mit Recyclinggutschrift	714 MJ	248 MJ

4.1.1.3. Unterkonstruktion

Bei der Unterkonstruktion einer Dachanlage beträgt die Masse 4,5 kg pro Quadratmeter Modulfläche. Der Materialinput teilt sich in Aluminium und Stahl sowie einen geringen Anteil Verpackung auf. Die Herstellung der Unterkonstruktion wurde über Primärmaterialien abgebildet, wodurch sich die Recyclinggutschriften am Lebensende erhöhen. Bei Berücksichtigung der Recyclinggutschriften ergeben sich keine signifikanten Unterschiede im Vergleich

zur Verwendung von Sekundärmaterialien. Insbesondere das Aluminium hat einen großen Einfluss auf die Ergebnisse, die in der Tabelle 5 dargestellt sind. (Hengstler et al., 2021, S. 155–156)

Tabelle 5: Ökobilanzergebnisse Unterkonstruktion (Hengstler et al., 2021, S. 159)

Unterkonstruktion je m² Modulfläche	Dachinstallation
GWP ohne Recyclinggutschrift	31,8 kg CO ₂ -Äq.
GWP mit Recyclinggutschrift	16,1 kg CO ₂ -Äq.
PE _{NRT} [MJ] ohne Recyclinggutschrift	421 MJ
PE _{NRT} [MJ] mit Recyclinggutschrift	215 MJ

4.1.1.4. Elektrische Leitungen

Bei den elektrischen Leitungen wurde der Materialverbrauch einer 3 kWp Dachanlage sowie einer 570 kWp-Freiflächenanlagen herangezogen (Hengstler et al., 2021, S. 160).

Bei der Dachanlage werden für die Verkabelung der Module 245 m ummantelte Kupferkabel mit einem Leitungsquerschnitt von 2,5 mm² sowie Isolationsrohre, Kabelschuhe und Klemmschellen benötigt. Zusätzlich wird eine Verkabelung zum Wechselrichter, vom Wechselrichter zum Stromzähler und einige Teile im Sicherungskasten benötigt. Für den Blitzschutz wird ein zehn Meter langes Kupferkabel mit einem Leitungsquerschnitt von 28 mm² angesetzt. Die Gesamtmasse der elektrischen Leitungen beträgt 32,6 kg. (Jungbluth et al., 2012, S. 121–123)

Die Freiflächenanlage wurde anhand zehn konkreter Großprojekte modelliert. Die Gesamtmasse der Verkabelung beträgt zum Beispiel 163 kg für eine 93 kWp-Anlage oder 715 kg für eine 280 kWp-Anlage. (Jungbluth et al., 2012, S. 124)

Die Werte wurden anschließend auf 1 kWp Anlagenleistung bezogen, die Ökobilanzergebnisse der beiden Berechnungen sind in Tabelle 6 dargestellt.

Tabelle 6: Ökobilanzergebnisse elektrische Leitungen (Hengstler et al., 2021, S. 163)

Elektrische Leitungen je kWp	Dachanlage	Freiflächenanlage
GWP ohne Recyclinggutschrift	66,1 kg CO ₂ -Äq.	16,5 kg CO ₂ -Äq.
GWP mit Recyclinggutschrift	37,7 kg CO ₂ -Äq.	9,2 kg CO ₂ -Äq.
PE _{NRT} [MJ] ohne Recyclinggutschrift	718 MJ	181 MJ
PE _{NRT} [MJ] mit Recyclinggutschrift	368 MJ	93 MJ

4.1.1.5. PV-Module

Grundsätzlich gibt es mehrere marktrelevante Technologien bei Photovoltaik-Modulen. Es wird zwischen Silizium Wafer-Technologien, multikristallin und monokristallin (multi c-Si und mon c-Si), sowie Dünnschichttechnologien unterschieden (Hengstler et al., 2021, S. 45). Am Weltmarkt sind die multikristallinen Module mit einem Marktanteil von über 80 % dominant (Fraunhofer Institut, 2022, S. 23). Dementsprechend wird in diesem Kapitel nur die Ökobilanz multikristalliner Module behandelt.

Wie in Abbildung 4 dargestellt, ist die Prozesskette zur Herstellung in folgende Schritte unterteilt (Hengstler et al., 2021, S. 165):

1. Herstellung von metallurgischem Silizium
2. Aufbereitung zu Polysilizium
3. Herstellung eines multikristallinen Blockgusses (bzw. eines Einkristalles)
4. Waferherstellung
5. Solarzellenherstellung
6. Modulherstellung, Rahmenmontage

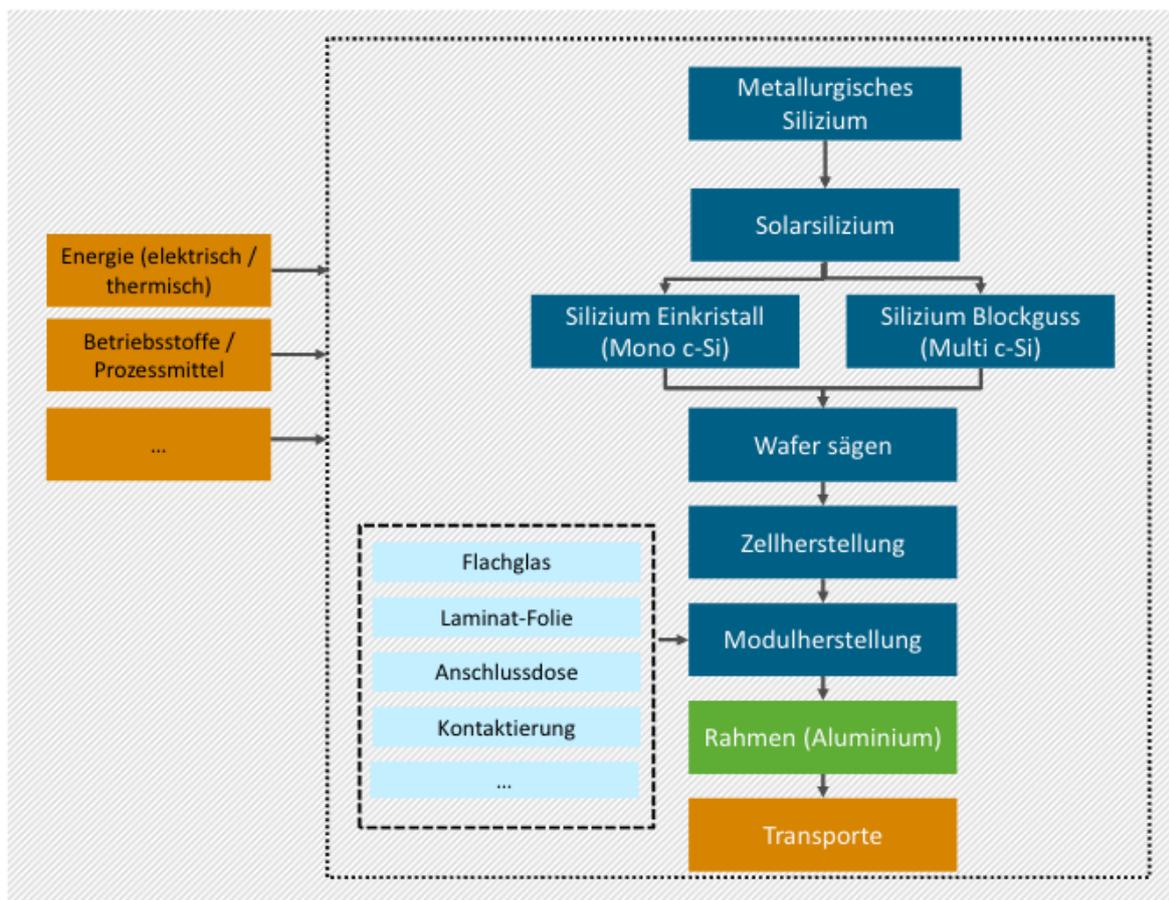


Abbildung 4: Modellstruktur zur Herstellung kristalliner Silizium Module (Hengstler et al., 2021, S. 169)

Der Materialinput inklusive der Materialverluste in den einzelnen Prozessschritten besteht zu etwa 75 % aus Glas. Der Anteil des Aluminiumrahmens beträgt ca. 16 %, der Rest teilt sich auf die Zellen, die Laminatfolie, Kupfer, Aluminium und sonstige Kunststoffe auf. Etwa 75 – 85 % der Umweltwirkungen bei der Modulherstellung sind auf die Herstellung der Zellen bzw. der vorgelagerten Prozesse zurückzuführen. In den letzten Jahren konnte der Energieverbrauch aber auch der Materialeinsatz in der Wafervorkette reduziert werden. Der hohe Energieverbrauch sowie der zur Herstellung verwendete Stromerzeugungsmix haben einen großen Einfluss auf die Ökobilanz. Wenn bei der Erzeugung des Solarsiliziums statt einem chinesischen Stromerzeugungsmix (mit einem GWP von 836 g CO₂-Äq. pro kWh) ein Stromerzeugungsmix aus Norwegen (mit einem GWP von 29,9 g CO₂-Äq. pro kWh) angesetzt wird, sinkt das GWP bezogen auf das gesamte Modul um etwa 20 %. (Hengstler et al., 2021, S. 167–196)

In der nachfolgenden Tabelle 7 sind die Ergebnisse mit folgenden zwei Stromerzeugungsszenarien dargestellt:

- Stromerzeugungsmix China: GWP: 836 g CO₂-Äq. /kWh; PE_{NRT}: 8,7 MJ/kWh
- Stromerzeugungsmix Norwegen in Schritt 1 und 2, restliche Prozessschritte Europa
 - Prozessschritte 1, 2: GWP: 30 g CO₂-Äq. /kWh; PE_{NRT}: 0,35 MJ/kWh
 - Prozessschritte 3 ff: GWP: 418 g CO₂-Äq. /kWh; PE_{NRT}: 7,52 MJ/kWh

Tabelle 7: Ökobilanzergebnisse multikristalliner PV-Module (Hengstler et al., 2021, S. 197)

mono c-Si Module je m² Modul	Stromerzeugungsmix China	Stromerzeugungsmix Norwegen, Europa
GWP ohne Recyclinggutschrift	175 kg CO ₂ -Äq.	114 kg CO ₂ -Äq.
GWP mit Recyclinggutschrift	162 kg CO ₂ -Äq.	102 kg CO ₂ -Äq.
PE _{NRT} [MJ] ohne Recyclinggutschrift	2050 MJ	1620 MJ
PE _{NRT} [MJ] mit Recyclinggutschrift	1880 MJ	1450 MJ

4.1.1.6. Transporte

Die Transporte, die im Zuge der Herstellung anfallen, sind bereits in den oben angegebenen Ergebnissen berücksichtigt. Nicht berücksichtigt sind die Transporte der PV-Module vom Produktionsstandort nach Europa und in Europa, die Transporte der Anlagenteile zum Standort sowie Transporte zur Entsorgung. (Hengstler et al., 2021, S. 136)

Für Transporte wird die Einheit der Tonnenkilometer verwendet, also das Produkt der transportierten Kilometer mit der transportierten Masse (Frischknecht et al., 2015, S. ii).

Für die Transporte zum Anlagenstandort werden in (Jungbluth et al., 2010, S. 131) folgende Annahmen für eine 3 kWp – Anlage getroffen:

- Transport mit Van (<3,5t): 45,7 tkm
- Transport mit LKW >16t: 188 tkm
- Überseetransport mit Frachtschiff: 754 tkm

Mit dem Transportrechner von (treeze.ch, 2022), der auf den KBOB-Ökobilanzdatenbestand v2.2 basiert, ergeben sich bei durchschnittlicher Auslastung die in Tabelle 8 angeführten Umweltbelastungen.

Tabelle 8: Umweltbelastungen (GWP und PE_{NRT}) unterschiedlicher Transportarten (treeze.ch, 2022)

Transportart	GWP	PE _{NRT}
Kleintransporter	1,370 kg CO ₂ -Äq./tkm	22,6 MJ/tkm
Lastwagen 16-32t	0,195 kg CO ₂ -Äq./tkm	3,22 MJ/tkm
Hochseetanker	0,006 kg CO ₂ -Äq./tkm	0,09 MJ/tkm

Aus den obigen Daten errechnen sich folgende Ökobilanzdaten pro kWp für den Transport:

- GWP: 34,6 kg CO₂-Äq.
- PE_{NRT}: 568 MJ

4.1.1.7. Zusammenfassung Umweltwirkungen der Photovoltaik

Da einige Werte pro Quadratmeter PV-Anlage und andere pro kWp Leistung angegeben wurden, ist es notwendig diese auf eine einheitliche Basis zu bringen. Die ÖKOBAUDAT geht von 165 Wp pro Quadratmeter und einem Wirkungsgrad von 13,3 % aus. Bei multikristallinen Modulen kann mit einem Wirkungsgrad von 16,8 % gerechnet werden (Hengstler et al., 2021, S. 118). Dementsprechend ergibt sich ein Wert von 208 Wp pro Quadratmeter.

Zusätzlich muss noch die Lebensdauer angepasst werden. Da der Inverter im Gegensatz zu den anderen Komponenten nur eine Lebensdauer von 20 Jahren hat, wird der Wert des Inverters mit 1,5 multipliziert.

Insgesamt ergibt sich, dass die Module mit einem Anteil von etwa 70 % bis 75 % am Treibhauspotenzial und der nicht erneuerbaren Primärenergie den weitaus größten Anteil ausmachen. Die Aufstellung findet sich in Tabelle 9, eine graphische Übersicht in Abbildung 5.

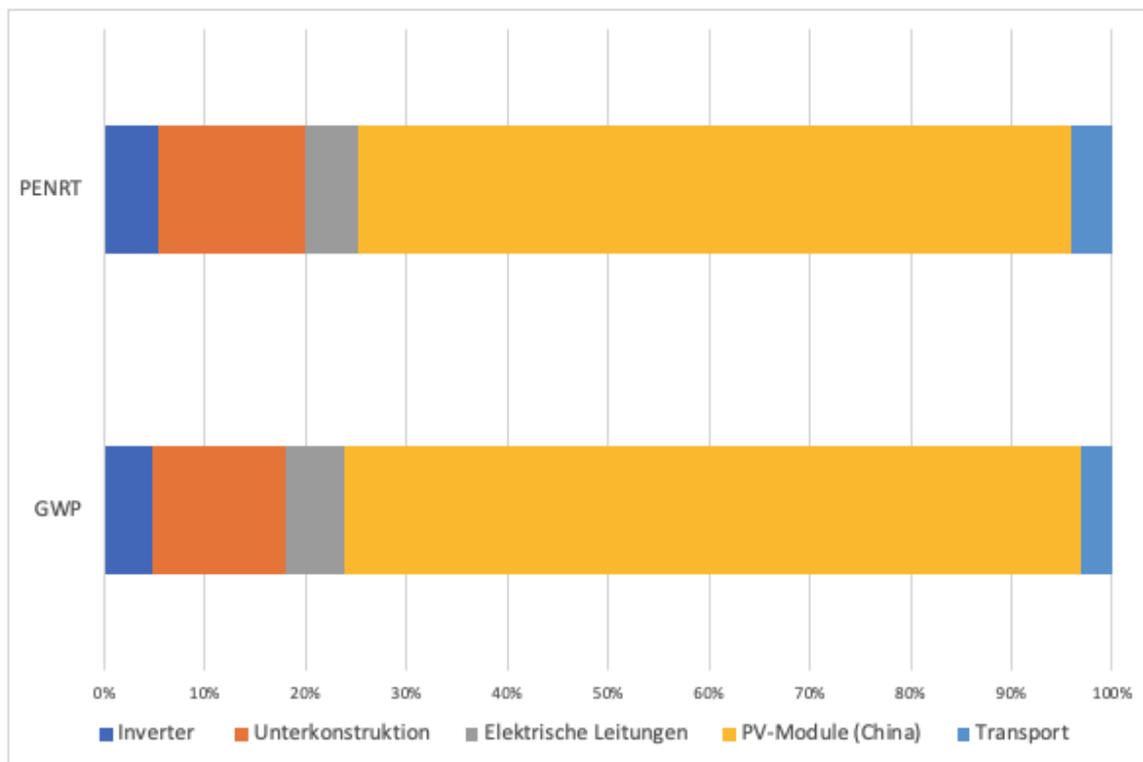


Abbildung 5: Anteil der Komponenten einer PV-Anlage am Treibhauspotenzial und der nicht erneuerbaren Primärenergie

Tabelle 9: Zusammenfassung Ökobilanzergebnisse für Herstellung und Entsorgung (ohne Recyclinggut-schrift) einer Photovoltaikanlage pro kWp Leistung

	GWP	PE _{NRT}
Inverter Mittelwert 2,5 kW und 25 kW	55,2 kg CO ₂ -Äq.	757 MJ
Unterkonstruktion	152,9 kg CO ₂ -Äq.	2024 MJ
Elektrische Leitungen	66,1 kg CO ₂ -Äq.	718 MJ
PV-Module (China)	841,3 kg CO ₂ -Äq.	9856 MJ
Transport	34,6 kg CO ₂ -Äq.	568 MJ
Summe	1150,2 kg CO ₂ -Äq.	13 923 MJ

Damit liegen die Ergebnisse dieser Berechnung trotz Mitberücksichtigung der Entsorgung nur bei etwa 55 % der Angaben in der ÖKOBAUDAT und KBOB.

Wenn man die das GWP der PV-Module aus China mit einer Produktion unter europäischen Stromerzeugungsbedingungen (siehe Tabelle 7) vergleicht, lässt sich errechnen das etwa 300 kg CO₂-Äquivalent pro kWp mit einer ökologischeren Stromerzeugung eingespart werden könnten.

4.1.2. Elektrische Fußbodenheizung

Eine elektrische Fußbodenheizung kann in zwei verschiedenen Varianten hergestellt werden. Es gibt die Variante mit im Estrich verlegten Heizkabeln oder auf dem Estrich verlegten Heizkabeln. Die Varianten unterscheiden sich im verwendeten Heizkabel und der verbauten Kabellänge pro Quadratmeter. In Abbildung 6 sind die verschiedenen Heizmatten dargestellt, der Querschnitt der verwendeten Heizkabel ist in Abbildung 7 zu sehen. Bei im Estrich verbauten Heizungen werden ca. 6,75 lfm pro m² Matte verbaut, bei einer Verlegung auf dem Estrich sind es etwa 13,5 lfm pro m². Als Auslegungsfläche werden ca. 75 % der Wohnfläche empfohlen. (myPV, 2022b)



Abbildung 6: Heizmatten: links im Estrich verbaut, rechts auf dem Estrich verlegt

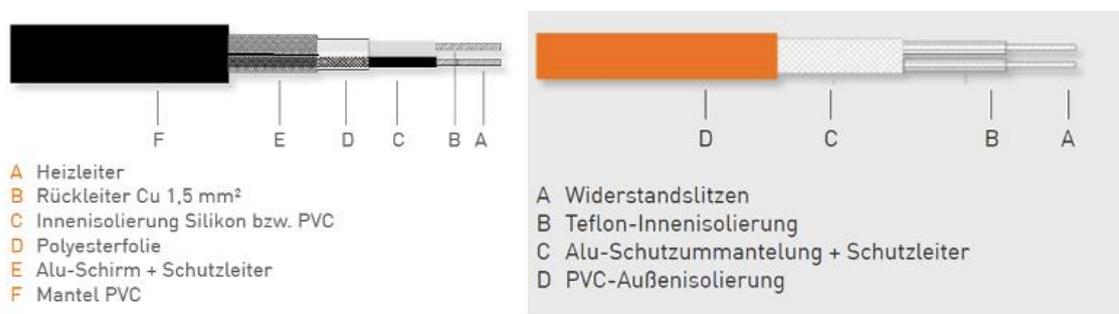


Abbildung 7: Heizkabel: links im Estrich verbaut, rechts auf dem Estrich verlegt

Da zu diesem Heizsystem keine Daten verfügbar sind, werden für die Bewertung die Daten von 3-adrigen bzw. 5-adrigen Kabeln aus der ÖKOBAUDAT verwendet. Die Kabel in der ÖKOBAUDAT haben nur einen Querschnitt von 0,6 mm, daher wird der Wert der ÖKOBAUDAT mit 2 multipliziert. Anschließend wird dieser Wert mit den Laufmetern pro m² Matte multipliziert. (ÖKOBAUDAT, 2021)

Die entsprechende Berechnung findet sich in Tabelle 10.

Zusätzlich ist ein Steuerungsgerät erforderlich, dieses wiegt 1,3 kg (myPV, 2022b). Da ein 5-adriges Kabel lt. ÖKOBAUDAT ein Längengewicht von 0,168 pro lfm hat, würde dies etwa 8

lfm Kabel entsprechen (bei der Annahme, dass die Steuerung aus Kupfer und Kunststoff besteht). Aufgrund der geringen Auswirkung wird diese Steuerung nicht berücksichtigt.

Tabelle 10: Ökobilanzdaten Herstellung elektrische Fußbodenheizung

	GWP	PE _{NRT}
Heizkabel im Estrich verlegt (2 * 6,75 lfm 5-adriges Kabel pro m ²)	8,29 kg CO ₂ -Äq	125 MJ
Heizkabel am Estrich verlegt (2 * 13,5 lfm 3-adriges Kabel pro m ²)	11,27 kg CO ₂ -Äq	181 MJ

4.1.3. Wärmepumpe

Mit einer Wärmepumpe kann Wärme, die sonst nicht nutzbar ist, auf ein Niveau gebracht werden, bei der sie nutzbar ist. (Zahoransky et al., 2022, S. 365)

Grundsätzlich besteht eine Wärmepumpe aus vier Teilen:

- Verdampfer
- Verdichter
- Verflüssiger (Kondensator)
- Expansionsventil (Drosselorgan)

Im Kreislauf einer Wärmepumpe zirkuliert ein Arbeitsmittel (Kältemittel). Am Verdampfer nimmt das (flüssige) Kältemittel die Wärme (aus der Umgebung z.B. Außenluft, Wasser) auf und wird gasförmig. So gelangt es in den Verdichter, wo es unter dem Einsatz zugeführter Energie komprimiert und auf ein höheres Temperaturniveau gebracht wird. Im anschließenden Verflüssiger wird die Wärme an den Heizkreislauf abgegeben. Das Kältemittel gelangt nun zum Expansionsventil, wo der Druck verringert wird und beim Verdampfer wieder Wärme aufgenommen werden kann. (Heck, 2007, S. 2)

Die Lebensdauer einer Wärmepumpe wird in der Literatur teilweise mit 15 Jahren angegeben (Johnson, 2011, S. 1373, Becker et al., 2022, S. 129). In der ÖKOBAUDAT wird entsprechend der VDI Richtlinie 2067 eine 20 jährige Lebensdauer angegeben (ÖKOBAUDAT, 2021 Prozess-Datensatz: Strom-Wärmepumpe (Luft-Wasser) 10 kW). Ebenso eine 20 jährige Lebensdauer wird in den Ecoinvent-Daten verwendet (Heck, 2007, S. 21). Auch eine Lebensdauer von nur 10 Jahren wird verwendet, wobei hier keinerlei Instandhaltung mehr angesetzt wird (Saoud et al., 2021, S. 6).

Eine Wärmepumpe besteht aus Stahl, Kupfer, Aluminium und Kunststoff sowie Elektronikbauteilen und Dämmung (Becker et al., 2022, S. 129).

Das Gesamtgewicht wird in der Literatur beispielsweise mit 127 bis 134 kg für eine 10 kW-Wärmepumpe angegeben (Johnson, 2011, S. 1372) (Heck, 2007, S. 17) (ÖKOBAUDAT, 2021 Prozess-Datensatz: Strom-Wärmepumpe (Luft-Wasser) 10 kW). Für kleinere Wärmepumpen wird ein Gewicht von 94 kg für eine Wärmepumpe mit 7 kW angegeben. (ÖKOBAUDAT, 2021 Prozess-Datensatz: Strom-Wärmepumpe (Luft-Wasser) 7 kW). Im Gegensatz dazu wird auch ein Gewicht von 160 kg bzw. 240 kg für eine Luft/Wasser-Wärmepumpe mit 8 kW angegeben ((Becker et al., 2022, S. 129), (KBOB/ecobau/IPB-Empfehlung 2009/1:2016, 2016)).

Die Aufteilung auf die einzelnen Materialien wird teilweise nur überschlägig vorgenommen ((Becker et al., 2022, S. 129), (Johnson, 2011, S. 1372), (Heck, 2007, S. 17), teilweise werden auch genauere Berechnungen angestellt ((ÖKOBAUDAT, 2021 Produktfluss-Datensatz: Strom-Wärmepumpe (Luft-Wasser) 7 kW), (Saoud et al., 2021, S. 6)).

Zusätzlich wird im Zuge der Herstellung die Wärmepumpe auch mit Kältemittel befüllt. Es muss hier auch die Produktion des Kältemittels veranschlagt werden, was häufig nicht angesetzt wird (Johnson, 2011, S. 1372). Der Treibhauspotenzial für die Herstellung der Kältemittel ist jedoch relativ gering. So beträgt der Wert für R-410A 10,7kg CO₂-Äq. pro kg, für R290 0,05 kg CO₂-Äq. pro kg (Hwang et al., 2016, S. 15). Bei der ersten Befüllung muss jedoch mit einer Leckage von etwa 3 % bei teilhalogenierten Kältemitteln gerechnet werden (Frischknecht, 1999, S. 33). Die Leckage bei der Befüllung kann auch auf die Lebensdauer der Wärmepumpe aufgeteilt werden (Becker et al., 2022, S. 131).

Obwohl die Annahmen zur Sachbilanz in den einzelnen Quellen nicht besonders stark abweichen, differieren die Werte zu Wirkungsabschätzung besonders stark. Wie in der Tabelle 11 und Tabelle 12 zu sehen ist, sind sowohl beim Treibhauspotenzial als auch bei der nicht erneuerbaren Primärenergie die Werte aus der Schweiz um den Faktor drei bis sechs höher als die Werte aus Deutschland.

In der Arbeit von Johnson wird das Treibhauspotenzial der Wärmepumpe (inkl. Entsorgung) ohne Kältemittel mit etwa 280 kg CO₂-Äq. bei einer Leistung von 7,1 kW angegeben. Die Produktion und Entsorgung des Kältemittel R410A verursacht in dieser Publikation 697 kg CO₂-Äq., in Summe also 977 kg CO₂-Äq.. Da hier auch die Entsorgung berücksichtigt ist ähnelt das Ergebnis dieser Berechnung eher den Werten aus Deutschland. (Johnson, 2011, S. 1376)

Tabelle 11: Treibhauspotenzial für die Herstellung von Wärmepumpen nach unterschiedlichen Quellen

Wärmepumpe	Quelle	GWP
Strom-Wärmepumpe (Luft-Wasser) 7 kW (inkl. Produktion Kältemittel R410A)	(ÖKOBAUDAT, 2021)	331 kg CO ₂ -Äq.
Luft-Wasser Wärmepumpe 8 kW Referenzfall, Außenaufstellung (inkl. Produktion Kältemittel R290)	(Becker et al., 2022, S. 137)	272 kg CO ₂ -Äq.
Luft-Wasser Wärmepumpe 8 kW hocheffizient, Außenaufstellung (inkl. Produktion Kältemittel R290)	(Becker et al., 2022, S. 139)	681 kg CO ₂ -Äq.
Luft-Wasser Wärmepumpe 8 kW	(Klingler et al., 2014, S. 88)	2.055 kg CO ₂ -Äq.
Luf-Wasser Wärmepumpe 8 kW	(KBOB/ecobau/IPB-Empfehlung 2009/1:2016, 2016)	1.860 kg CO ₂ -Äq.

Tabelle 12: nicht erneuerbare Primärenergie für die Herstellung von Wärmepumpen nach unterschiedlichen Quellen

Wärmepumpe	Quelle	PE _{NRT}
Strom-Wärmepumpe (Luft-Wasser) 7 kW (inkl. Produktion Kältemittel R410A)	(ÖKOBAUDAT, 2021)	4.065 MJ.
Luft-Wasser Wärmepumpe 8 kW Referenzfall (inkl. Produktion Kältemittel R290)	(Becker et al., 2022, S. 137)	2.126 MJ
Luft-Wasser Wärmepumpe 8 kW hocheffizient (inkl. Produktion Kältemittel R290)	(Becker et al., 2022, S. 139)	4.158 MJ
Luft-Wasser Wärmepumpe 8 kW	(Klingler et al., 2014, S. 88)	24.855 MJ
Luft-Wasser Wärmepumpe 8 kW	(KBOB/ecobau/IPB-Empfehlung 2009/1:2016, 2016)	23.000 MJ

4.1.4. Wassergeführte Wärmeverteilungs- und abgabesysteme

Bei den wassergeführten Wärmeabgabesystemen kann prinzipiell zwischen Fußbodenheizungssystemen und Systemen mit Heizkörper unterschieden werden.

Die ÖKOBAUDAT stellt hier Daten pro Quadratmeter Fußbodenheizung mit 100 oder 200 mm Abstand sowie bei Heizkörpern pro kg Heizkörper zur Verfügung. Die Wärmeverteilung kann aus den Werten für die Rohre berechnet werden. (ÖKOBAUDAT, 2021)

Im Gegensatz dazu werden in den Ökobilanzdaten der KBOB Daten zur Wärmeverteilung und -abgabe pro Quadratmeter Energiebezugsfläche zur Verfügung gestellt. Ein Vergleich der Werte der Fußbodenheizung ergibt, dass sowohl beim Treibhauspotenzial als auch bei der nicht erneuerbaren Primärenergie die Werte pro Quadratmeter EBF ungefähr 60 % der Werte pro Quadratmeter Fußbodenheizung mit 200 mm Abstand entsprechen. (ÖKOBAUDAT, 2021) (KBOB/ecobau/IPB-Empfehlung 2009/1:2016, 2016)

In der Tabelle 13 sind diese pauschalen Werte dargestellt. Ein Pufferspeicher ist in diesen Werten nicht enthalten (Heck, 2007, S. 20)

Tabelle 13: Ökobilanzergebnisse wassergeführte Wärmeverteilung und -abgabe (KBOB/ecobau/IPB-Empfehlung 2009/1:2016, 2016)

	GWP	PE_{NRT}
Wärmeverteilung Wohngebäude	2,39 kg CO ₂ -Äq.	43,2 MJ
Wärmeabgabe über Fußbodenheizung	3,02 kg CO ₂ -Äq.	79,8 MJ
Wärmeabgabe über Heizkörper	5,44 kg CO ₂ -Äq.	81,8 MJ

4.1.5. Warmwasserbereitung

Zur Warmwasserbereitung sind in der ÖKOBAUDAT Daten eines Speichers sowie eines Durchlauferhitzers vorhanden. Die Werte des Speichers sind pro kg angegeben der Durchlauferhitzer in der ÖKOBAUDAT hat eine Leistung von 21 kW.

Die Lebensdauer des Durchlauferhitzers beträgt 15 Jahre, das Gewicht 4 kg (ÖKOBAUDAT, 2021 Prozess-Datensatz: Elektrischer Durchlauferhitzer (21 kW)).

Der Speicher hat eine Lebensdauer von 20 Jahren, das Gewicht eines Speichers beträgt 59,5 kg (ÖKOBAUDAT, 2021 Produktfluss-Datensatz: Pufferspeicher (Stahl)).

In der nachfolgenden Tabelle 14 sind die Ökobilanzergebnisse dargestellt.

Tabelle 14: Umweltindikatoren eines Warmwasserspeichers und Durchlauferhitzers (ÖKOBAUDAT, 2021)

	GWP	PE_{NRT}
Speicher 300 l (59,5 kg)	188,5 kg CO ₂ -Äq.	2478 MJ
Durchlauferhitzer 21 kW (4 kg)	14,74 kg CO ₂ -Äq.	243 MJ

4.2. Nutzung

4.2.1. Strom

Der Energieverbrauch im Betrieb ist bedeutender als die eingesetzten Materialien (Weißberger, 2016, S. 112). Bei Wärmepumpen macht die Stromerzeugung in Abhängigkeit von den Emissionen der Erzeugung etwa 80 % der gesamten CO₂-Emissionen im Lebenszyklus aus (Johnson, 2011, S. 1375)

Die Umweltauswirkungen je erzeugter Kilowattstunde Strom ist abhängig von den Anteilen der unterschiedlichen Energieträger. Aus diesen Anteilen errechnet sich der Strommix. (Kranzl, 2018, S. 2,9)

Bei der Bilanzierung ist zu beachten, dass der Strom leitungsgebunden ist. Diese physikalischen Stromflüsse unterscheiden sich vom kaufmännischen Stromhandel.

Prinzipiell kann der Strommix aus folgenden Daten errechnet werden:

1. Erzeugermix: Der Erzeugermix errechnet sich aus der Aufteilung der Energieträger für die erzeugten Strommengen eines Landes oder eines stromproduzierenden Unternehmens.
2. Versorgermix: Der (auch Lieferantenmix genannte) Versorgermix weist die Anteile der Energieträger am gesamten Lieferumfang eines Stromlieferanten aus. Der Stromlieferant ist verpflichtet den Versorgermix auf der Stromrechnung auszuweisen. Dabei ist es zulässig, Herkunftsnachweise für Strom aus erneuerbaren Energiequellen einzusetzen, um Strom unbekannter Herkunft damit zu kennzeichnen.
3. Produktmix: Dabei handelt es sich um rechnerische Zuordnung der ausgewiesenen Primärenergieträger an einzelne Kunden.

(Kranzl, 2018, S. 21–23)

Durch den Handel mit Herkunftsnachweisen haben Energieversorgungsunternehmen, die vor dem Jahr 2014 nennenswerte Anteile fossiler Energieträger im Versorgermix ausgewiesen haben, im Jahr 2016 100 % des Stroms als erneuerbar angegeben. Die Nachweise stammen zum großen Teil aus Norwegen. (Kranzl, 2018, S. 24)

In der folgenden Tabelle 15 werden die CO₂-Emissionen der Stromerzeugung einiger Energieträger über den gesamten Lebenszyklus nach IPCC mit den Werten, die den „Richtwerten Umweltauswirkungen für einzelne Energieträger“ entsprechen, verglichen.

Tabelle 15: Vergleich der CO₂-Emissionen der Stromerzeugung nach unterschiedlichen Quellen

Energieträger	IPCC (Schlömer et al., 2014, S. 1335)	Richtwerten Umweltauswirkungen für einzelne Energieträger (E-control, 2022)
Wasserkraft	24 g CO ₂ -Äq./kWh	0 g CO ₂ -Äq./kWh
Windkraft onshore	11 g CO ₂ -Äq./kWh	0 g CO ₂ -Äq./kWh
Photovoltaik Dach	41 g CO ₂ -Äq./kWh	0 g CO ₂ -Äq./kWh
Biomasse	230 g CO ₂ -Äq./kWh	0 g CO ₂ -Äq./kWh
Kohle	820 g CO ₂ -Äq./kWh	882 g CO ₂ -Äq./kWh
Erdgas	490 g CO ₂ -Äq./kWh	440 g CO ₂ -Äq./kWh

Wie aus dieser Tabelle hervorgeht, werden bei auf den Stromrechnungen ausgewiesenen Emissionsfaktoren alle erneuerbaren Energieträger (feste oder flüssige Biomasse, Bio-, Deponie- und Klärgas, Geothermie, Wind- und Sonnenenergie sowie Wasserkraft) mit einem CO₂-Emissionsfaktor von 0 g pro Kilowattstunde bewertet werden (E-control, 2022). Somit sind diese Emissionsfaktoren für diese Arbeit nicht geeignet, da hier auch die Emissionen der Herstellung einer Photovoltaikanlage berücksichtigt werden.

Wenn eine ganzheitliche Betrachtung der Emissionsmengen vorgesehen ist wird empfohlen, die Umweltauswirkungen der Stromaufbringung zu betrachten. Dabei werden auch die Emissionsfaktoren der importierten Strommengen berücksichtigt. Alternativ dazu kann auch der Emissionsfaktor für die Stromerzeugung verwendet werden (Kranzl, 2018, S. 30)

Die Emissionen im der Stromerzeugung variieren in einzelnen Ländern stark. In Österreich betragen die Emissionsfaktoren für den Strommix 227 g CO₂-Äq./kWh, während in Deutschland ein Wert von 480 g CO₂-Äq./kWh berücksichtigt werden muss (OIB-Richtline 6, 2019, S. 11) (Fritsche & Greß, 2019, S. 6).

Zusätzlich ist zu beachten, dass die Stromaufbringung aufgrund der fluktuierenden erneuerbaren Energieträger im Jahresverlauf schwankt (Roßkopf, 2017, S. 29). In der nachfolgenden Abbildung 8 und Abbildung 9 sind die Werte der österreichischen Stromerzeugung im Jahresverlauf dargestellt.

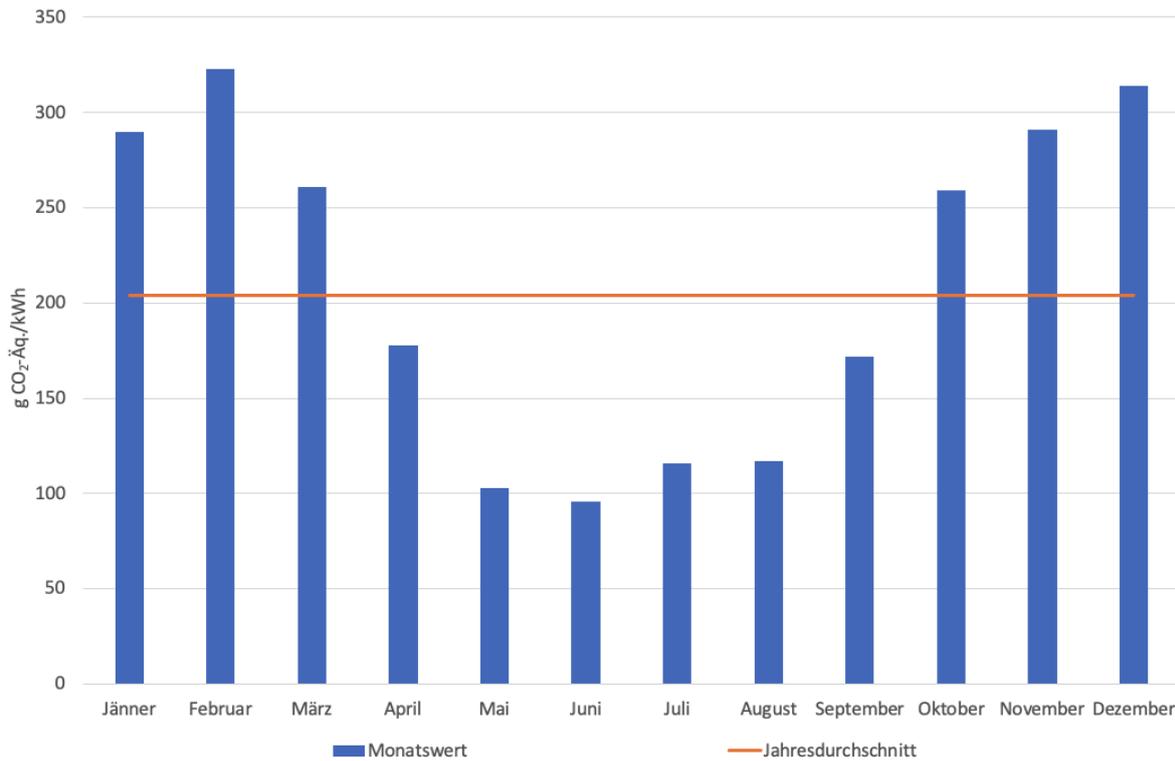


Abbildung 8: CO₂-Emissionen der österreichischen Stromerzeugung im Jahresverlauf (Roßkopf, 2017, S. 67)

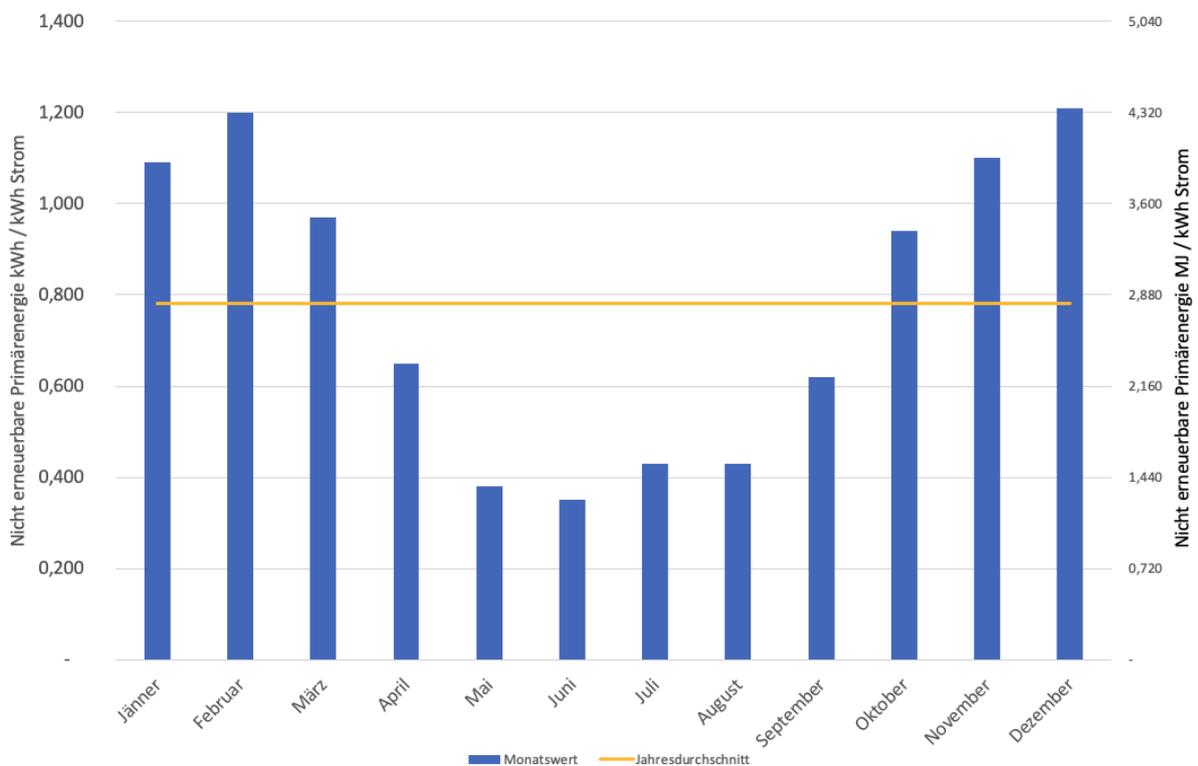


Abbildung 9: Nicht erneuerbare Primärenergie der österreichischen Stromerzeugung im Jahresverlauf (Roßkopf, 2017, S. 67)

Die Stromerzeugung der Photovoltaikanlage wird unterschiedlich beurteilt. So wird in der Arbeit von Beccali et al., 2014 nur die Einsparung des Netzbezuges berücksichtigt, Überschüsse werden nicht als Gutschrift berücksichtigt (Beccali et al., 2014, S. 97). Andererseits wird in einer Arbeit von Beccali et al., 2016 die Produktion der Photovoltaikanlage auf Jahresbasis beurteilt, Unterschiede in Bezug auf den Netzbezug bzw. Netzeinspeisung werden hier nicht berechnet (Beccali et al., 2016, S. 95). In der Arbeit von Kamel & Fung, 2014 wird hingegen eine Gutschrift der Produktion der Photovoltaikanlage erstellt. Hierbei wird die Gutschrift entsprechend der vermiedenen Emissionen des Stroms aus dem Netz auf Stundenbasis errechnet (Kamel & Fung, 2014, S. 767). Der Ansatz mit einer CO₂-Gutschrift damit einer Gleichbehandlung von eigenverbrauchten und ins Netz eingespeisten PV-Strom wurde auch in der Arbeit von Heider et al., 2020 gewählt (Heider et al., 2020, S. 180).

In der Arbeit von Litjens wurde nach beiden Ansätzen bilanziert, wobei hier der Ansatz, überschüssigen PV-Strom nicht zu bewerten, als unrealistisch bezeichnet wird. (Litjens et al., 2018, S. 56, 58)

In dieser Arbeit wird der Ansatz gewählt, die Überschüsse als Gutschrift mit dem jeweiligen, monatlichen Konversionsfaktor zu bewerten.

4.2.2. Kältemittel

Als Kältemittel wird das Arbeitsmittel bezeichnet, welches im Wärmepumpenkreislauf zirkuliert (siehe dazu Kapitel 4.1.1.3) (Heck, 2007, S. 2).

Bis Anfang der 1990er Jahre wurden vor allem FCKWs (Fluorchlorkohlenwasserstoffe) als Kältemittel eingesetzt. Diese schädigen jedoch die Ozonschicht und tragen zum Ozonloch bei. Daher wurden sie durch FKWs (vollständig halogenierte Fluorkohlenwasserstoffe) und HFKWs (teilhalogenierte Fluorkohlenwasserstoffe) ersetzt. Dies schädigen nicht die Ozonschicht, tragen jedoch zum Treibhauseffekt bei. (Frey, 2019, S. 340)

Im Zuge der Reglementierungen für Treibhausgase wurde im Kyoto-Protokoll 1997 auch eine Reduktion der Emissionen von FKWs gefordert. In der Europäischen Union folgte die Umsetzung durch die F-Gase Verordnung („Verordnung EU517/2014 des Europäischen Parlaments und des Rates zu bestimmten fluorierten Treibhausgasen“), die am 1.1.2015 in Kraft trat und einen schrittweisen Ausstieg der Verwendung von (H)FKW-Kältemitteln forciert. Dabei wurde ein Verbot von Kältemitteln mit einem Treibhauspotenzial von 2 500 oder mehr und eine Dichtheitsprüfung in gewissen Anlagen, nicht jedoch bei Hauswärmepumpen, vorgeschrieben. Zusätzlich wurde damit auch ein Quotensystem für das Inverkehrbringen von F-Gasen eingeführt. (Flohr, 2019, S. 512–513)

Durch dieses Quotensystem soll eine Reduktion der Emissionen aus Kältemitteln um 79 % bis 2030 erreicht werden. Durch den Handel ist es Unternehmen, die die verfügbare Quote

unterschreiten, möglich übrige Quoten zu verkaufen. Die schrittweise Reduktion ist in Abbildung 10 ersichtlich. (Sušnik, 2019, S. 5–6)

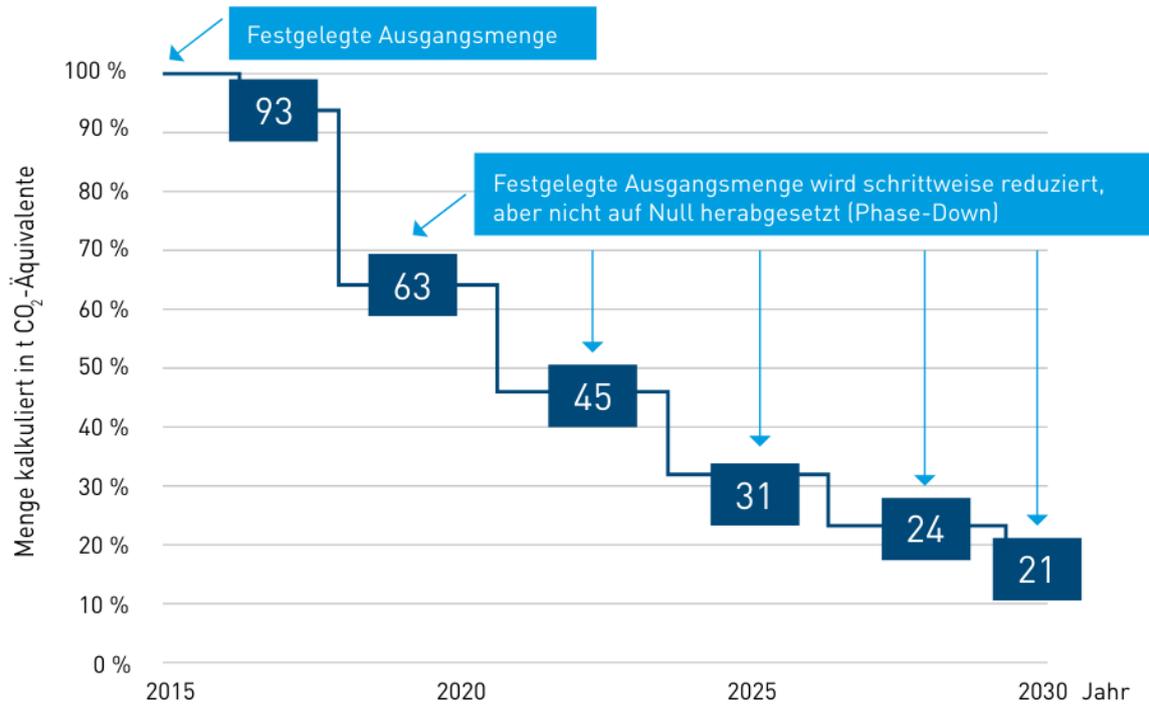


Abbildung 10: schrittweise Reduktion der Emissionen aus F-Gasen (Sušnik, 2019, S. 6)

Bei den im Dezember 2021 verfügbaren Modellen an Wärmepumpen, beträgt der Anteil an Luft/Wasser-Wärmepumpen mit dem Kältemittel R-410A etwa 66 %, an zweiter Stelle liegt R-32 mit einem Anteil von 14 %. Das Kältemittel R-410A ist ein 50/50-Gemisch aus R-32 und R-125 und hat ein Treibhauspotenzial von 2088 kg CO₂-Äq. pro kg. Eine detaillierte Aufstellung findet sich in Tabelle 16. (Becker et al., 2022, S. 73)

Tabelle 16: Eingesetzte Kältemittel von im Dez. 2021 verfügbaren L/W-Wärmepumpen (Behringer et al., 2021, S. 88, 136) (Becker et al., 2022, S. 73, 96–97)

Kältemittel	Beschreibung	GWP pro kg Kältemittel	Anteil verfügbarer Modelle
R-410A	HFC-32 (50 %), HFC-125 (50 %)	2088 kg CO ₂ -Äq.	66,1 %
R-32	Difluormethan	675 kg CO ₂ -Äq.	14,1 %
R-407C	HFC-32 (23 %), HFC-125 (25 %), HFC-134a (52 %)	1774 kg CO ₂ -Äq.	10,2 %
R-290	Propan	3 kg CO ₂ -Äq.	4,9 %
R-404A	HFC-125 (44 %), HFC-134a (4 %), HFC-143a (42 %)	3922 kg CO ₂ -Äq.	1,6 %
R-417A	HFC-125 (50 %), HFC-134a (46,6 %), Butan (3,4%)	2346 kg CO ₂ -Äq.	1,2 %
R-452B	HFC-32 (67 %), HFC-125 (7 %), u-HFC-1234yf (26 %)	698 kg CO ₂ -Äq.	0,6 %
R-454B	u-HFC-1234yf (78,5 %); HFC-32 (21,5%)	466 kg CO ₂ -Äq	0,5 %
R-448A	HFC-32 (26 %), HFC-125 (26 %), HFC-134a (21 %), u-HFC-1234yf (20 %), u-HFC-1234ze(E) (7 %)	1387 kg CO ₂ -Äq.	0,4 %
R-449A	HFC-32 (24,3 %), HFC-125 (24,7 %), HFC-134a (25,7 %), u-HFC-1234yf (25,3 %)	1397 kg CO ₂ -Äq.	0,2 %
R-454C	HFC-32 (21,5 %), u-HFC-1234yf (77 %), CO ₂ (1,5 %)	148 kg CO ₂ -Äq.	0,2 %
R-513A	HFC-134a (44 %), u-HFC-1234yf (56%)	613 kg CO ₂ -Äq.	0,1 %

Um die Emissionen im Betrieb zu errechnen, ist es notwendig die Füllmenge sowie die jährlichen Leckageraten zu ermitteln.

Die Füllmenge einer Wärmepumpe hat eine gewisse Korrelation zum Anlagengewicht, die jedoch nicht besonders groß ist (Klingler et al., 2014, S. 137). In anderen Arbeiten wird die Füllmenge in Abhängigkeit zur Leistung der Wärmepumpe angegeben. So wird beispielsweise in der Arbeit von Johnson, 2011 eine Füllmenge von 0,3 kg pro kW Leistung bei Verwendung des Kältemittels R-410A angegeben (Johnson, 2011, S. 1371). In der Arbeit von Vering et al., 2022 wird ebenfalls ein Wert von 0,3 kg pro kW angegeben, bei Kohlenwasserstoffen (Propan) wird ein Wert von 0,15 bis 0,3 kg pro kW Leistung angegeben (Vering et al., 2022, S. 550). In der Arbeit von Frischknecht, 1999 wird ein Wert von 3 kg halogenierte

Kältemittel bzw. 1,5 kg Propan für eine Wärmepumpe mit 7 kW angegeben (Frischknecht, 1999, S. 26).

Wie die Arbeit von Becker et al. zeigt, variiert die Füllmenge jedoch mit der Leistung. So ist bei Wärmepumpen mit höheren Leistungen die Füllmenge pro kW geringer als bei Wärmepumpen mit niedriger Leistung, siehe hierzu auch Abbildung 11. (Becker et al., 2022, S. 91)

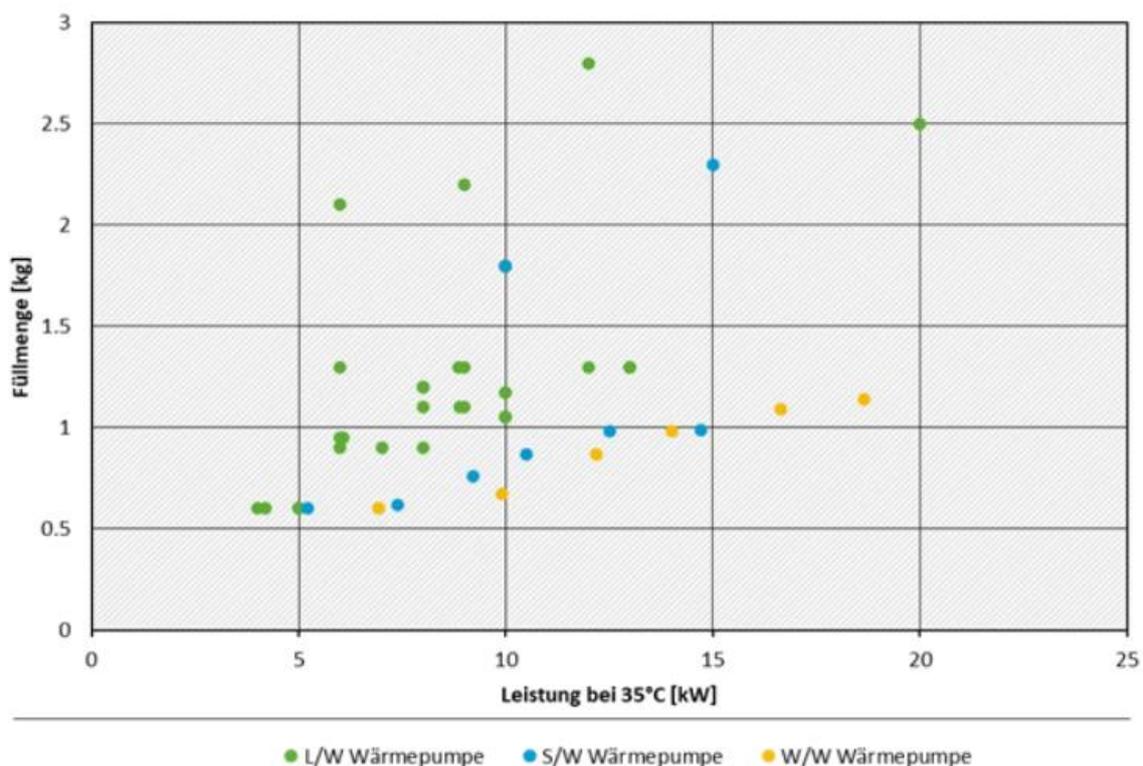


Abbildung 11: Kältemittelfüllmenge nach Heizleistung für Wärmepumpen mit Kältemittel R-290 (Becker et al., 2022, S. 92)

Ein eindeutiger Zusammenhang der Kältemittelfüllmenge zur Leistung der Wärmepumpe kann also nicht hergestellt werden.

Bei den Leckageraten gibt es ebenfalls Differenzen in den Literaturangaben. So wird in der Arbeit von Frischknecht, 1999 von einer Leckagerate von 8 % pro Jahr ausgegangen, während Becker et al., 2022 in Anlehnung an eine ältere Veröffentlichung des deutschen Umweltbundesamtes 2,5 % pro Jahr annimmt (Frischknecht, 1999, S. 26) (Becker et al., 2022, S. 131). Dementsprechend wird in der Arbeit von Johnson mit Werten von 2 % bis 8 % gerechnet (Johnson, 2011, S. 1380).

Erwähnenswert in diesem Zusammenhang sind auch die unterschiedlichen Angaben zu den Leckageraten am Ende der Nutzungsdauer. Diese schwanken von 15 % in der Arbeit von

Hwang et al. bis zu 55 % in der Arbeit von Johnson. Die ÖKOBAUDAT gibt einen Wert von 35,2 % an. (Hwang et al., 2016, S. 18) (Becker et al., 2022, S. 131) (Johnson, 2011, S. 1374)

4.2.3. Wartung und Instandhaltung

Bei Photovoltaikanlagen werden Reinigungsarbeiten an den Modulen in der Literatur meist nicht berücksichtigt. Der Wasserbedarf würde 20 Liter pro Quadratmeter und Jahr betragen (Jungbluth et al., 2010, S. 142). Dies kann aufgrund der geringen Umweltauswirkungen vernachlässigt werden. Beim Inverter wird die Wartung über eine kürzere Lebensdauer berücksichtigt. (Hengstler et al., 2021, S. 122)

Bei Wärmepumpen kann zur Wartung der Ansatz gewählt werden, die Transportentfernung der Wartungsmitarbeiter zu berücksichtigen. Hier kann davon ausgegangen werden, dass für eine Wartung eine Wegstrecke von 100 km notwendig ist und einmal jährlich erfolgen soll (Blom et al., 2010, S. 2365–2367). Eine Berechnung mit dem Transportrechner von (treeze.ch, 2022) ergibt hier jährliche Umweltauswirkungen von 30,7 kg CO₂-Äq. und 447 MJ nicht erneuerbare Primärenergie. In anderen Veröffentlichungen wie beispielsweise bei Becker werden keine Umweltwirkungen aus der Instandhaltung berücksichtigt (Becker et al., 2022, S. 128–133). Lediglich in der Arbeit von (Saoud et al., 2021, S. 6) wurde die Lebensdauer zur Berücksichtigung der Instandhaltung verkürzt.

Bei allen anderen Anlagenkomponenten konnte keine Literatur gefunden werden, in der jährliche Instandhaltungen berücksichtigt werden.

5. Vergleich der Systeme

5.1. Varianten

Für diese Arbeit wird ein fiktives Einfamilienhaus am Standort Linz mit einer Wohnfläche von etwa 120 m², entsprechend einer Brutto-Grundfläche von 150 m² herangezogen. In der ersten Variante wird ein Heizwärmebedarf (HWB) von 30 kWh/(m²a) bezogen auf die Brutto-Grundfläche (BGF) und Jahr sowie einem Warmwasserbedarf für 4 Personen (200 l/d) untersucht. Um das Gesamtsystem vergleichen zu können wurde auch der Haushaltsstrom mit 4000 kWh pro Jahr berücksichtigt.

Dabei wurden folgende 2 Heizsysteme verglichen:

- Elektrische Fußbodenheizung und Warmwasserbereitung, Photovoltaikanlage mit 10 kWp mit 30° Dachneigung in Süd-Ausrichtung
- Wassergeführte Fußbodenheizung, Wärme- und Warmwassererzeugung über eine Luft/Wasser-Wärmepumpe mit Kältemittel R-410A

Um unterschiedliche Einflüsse auf die Emissionen zu vergleichen wurden in weiterer Folge noch folgenden Varianten untersucht:

- In Bezug auf die PV-Anlage: Verkleinerung der Anlage auf 5 kWp. Dies soll den Einfluss der Photovoltaikanlage auf die Systeme mit elektrischer Fußbodenheizung verdeutlichen.
- In Bezug auf das Gebäude: HWB von 15 kWh/(m²a) und HWB von 80 kWh/(m²a). Hier wurde der Frage nachgegangen, welchen Einfluss eine bessere Dämmung im Neubau hat. Bei der Variante mit einem HWB von 80 kWh/(m²a) sollen Ergebnisse gewonnen werden, ob elektrische Fußbodenheizungen in Kombination mit einer PV-Anlage auch in Gebäuden mit schlechterer Dämmung, beispielsweise bei Sanierungen, in ökologischer Hinsicht sinnvoll sind.
- In Bezug auf das Kältemittel: mit R-290 statt R-410A. Aufgrund der Reglementierungen im Bereich der Kältemittel, die jedoch nur indirekt auf den Einsatz in Hauswärmepumpen wirken (siehe dazu Kapitel 4.2.2), soll hier untersucht werden, welchen Einfluss das Kältemittel auf die Gesamtemissionen eines Einfamilienhauses hat.
- In Bezug auf den Strommix: eine Variante mit den halben Emissionen des derzeitigen Strommixes. In einem Bericht des österreichischen Umweltbundesamtes wird ein Transition-Szenario für zukünftige Stromerzeugung entworfen (Krutzler et al., 2017, S. 23). Wenn man von diesem Szenario ausgeht, sollten sich die Emissionen der österreichischen Stromerzeugung weniger als halbieren. Um zu testen wie sich das auf die Ökobilanzergebnisse auswirkt, wurden diese Varianten untersucht.

Da bei einem angenommenen Heizwärmebedarf von 80 kWh/(m²a) bereits die Variante mit einer 10 kWp-Anlage ein eindeutiges Ergebnis zeigte, wurde hier statt der 5 kWp-Anlage eine Anlage mit 15 kWp gewählt. Zusätzlich wurde auch statt dem Strommix Österreich / 2 ein tschechischer Strommix gerechnet. Damit soll überprüft werden, wie sich die untersuchten Heizsysteme in Ländern mit einer anderen Struktur der Stromerzeugung verhalten. Auch wurde in diesen Varianten der Flächenanteil der Fußbodenheizung auf 100 % erhöht, eine Wärmepumpe mit 14 kW und einer Füllmenge von 4,2 kg angenommen.

Damit ergeben sich insgesamt 24 Varianten, wie Tabelle 17 zeigt.

Tabelle 17: Überblick Varianten

Variante Nr.	HWB [kWh/(m ² a)]	Größe PV-Anlage [kWp]	Kältemittel	Strommix
1	30	10	R-410A	Österreich
2	30	5	R-410A	Österreich
3	30	10	R-290	Österreich
4	30	5	R-290	Österreich
5	30	10	R-410A	Österreich / 2
6	30	5	R-410A	Österreich / 2
7	30	10	R-290	Österreich / 2
8	30	5	R-290	Österreich / 2
9	15	10	R-410A	Österreich
10	15	5	R-410A	Österreich
11	15	10	R-290	Österreich
12	15	5	R-290	Österreich
13	15	10	R-410A	Österreich / 2
14	15	5	R-410A	Österreich / 2
15	15	10	R-290	Österreich / 2
16	15	5	R-290	Österreich / 2
17	80	10	R-410A	Österreich
18	80	15	R-410A	Österreich
19	80	10	R-290	Österreich
20	80	15	R-290	Österreich
21	80	10	R-410A	Tschechien
22	80	15	R-410A	Tschechien
23	80	10	R-290	Tschechien
24	80	15	R-290	Tschechien

Die Varianten mit der elektrischen Heizung und PV-Anlage werden in weiterer Folge als PV 1 bis PV 24 bezeichnet, die Varianten mit der Wärmepumpenheizung als WP 1 bis WP 24.

5.2. Vorgehensweise

Um unterschiedliche Systeme zu vergleichen wurde ein Excel-Tool entwickelt.

Dabei wurde eine Eingabemaske erstellt. In dieser können die einzelnen Parameter ausgewählt werden, um dann die eingegebenen Systeme zu vergleichen.

Hierzu wurde im ersten Schritt eine Tabelle erstellt, um die Parameter einzugeben (Tabelle „Eingabe“).

Folgende Parameter können hier verändert werden:

- Standort: Der Standort ist notwendig für die Ermittlung des Heizwärmebedarfs, die Definition der monatlichen Jahresarbeitszahl für die Wärmepumpe sowie für die Berechnung der Erträge der Photovoltaikanlage.
- Heizwärmebedarf: Hier wird der spezifische Heizwärmebedarf des Wohnhauses angegeben. Der Wert kann entweder direkt eingegeben werden oder über das Drehfeld im 5er-Schritten geändert werden.
- Brutto-Grundfläche: Die Brutto-Grundfläche kann ebenso direkt eingegeben oder über das Drehfeld in 5er Schritten geändert werden.
- Betrachtungszeitraum: Dies dient dazu den Zeitraum, für den der Vergleich durchgeführt werden soll, zu definieren.
- Strommix: Hier kann der gewünschte Strommix für den Vergleich eingegeben werden.
- Warmwasserbedarf: ein gewünschtes Verbrauchsprofil kann hier definiert werden.
- Haushaltsstrombedarf: bei Berücksichtigung kann ein Wert eingegeben werden oder über das Drehfeld in 100er-Schritten geändert werden. Der Haushaltsstrom wird monatlich aufgeteilt.

Diese Eingaben gelten für beide Heizsysteme.

Auf der linken Seite dieser Tabelle kann noch Größe und Ausrichtung der PV-Anlage definiert werden. Weiters kann die mit Fußbodenheizung verlegte Fläche sowie die Art der Fußbodenheizung festgelegt werden.

Auf der rechten Seite dieser Tabelle wird die Wärmepumpe, das Kältemittel sowie die Füllmenge eingegeben. Hier wird auch eine Annahme für den Kältemittelverlust und das Wärmeabgabesystem eingegeben.

Auf beiden Seiten der Tabelle kann zusätzlich ein System für die Warmwasserbereitung gewählt werden. Die Eingabemaske ist in Abbildung 12 dargestellt.

Standort: Linz	Brutto-Grundfläche: 150 m ²
Heizwärmebedarf: 80 kWh/(m ² .a)	Haushaltsstrombedarf: 4000 kWh
Strommix: Österreich Stromerzeugung Monatsbasis	
Warmwasserbedarf: 4 Personen (50l/d/P) Polysun ohne Zirkulationsverluste	
Betrachtungszeitraum: 30 Jahre	

Elektrische Fußbodenheizung mit PV	Wärmepumpe
Typ PV-Anlage: PV-Anlage lt. Hengstler et al.	Wärmebereitstellung: Strom-Wärmepumpe (Luft-Wasser) 14 kW
Größe PV-Anlage: 15,0 kWp	Kältemittel: R-410A
Ausrichtung: Süd	Füllmenge: 4,2 kg
Neigung: 30°	Kältemittelverlust pro Jahr: 3,0%
Fläche Fußbodenheizung: 75%	Abgabesystem: Wärmeabgabe über Fussbodenheizung
Kabel Fußbodenheizung: Heizkabel im Estrich (6,75 lfm pro qm)	
System Warmwasserbereitung: Speicher 300 l	System Warmwasserbereitung: Speicher 300 l

Abbildung 12: Tabelle zur Eingabe der Daten

In der Tabelle „Auswahlfelder“ werden die in den Dropdownfelder sichtbaren Standorte, Ausrichtungen, Dachneigungen und Wärmepumpen eingetragen.

In den Tabellen „Herstellung“ und „Nutzung“ wurden für die Gebäudetechnik relevanten Werte aus der ÖKOBAUDAT und der KBOB eingegeben.

5.3. Eingabedaten

5.3.1. Photovoltaikanlage

Die Eingabe der Photovoltaikanlage erfolgt über zwei Tabellenblätter. In der „Tabelle Herstellung PV-Anlage“ können die Umweltauswirkungen der Herstellung sowie die Lebensdauer definiert werden. In der „Tabelle PV-Erträge“ können für unterschiedliche Standorte, Ausrichtungen und Dachneigungen die monatlichen Erträge eingegeben werden.

Für die Berechnungen wurden bei der Herstellung die im Kapitel 4.1.1.7 beschriebenen Werte verwendet.

Bei den Erträgen wurden die monatlichen Erträge lt. dem „my-PV Power-Coach“ eingegeben (myPV, 2022a). Diese wurden mit einer Simulation im Simulationsprogramm Polysun® überprüft, sie liegen geringfügig unter den simulierten Ergebnissen.

5.3.2. Elektrische Fußbodenheizung, Wärmeabgabesysteme

Beide Eingaben erfolgen in der „Tab. Wärmeabgabe, WW-Bereit.“.

Hier wurden bei der elektrischen Fußbodenheizung die in Kapitel 4.1.1.2 erläuterten Werte verwendet.

Die Werte der wassergeführten Fußbodenheizung bzw. Heizung über Heizkörper setzen sich aus den im Kapitel 4.1.1.4 beschriebenen Werten für die Wärmeverteilung- und abgabe zusammen.

5.3.3. Warmwasserbereitung

Für die Warmwasserbereitung wurde in beiden Varianten ein Speicher mit 300 l angesetzt. Der Heizstab bzw. die Verrohrung beim wassergeführten System wurde nicht berücksichtigt. Die Werte befinden sich ebenfalls in der „Tab. Wärmeabgabe, WW-Bereit.“, siehe hierzu auch Kapitel 4.1.5.

5.3.4. Wärmepumpe und Kältemittel

In der „Tabelle Wärmepumpe“ werden die Daten zu den Wärmepumpen eingegeben. Die Daten setzen sich zusammen aus der Lebensdauer, einer Annahme für die Kältemittelleckage bei der Erstbefüllung sowie den Umweltwirkungen bei der Herstellung ohne die Kältemittellage zur Befüllung.

Für die Vergleichsberechnung wurden die Werte der Referenz-Wärmepumpe lt. (Becker et al., 2022) (siehe Kapitel 4.1.3) herangezogen, zusätzlich wurde ein Pufferspeicher mit 90 l berücksichtigt. Da in der ÖKOBAUDAT keine Daten für einen Puffer mit 90 l verfügbar sind, wurde in Anlehnung an die Werte für den Speicher mit 200 l (56kg) und dem Speicher mit 300 l (59,5kg) eine Masse von 50 kg angenommen. Die Errechnung erfolgte anschließend nach Werten für Speicher der ÖKOBAUDAT (siehe Kapitel 4.1.5).

Die Lebensdauer wurde mit 15 Jahren angesetzt, der Kältemittelverlust bei der Befüllung mit 3 %, die Kältemittelfüllmenge mit 2,4 kg.

Zusätzlich werden hier die monatlichen Arbeitszahlen getrennt für Warmwasserbereitung und Heizung eingegeben. Aus diesem Grund wird in der zweiten Spalte auch der Standort definiert, da die Jahresarbeitszahlen abhängig vom Standortklima schwanken.

Die Berechnung der monatlichen Arbeitszahlen erfolgte mittels Polysun. Dabei wurden folgende Varianten simuliert:

- Gebäude mit einem U-Wert von 0,13 W/m²/K
- Gebäude mit einem U-Wert von 0,35 W/m²/K
- Gebäude mit einem U-Wert von 0,50 W/m²/K (hier musste eine andere WP gewählt werden)
- Nur Warmwasserbereitung mittels Wärmepumpe

Die Ergebnisse zeigten, dass zwischen den Varianten der Gebäude nur geringe Unterschiede in der Arbeitszahl sind. Die Warmwasserbereitung zeigte eine geringfügig bessere

Arbeitszahl. In Abbildung 13 sind die Ergebnisse, die als Grundlage für den Vergleich verwendet wurden, dargestellt.

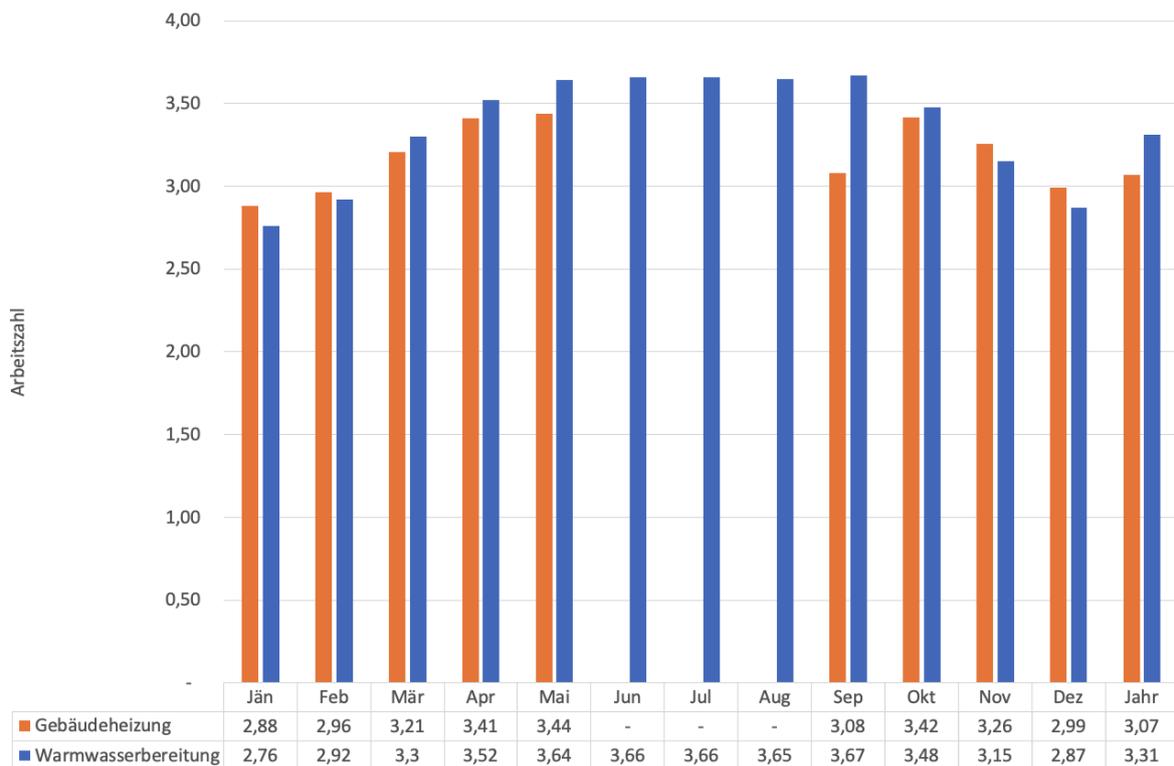


Abbildung 13: monatliche Arbeitszahlen Wärmepumpe

In der Tabelle Kältemittel sind die Daten aus Kapitel 4.2.2. eingegeben

5.3.5. Warmwasserbedarf und Strommix

In der Tabelle Strommix wurden folgende Daten für den Vergleich verwendet:

- Monatliche Konversionsfaktoren für Österreich wie in Kapitel 4.2.1 beschrieben
- Monatliche Konversionsfaktoren der Tschechischen Republik (Roßkopf, 2017, S. 69)
- Monatliche Konversionsfaktoren, die 50 % der derzeitigen österreichischen Werte betragen

Die entsprechende Werte sind in der untenstehenden Tabelle 18 dargestellt.

Tabelle 18: monatliche Konversionsfaktoren Strom

Globales Erwärmungspotential GWP [CO ₂ -Äq./kWh]												
	Jänner	Februar	März	April	Mai	Juni	Juli	August	September	Oktober	November	Dezember
Österreich Monatsbasis	0,290	0,323	0,261	0,178	0,103	0,096	0,116	0,117	0,172	0,259	0,291	0,314
Österreich Monatsbasis 50 %	0,145	0,162	0,131	0,089	0,052	0,048	0,058	0,059	0,086	0,130	0,146	0,157
Tschechische Republik	0,662	0,706	0,689	0,683	0,641	0,604	0,683	0,634	0,668	0,683	0,733	0,719

Total nicht erneuerbare Primärenergie PENRT [MJ/kWh]												
	Jänner	Februar	März	April	Mai	Juni	Juli	August	September	Oktober	November	Dezember
Österreich Monatsbasis	3,924	4,320	3,492	2,340	1,368	1,260	1,548	1,548	2,232	3,384	3,960	4,356
Österreich Monatsbasis 50 %	1,962	2,160	1,746	1,170	0,684	0,630	0,774	0,774	1,116	1,692	1,980	2,178
Tschechische Republik	12,780	12,744	12,564	12,312	12,096	12,168	12,096	12,276	12,348	12,528	12,564	12,492

Der Warmwasserbedarf wurde für 4 Personen zu je 50 Liter pro Tag mit 50 °C angenommen. Eine Zirkulation wurde nicht berücksichtigt, zur Errechnung des Energiebedarfs wurde eine Simulation mit Polysun durchgeführt. Die Jahressumme beträgt 3 336 kWh, die monatlichen Werte sind in Tabelle 19 dargestellt.

Tabelle 19: Energiebedarf für Warmwasserbereitung in kWh (4 Personen)

Jän.	Feb.	März	April	Mai	Juni	Juli	Aug.	Sep.	Okt.	Nov.	Dez.
304	281	310	293	290	266	263	25	248	264	268	292

5.3.6. Heizwärmebedarf

Für den Heizwärmebedarf (HWB) ist es aufgrund der monatlich schwankenden Konversionsfaktoren notwendig, die Aufteilung des Bedarfs auf die einzelnen Monate für einzelne Standorte zu ermitteln. Dazu wurden in Polysun drei unterschiedliche Gebäude am Standort Linz simuliert (siehe dazu Kapitel 5.3.5).

Die Ergebnisse, die in Abbildung 14 dargestellt sind, zeigen das bei schlecht gedämmten Gebäuden auch in den wärmeren Monaten eine Heizung notwendig ist. Bei gut gedämmten Gebäuden ist der Anteil am gesamten Heizwärmebedarf in den Wintermonaten höher.

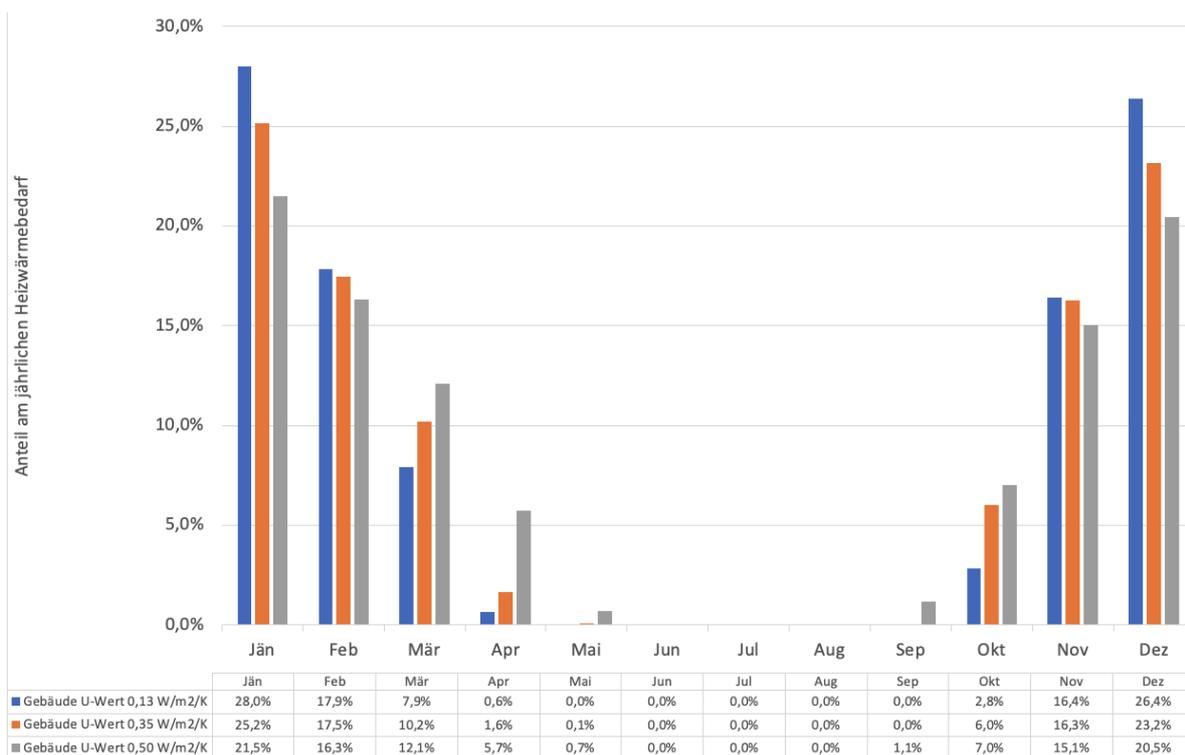


Abbildung 14: monatlicher Verlauf des Heizwärmebedarfs bei unterschiedlichen Gebäuden (Standort Linz)

Dadurch ergibt sich die Notwendigkeit, den monatlichen Verlauf des Heizwärmebedarfs in Abhängigkeit vom jährlichen Heizwärmebedarf pro qm zu bestimmen. In der „Tabelle Heizwärmebedarf“ werden daher die Daten für die monatliche Verteilung sowohl für den Standort als auch für den Bereich, in dem sich Heizwärmebedarf befindet eingegeben.

Dabei wurden die Eingaben in Anlehnung an die OIB-Richtlinie 6 vorgenommen:

- HWB < 25 kWh/(m²a): Ergebnis der Simulation mit U-Wert 0,13 W/m²/K
- HWB 25 -50 kWh/(m²a): Mittelwert Ergebnisse mit U-Wert 0,13 u. U-Wert 0,35
- HWB 50 -100 kWh/(m²a): Ergebnis der Simulation mit U-Wert 0,35 W/m²/K
- HWB > 100 kWh/(m²a): Ergebnis der Simulation mit U-Wert 0,50 W/m²/K

5.4. Berechnungsweg

Die Berechnung erfolgt in zwei Schritten:

1. Berechnung der monatlichen Werte für die Nutzung

Hier werden die monatlichen Werte in Bezug auf den Energiebedarf, das Treibhauspotenzial und die Primärenergie (erneuerbar und nicht erneuerbar) in der Tabelle „Berechnung Nutzung“ anhand der Eingabedaten errechnet. Dies erfolgt für die Erträge der PV-Anlage, den Heizwärme- und den Warmwasserbedarf.

Die Berechnung des elektrischen Heizwärmebedarfs erfolgt ohne Übergabeverluste, da die Wärme direkt im Raum zur Verfügung gestellt wird. Die Übergabeverluste der Wärmepumpe sind in der Arbeitszahl berücksichtigt. Der Energiebedarf sowie die daraus resultierenden Umweltwirkungen werden getrennt, mit der jeweiligen monatlichen Arbeitszahl, für die Warmwasserbereitung und Heizung errechnet. Der Haushaltsstrom wird in dieser Tabelle ebenfalls mitberechnet.

2. Berechnung der Ergebnisse über den Betrachtungszeitraum

Zur Berechnung der Gesamtergebnisse wurden zwei Tabellenblätter erstellt, eines für die Berechnung der elektrischen Heizung mit PV-Anlage, das zweite für die Berechnung der Wärmepumpe. Es gibt für jede Komponente und Umweltwirkung eine Spalte sowie eine Spalte für die Summe. In den Zeilen ist eine Zeile für die Herstellung sowie eine weitere für jedes Jahr des Betrachtungszeitraums. Die Umweltwirkungen der Herstellung werden zu Beginn errechnet. Da die Nutzungsdauern der einzelnen Komponenten unterschiedlich sind, wird ein zweiter Herstellungsaufwand nach Ende der Nutzungsdauer berechnet. Dieser Herstellungsaufwand wird jedoch nur mehr in dem Maße miteinbezogen, wie es der restlichen Laufzeit bis zum Ende des Betrachtungszeitraums entspricht. Das bedeutet, dass bei einer 20-jährigen Lebensdauer und einem 30jährigen Betrachtungszeitraum, der Herstellungsaufwand im 21. Jahr nur mehr zur Hälfte hinzugerechnet wird.

Die jährlichen Werte aus der monatlichen Berechnung werden hier eingetragen. Zusätzlich wird hier noch die Wartung sowie der Kältemittelverlust der Wärmepumpenheizung errechnet.

5.5. Ergebnisse

5.5.1. Varianten mit einem Heizwärmebedarf von 30 kWh/(m²a)

In einem ersten Schritt wurden Varianten mit einem Heizwärmebedarf von 30 kWh/(m²a) geprüft.

Bei der Variante 1 mit einer 10 kWp Photovoltaikanlage und einer Wärmepumpe mit dem Kältemittel R-410A sowie dem österreichischen Strommix schneidet die Variante mit der elektrischen Fußbodenheizung und der PV-Anlage besser ab als die Variante mit der Wärmepumpe. Das gilt sowohl für das Treibhauspotenzial als auch für den nicht erneuerbaren Primärenergiebedarf. Die höheren Emissionen bei der Herstellung werden beim Treibhauspotenzial nach 16 Jahren egalisiert. Bei der nicht erneuerbaren Primärenergie ist der Schnittpunkt nach 21 Jahren erreicht, eine graphische Darstellung über den zeitlichen Verlauf findet sich in Abbildung 15.

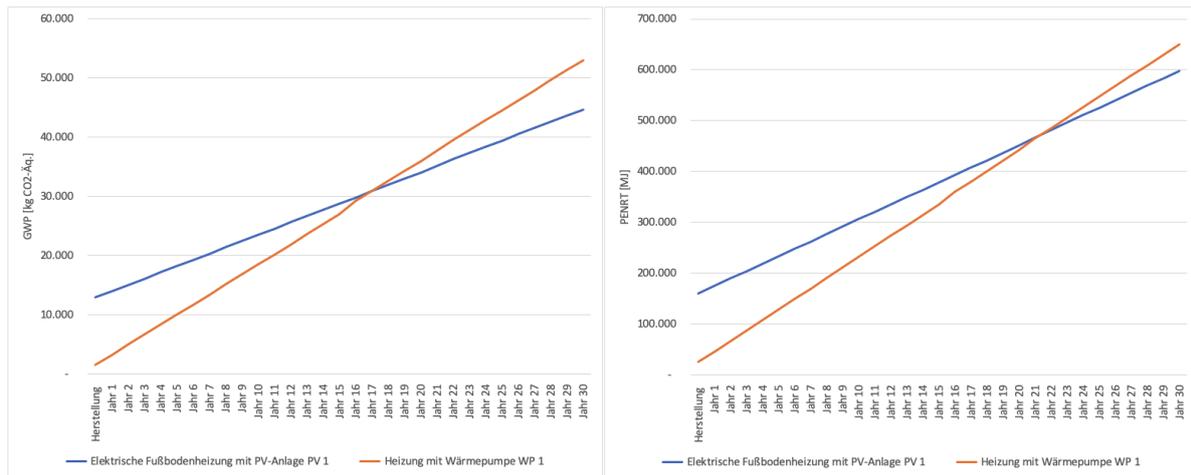


Abbildung 15: zeitlicher Verlauf GWP und PENRT bei Variante 1

Die Aufteilung auf die einzelnen Phasen zeigt, dass der Herstellungsaufwand bei der Photovoltaikanlage einen großen Anteil am Treibhauspotenzial und dem nicht erneuerbaren Energieaufwand hat. Bei der Wärmepumpe hingegen ist der Anteil sehr gering. Einen Überblick dazu gibt Abbildung 16.

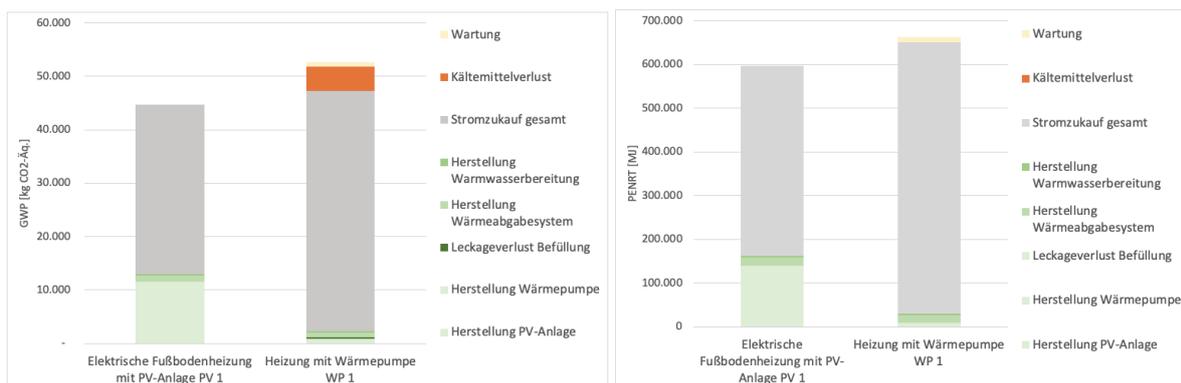


Abbildung 16: Ökobilanz-Vergleich Variante 1

Bei der Wärmepumpenvariante ist der Anteil des Kältemittelverlusts am Treibhauspotenzial gut erkennbar. Wird nur die Heizung betrachtet, beträgt der Anteil des Kältemittels 17 % an den Treibhausgasemissionen, der Anteil des Stromverbrauchs an den Emissionen beträgt 72 %.

Die elektrische Heizung profitiert besonders von dem produzierten Strom der Photovoltaikanlage. Insgesamt betragen die Treibhausgasemissionen knapp 100 Tonnen über einen Zeitraum von 30 Jahren. Davon können etwa 55 % durch die Gutschrift der Photovoltaikerträge kompensiert werden. Bei der Wärmepumpenvariante hingegen betragen die Emissionen insgesamt ca. 53 Tonnen.

In der Abbildung 17 und Abbildung 18 ist das Treibhauspotenzial bzw. der nicht erneuerbare Primärenergiebedarf der 8 Varianten dargestellt. Insgesamt zeigt sich auf beiden Darstellungen ein ähnliches Bild.

Die ersten vier Varianten mit dem österreichischen Strommix sind bedeutend schlechter als die Varianten, bei der ein halbiertes österreichischer Strommix angenommen wurde.

Die Varianten mit der kleineren Photovoltaikanlage (PV 2, PV 4, PV 6 und PV 8) haben die höchsten Treibhausgasemissionen und den höchsten nicht erneuerbaren Primärenergiebedarf in den jeweiligen Strommix-Varianten.

Ebenso sind die Wärmepumpenvarianten bei den Berechnungen mit österreichischem Strommix schlechter als die elektrische Heizung mit einer 10 kWp Photovoltaikanlage, wobei bei der Verwendung von R-290 als Kältemittel der Unterschied nur mehr sehr gering ist.

Unter der Annahme, dass sich die Konversionsfaktoren der österreichischen Stromerzeugung halbieren ist eine Heizung mit Wärmepumpe und natürlichem Kältemittel beim Treibhauspotenzial besser als eine elektrische Heizung. Bei Verwendung von R-410A als Kältemittel ergeben sich geringfügig höhere Treibhausgasemissionen.

In Bezug auf die nicht erneuerbare Primärenergie ist eine Wärmepumpenheizung in den Varianten mit dem halbierten Strommix geringfügig im Vorteil.

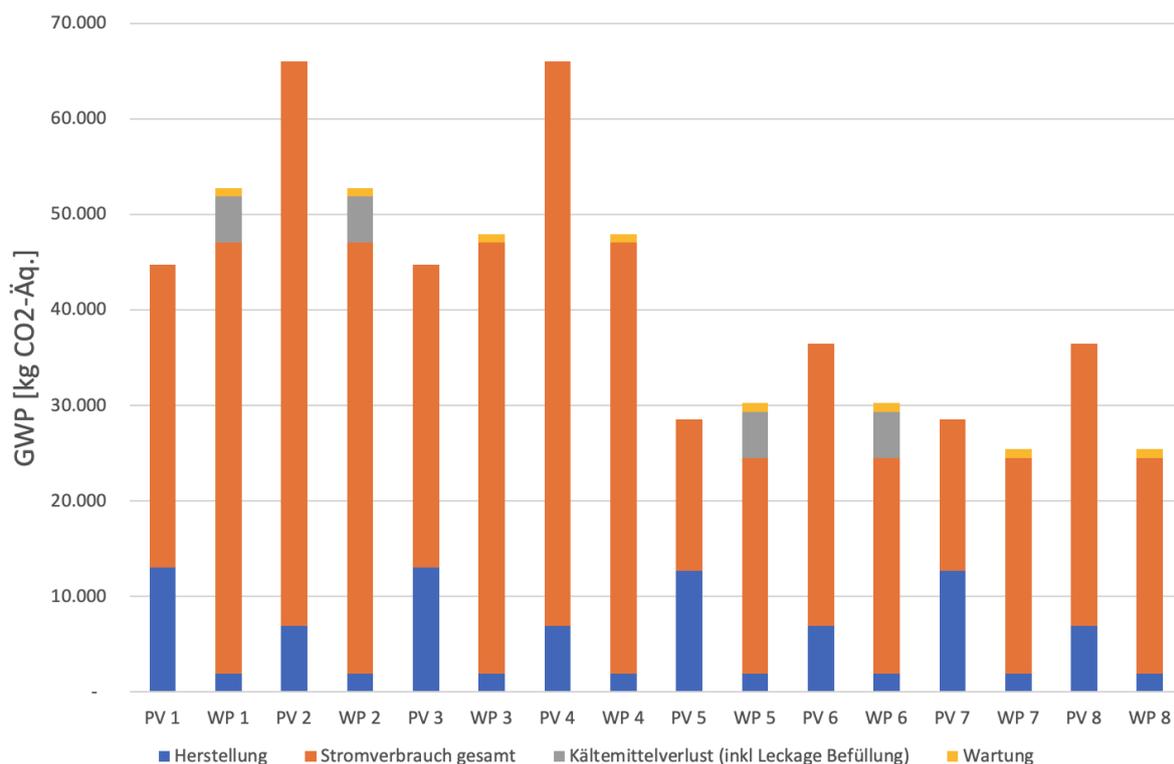


Abbildung 17: Treibhauspotenzial der Varianten 1 bis 8

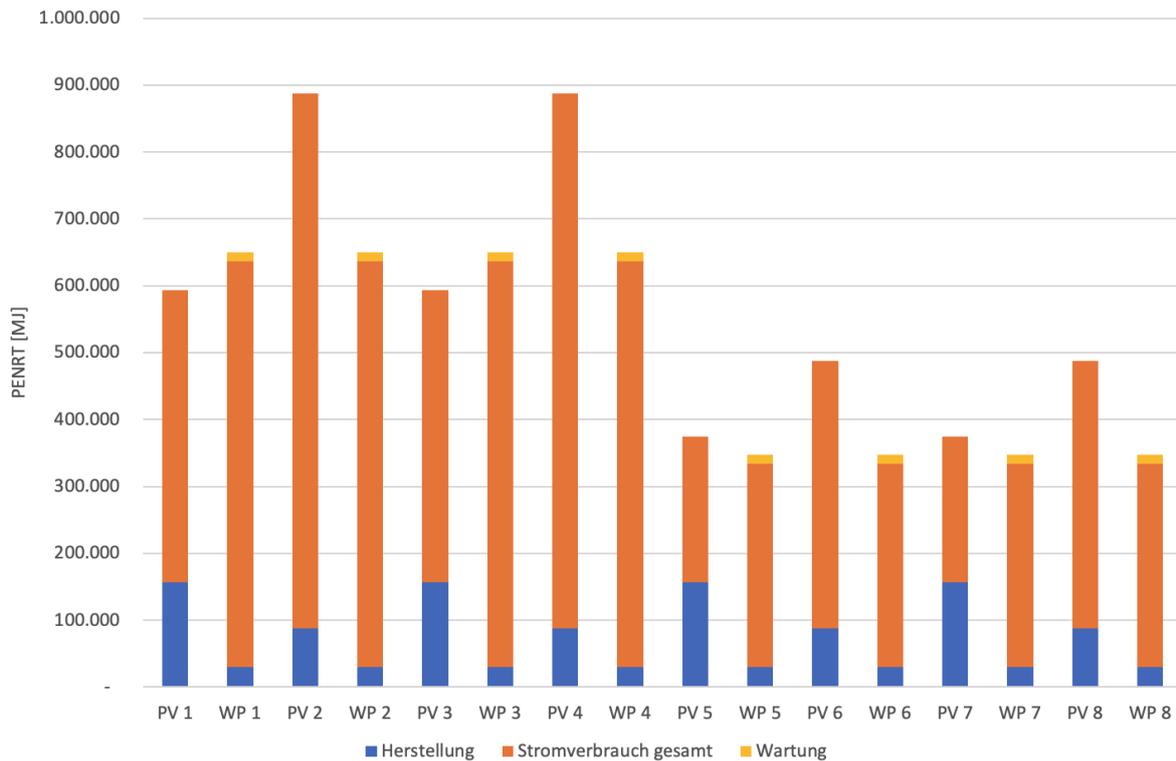


Abbildung 18: Nicht erneuerbare Primärenergieinhalt der Varianten 1 bis 8

5.5.2. Varianten mit einem Heizwärmebedarf von 15 kWh/(m²a)

Bei einem Heizwärmebedarf von nur 15 kWh/(m²a), die auch als Passivhäuser bezeichnet werden, zeigt sich ein anderes Bild. Zu Beginn wird wieder die erste Variante (PV 9 und WP 9) betrachtet.

Wie in der Abbildung 19 zu erkennen ist, ist der Schnittpunkt bereits nach 10 bzw. 11 Jahren erreicht.

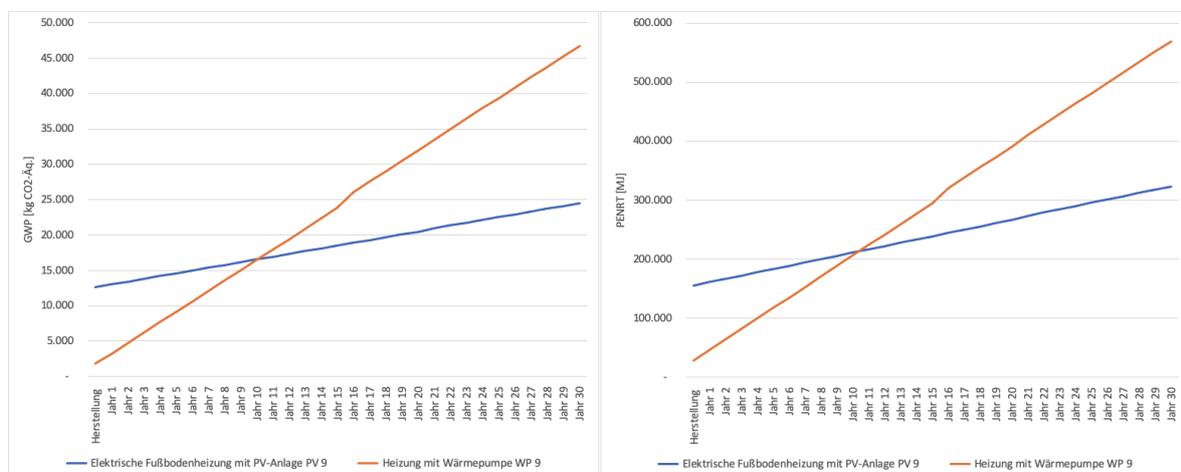


Abbildung 19: Zeitlicher Verlauf GWP und PENRT bei Variante 9

Der Anteil der Kältemittlemissionen an den gesamten Treibhausgasemissionen steigt auf 23 %. Um den Einfluss auf die Emissionen des Heizsystems zu betrachten, werden die durch den Haushaltsstromverbrauch entstehenden Emissionen nicht berücksichtigt. Unter der Annahme, dass sich die Emissionen aus der Stromerzeugung halbieren (WP 13) beträgt der Anteil der Kältemittlemissionen bereits 34 % an den gesamten Treibhausgasemissionen der Wärmepumpe. Eine graphische Darstellung findet sich in Abbildung 20.

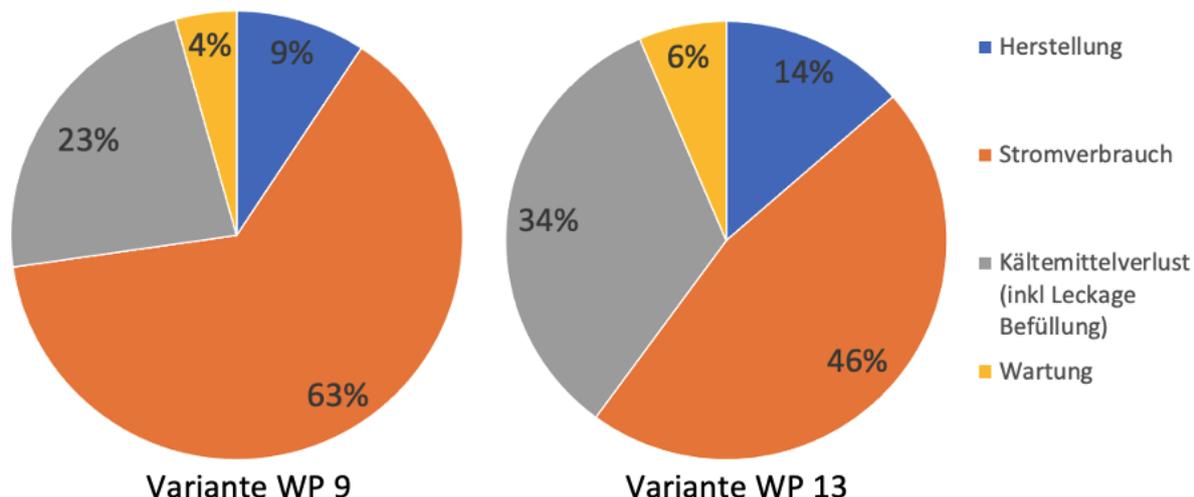


Abbildung 20: Aufteilung der Treibhausgasemissionen der Wärmepumpe mit Kältemittel R-410A in den Varianten 9 und 13

Im Vergleich zu den Wärmepumpenvarianten mit dem Kältemittel R-410 A sind die elektrischen Heizsysteme mit einer 5 kWp-Anlage in Bezug auf das Treibhauspotenzial etwa gleichauf. Beim nicht erneuerbaren Primärenergiebedarf schneiden sie jedoch schlechter ab als die Varianten mit Wärmepumpe.

Die Systeme mit einer 10 kWp-Anlage sind bei Gebäuden mit einem HWB von 15 kWh/(m²a) sowohl in Hinblick auf das Treibhauspotenzial als auch auf den nicht erneuerbaren Primärenergiebedarf besser bewertet. Der Anteil der Herstellung bei den Photovoltaiksystemen beträgt hier bereits über 50 % an den gesamten Treibhausgasemissionen.

Die Treibhausgasemissionen betragen bei der Variante PV 9 25 Tonnen im Vergleich zu etwa 45 Tonnen in Variante PV 1. Dies liegt vor allem am gesunkenen Heizwärmebedarf. Bei der Variante mit Wärmepumpe sinken die Emissionen nicht so stark. Sie betragen statt 53 Tonnen in Variante WP 1 46 Tonnen in der Variante WP 9.

Unter der Annahme, dass sich der österreichische Stromerzeugungsmix halbiert, hat trotzdem das elektrische Heizsystem mit einer 10 kWp PV-Anlage über einen Betrachtungszeitraum von 30 Jahren niedrigere Treibhausgasemissionen als Systeme mit Wärmepumpe.

Der nicht erneuerbare Primärenergiebedarf ist in den Varianten der elektrischen Fußbodenheizung mit einer 10 kWp PV-Anlage ebenfalls geringer als in den Varianten mit einer Wärmepumpenheizung.

In der Abbildung 21 und Abbildung 22 sind die Ergebnisse der Varianten dargestellt.

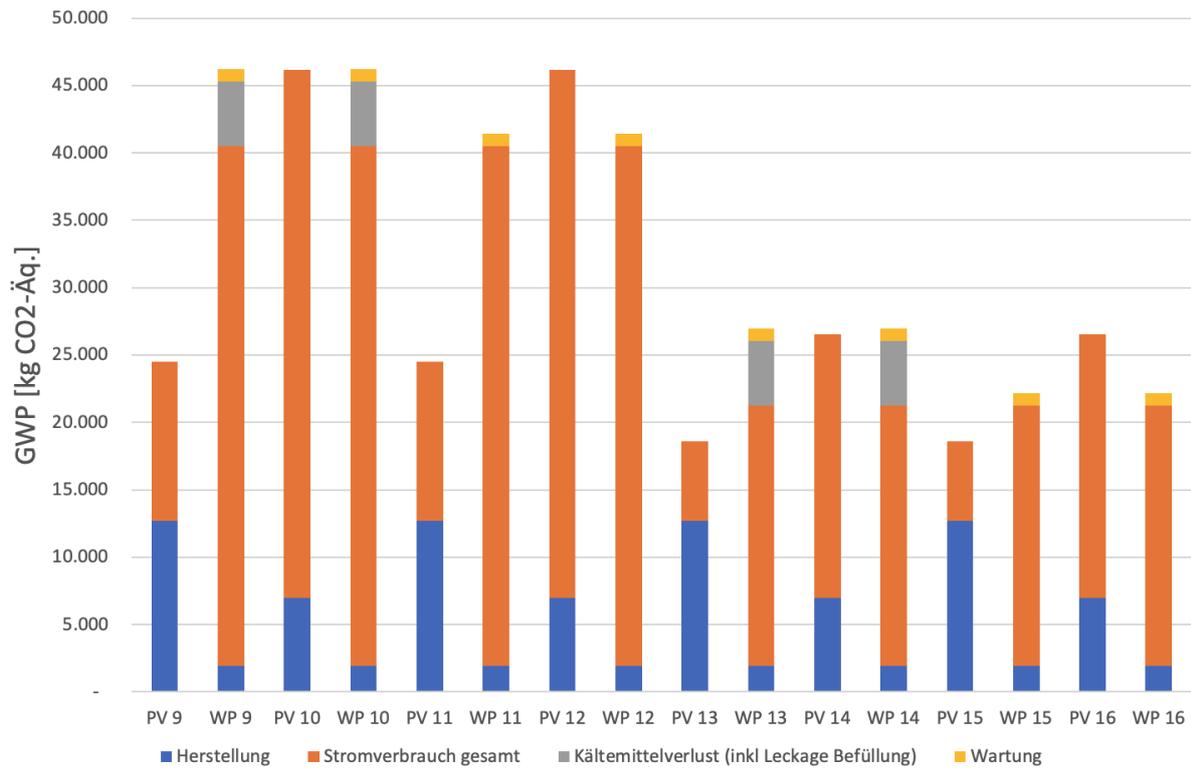


Abbildung 21: Treibhauspotenzial der Varianten 9 bis 16

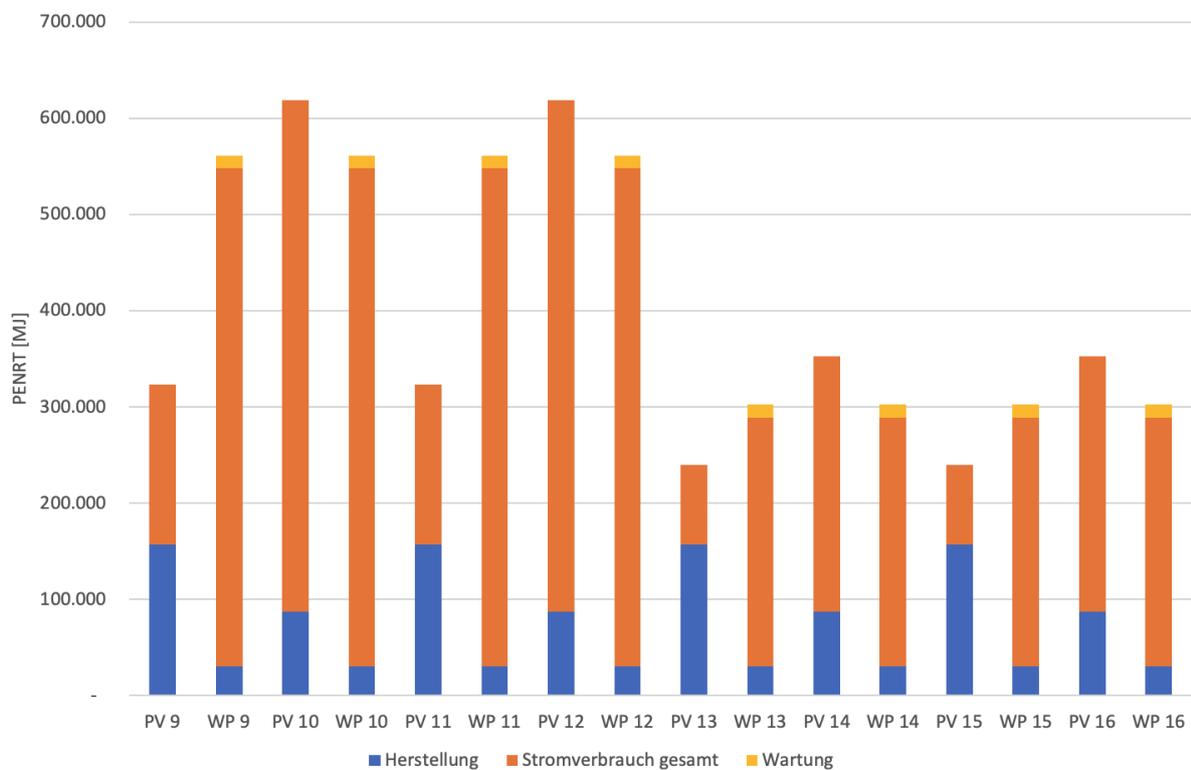


Abbildung 22: Nicht erneuerbarer Primärenergieinhalt der Varianten 9 bis 16

5.5.3. Varianten mit einem Heizwärmebedarf von 80 kWh/(m²a)

Wenn der HWB auf 80 kWh/(m²a) ansteigt und der derzeitige österreichische Strommix angenommen wird, sind die Heizsysteme mit Wärmepumpe den elektrischen Systemen überlegen. Das gilt auch für elektrische Systeme mit einer 15 kWp PV-Anlage, wie in Abbildung 23 zu erkennen ist.

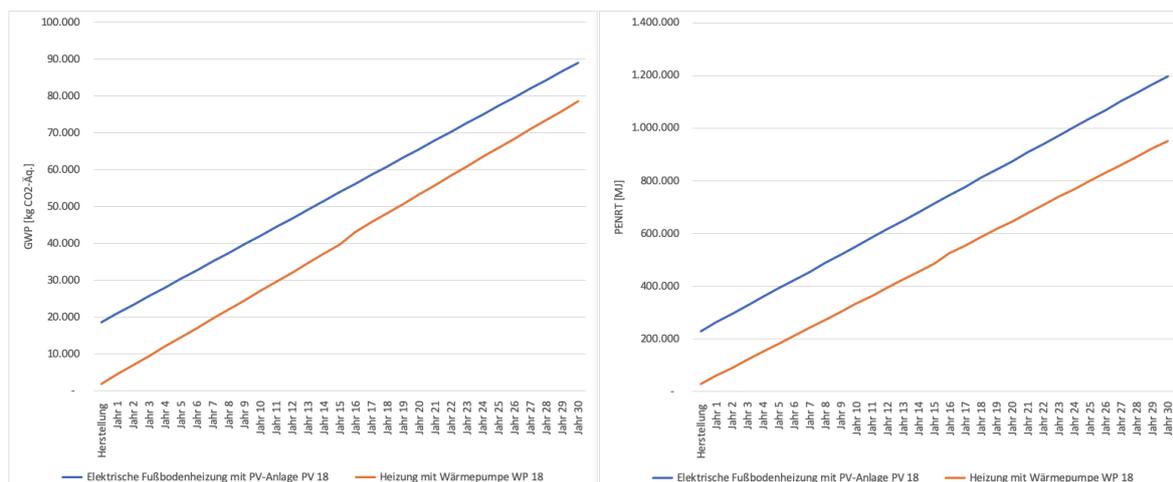


Abbildung 23: zeitlicher Verlauf GWP und PENRT Variante 18

Trotz der hohen Gesamtemissionen bei diesen Varianten beträgt der Anteil des Kältemittels an den Gesamtemissionen der Heizung in der Variante WP-17 bzw. WP-18 16%.

Um zu evaluieren, wie sich die Heizsysteme in anderen Ländern mit einer ökologisch schlechteren Stromerzeugung verhalten, wurden hier auch Varianten mit den tschechischen Konversionsfaktoren gerechnet. Während CO₂-Äquivalent-Emissionen der österreichischen Stromaufbringung ca. 210 g pro kWh betragen, hat die Tschechische Republik Emissionen von 677 g pro kWh (Roßkopf, 2017, S. 69).

Unter diese Annahme liegt die Variante mit einer 10 kWp PV-Anlage noch immer über den Varianten mit Wärmepumpe. Die gesamten CO₂-Emissionen liegen bei etwa dem Doppelten im Vergleich zur Berechnung mit österreichischen Stromaufbringungswerten. Wird die PV-Anlage auf 15 kWp vergrößert, erreichen die CO₂-Emissionen etwa den Wert der Variante PV-17 bzw. PV-19 mit einer 10kWp Anlagen und österreichischem Strommix.

Der nicht erneuerbare Primärenergiebedarf zeigt wieder ein ähnliches Bild wie das Treibhauspotenzial, wie aus Abbildung 24 und Abbildung 25 hervorgeht.

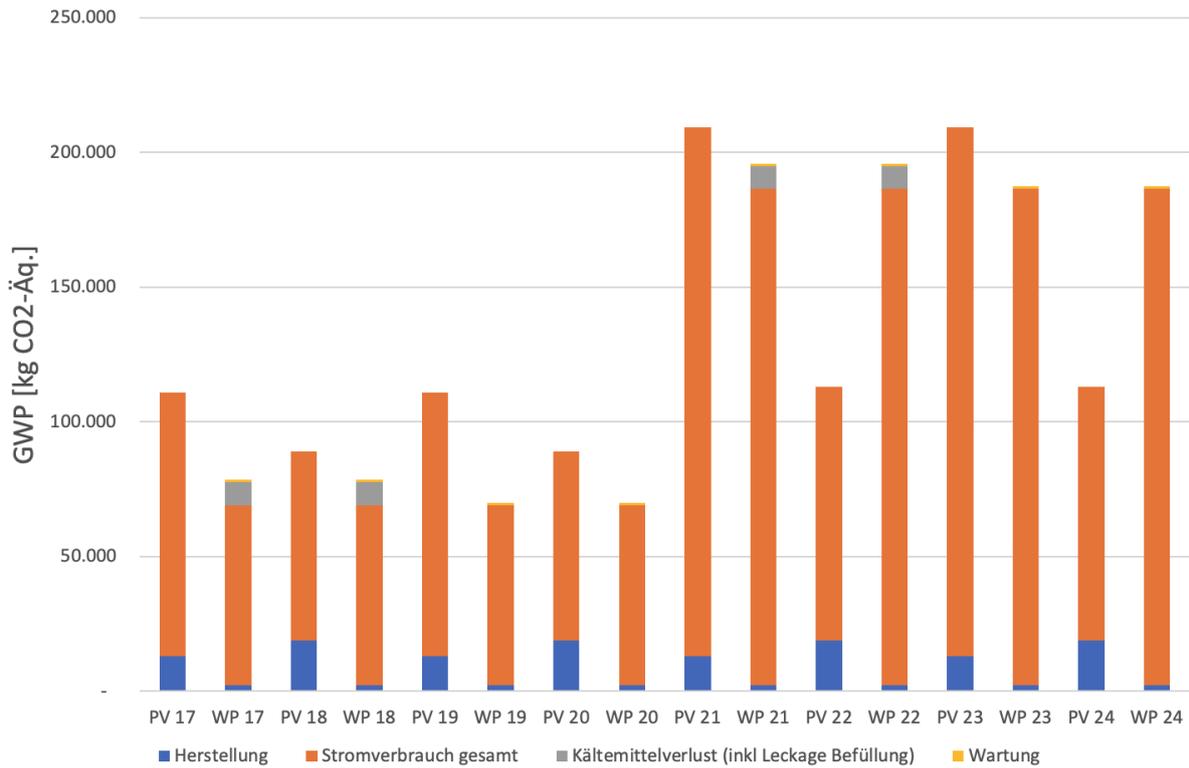


Abbildung 24: Treibhauspotenzial der Varianten 17 bis 24

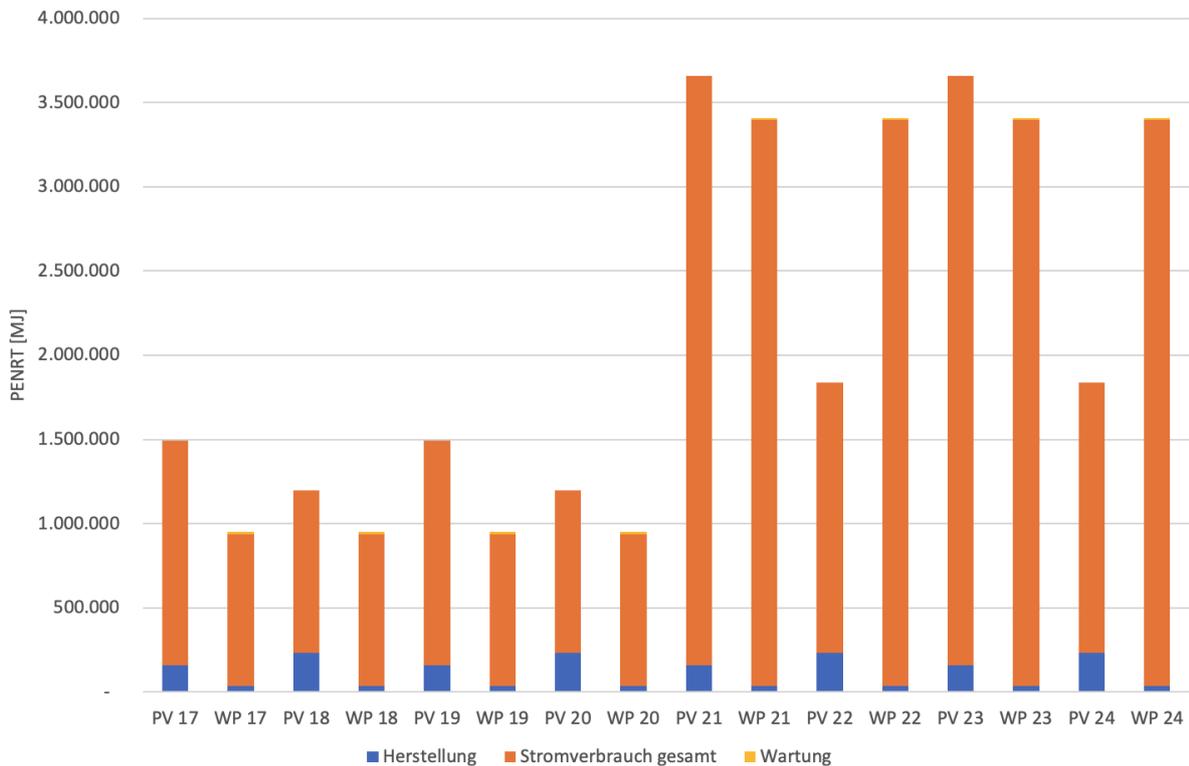


Abbildung 25: Nicht erneuerbarer Primärenergieinhalt der Varianten 17 bis 24

Der Anteil der Kältemittlemissionen an den Treibhausgasemissionen ist mit 16 % an den gesamten Emissionen zwar geringer als bei Gebäuden mit niedrigem HWB, aber immer noch doppelt so hoch wie die Emissionen der Herstellung.

Beim in der Abbildung 26 gezeigten Vergleich dieser Varianten mit jenen aus den vorigen Abschnitten zeigt sich, dass die CO₂-Äquivalent-Emissionen der elektrischen Fußbodenheizung mit einer 10 kWp PV-Anlage sehr stark vom Heizwärmebedarf abhängen. Bei einem Einfamilienhaus mit einem HWB von 15 kWh/(m²a) betragen die Gesamtemissionen über 30 Jahre ca. 25 t und steigen auf 45 t bei einem HWB von 30 kWh/(m²a). Eine Steigerung des Heizwärmebedarfs auf 80 kWh/(m²a) verursacht eine Steigerung von 150 % im Vergleich zu einem HWB von 30 kWh/(m²a), insgesamt betragen sie dann etwa 110 t.

Bei den Varianten mit Wärmepumpe ist diese Differenz nicht so stark ausgeprägt. Hier beträgt der Unterschied zwischen einem HWB von 15 kWh/(m²a) und 30 kWh/(m²a) lediglich 15 %. Wird statt dem Kältemittel R-410A das Kältemittel R-290 verwendet, so hat das annähernd den gleichen Effekt wie eine Verringerung des Heizwärmebedarfs von 30 kWh/(m²a) auf 15 kWh/(m²a) (siehe Vergleich WP-3/4 mit WP-9/10). Eine Steigerung des Heizwärmebedarfs auf 80 kWh/(m²a) verursacht auch bei einer Heizung mit Wärmepumpe eine starke Steigerung der Gesamtemissionen im Vergleich zu denen mit geringerem Heizwärmebedarf. Sie steigen von etwa 41 bei 53 Tonnen auf 70 – 78 Tonnen CO₂-Äquivalent bei einem Betrachtungszeitraum von 30 Jahren.

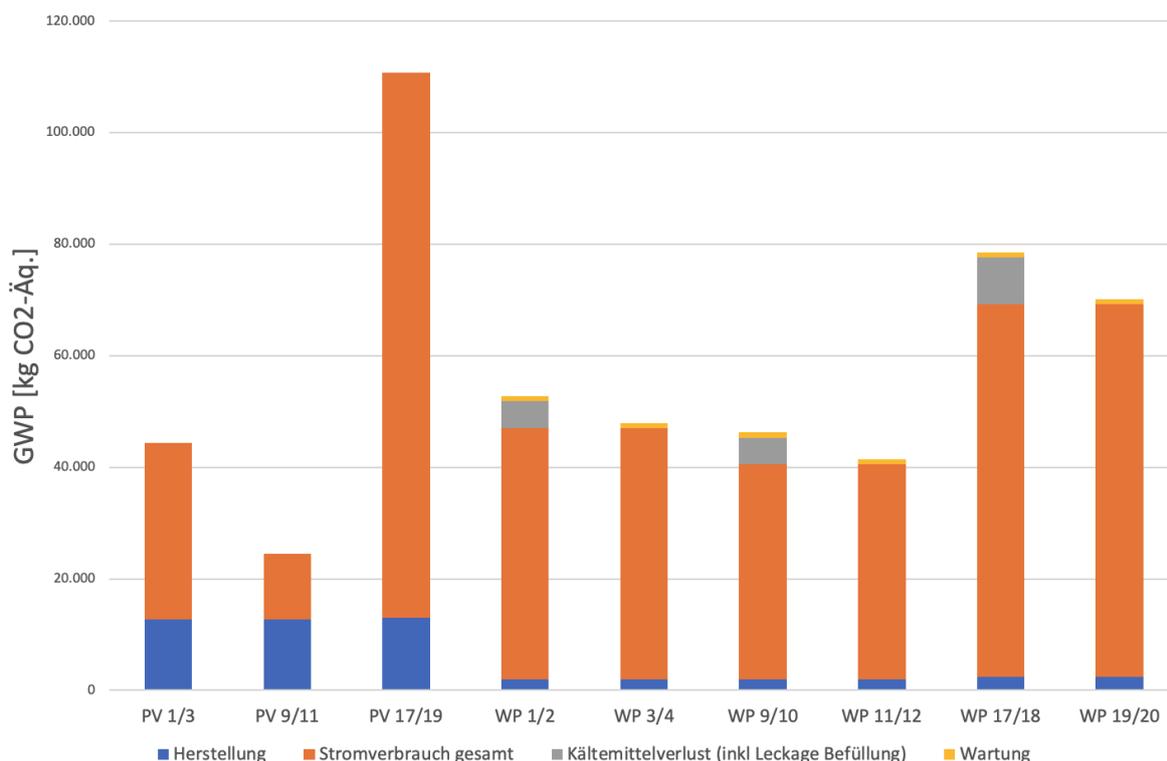


Abbildung 26: Vergleich Treibhauspotenzial von Varianten mit unterschiedlichem Heizwärmebedarf

6. Conclusio

Diese Arbeit befasste sich mit dem Einfluss unterschiedlicher Heizsysteme auf die Treibhausgasemissionen und dem nicht erneuerbaren Primärenergieinhalt bei Einfamilienhäusern.

Die Forschungsfrage, wie sich Gebäude mit Direktstromheizung und PV im Vergleich zu Heizsystemen mit Wärmepumpen unter den hier betrachteten ökologischen Gesichtspunkten verhalten, muss differenziert beantwortet werden.

Es zeigte sich, dass Heizsysteme mit elektrischer Fußbodenheizung in Verbindung mit relativ großen Photovoltaikanlagen bei Gebäuden mit geringem Heizwärmebedarf niedrigere Treibhausgasemissionen verursachen als Heizsysteme mit Wärmepumpe. Bei der Installation von kleinen Photovoltaikanlagen kehrt sich diese Bild um und es ergibt sich ein Vorteil zugunsten Heizung mit Wärmepumpe. Lediglich bei Passivhäusern reichen auch kleine Photovoltaikanlagen aus, um mit rein elektrischen Systemen niedrigere Treibhausgasemissionen als bei Systemen mit Wärmepumpe zu erreichen.

Hingegen sind bei Gebäuden mit höherem Heizwärmebedarf Heizungssysteme mit Wärmepumpe unter österreichischen Bedingungen klar im Vorteil. In anderen Ländern, mit einem ökologisch schlechteren Strommix, könnte in Einzelfällen, wenn die Photovoltaikanlage groß genug dimensioniert werden kann, das elektrische Heizsystem geringere Treibhausgasemissionen verursachen.

Somit kann auch die Hypothese, dass direkt elektrische Heizsysteme in einer Verbindung mit einer Photovoltaikanlage geringere Umweltbelastungen als Heizsysteme mit Wärmepumpen haben, nicht eindeutig bestätigt oder widerlegt werden.

Ebenfalls zeigte sich, dass Kältemittel mit hohem Treibhausgaspotenzial einen großen Einfluss auf die Gesamtemissionen eines Heizsystems haben. Insbesondere in Gebäuden mit geringem Heizwärmebedarf steigt der Anteil, aber auch bei höherem Heizwärmebedarf, der eine größere Wärmepumpe mit höherer Füllmenge bedingt, ist der Anteil nicht zu vernachlässigen. Unter der Voraussetzung, dass es gelingt die Stromerzeugung in Österreich zu dekarbonisieren, betragen die Emissionen aus einem Kältemittel wie R-410A 17 % an den Gesamtemissionen eines Gebäudes mit sehr niedrigem Heizwärmebedarf. Daraus kann man folgern, dass die Umstellung von Wärmepumpen auf Kältemittel mit niedrigem Treibhauspotenzial für das Gelingen der Klimaziele dringend notwendig ist.

Die Notwendigkeit laufender Aktualisierung der für Ökobilanzen zugrunde gelegter Sachbilanzen wurde in der Erhebung der Daten für die Photovoltaikanlage deutlich. So zeigte sich, dass der Herstellungsaufwand nur mehr knapp halb so hoch ist wie bei älteren Daten. Der

Einfluss der Stromerzeugung in der Herstellung von Photovoltaik ist ebenfalls erheblich, er beträgt 3 Tonnen CO₂-Äquivalent bei der Herstellung einer Anlage mit 10 kWp, wie aus der durchgeführten Erhebung hervorgeht.

Der Verbrauch an nicht erneuerbarer Primärenergie zeigte insgesamt ein ähnliches Bild wie die Treibhausgasemissionen. Aus dem Blickwinkel der Schonung nicht erneuerbarer Ressourcen ergeben sich keine anderen Erkenntnisse als aus dem Blickwinkel in Bezug auf das Treibhausgaspotenzial.

Abschließend kann festgestellt werden, dass die Installation von großen Photovoltaikanlagen in Verbindung mit elektrischen Heizsystemen unter den hier betrachteten ökologischen Gesichtspunkten bei Einfamilienhäusern mit geringem Heizwärmebedarf besser ist als ein System mit Wärmepumpe ohne Installation einer Photovoltaikanlage.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Phasen einer Ökobilanz (Eberle et al., 2015, S. 6)	4
Abbildung 2: Erfassung aller Materialien und Prozesse im Zuge einer Ökobilanz (Eberle et al., 2015, S. 5)	5
Abbildung 3: Modellstruktur zur Ökobilanzierung von PV-Anlagen (Hengstler et al., 2021, S. 141) ..	14
Abbildung 4: Modellstruktur zur Herstellung kristalliner Silizium Module (Hengstler et al., 2021, S. 169).....	17
Abbildung 5: Anteil der Komponenten einer PV-Anlage am Treibhauspotenzial und der nicht erneuerbaren Primärenergie	20
Abbildung 6: Heizmatten: links im Estrich verbaut, rechts auf dem Estrich verlegt	21
Abbildung 7: Heizkabel: links im Estrich verbaut, rechts auf dem Estrich verlegt.....	21
Abbildung 8: CO ₂ -Emissionen der österreichischen Stromerzeugung im Jahresverlauf (Roßkopf, 2017, S. 67)	28
Abbildung 9: Nicht erneuerbare Primärenergie der österreichischen Stromerzeugung im Jahresverlauf (Roßkopf, 2017, S. 67)	28
Abbildung 10: schrittweise Reduktion der Emissionen aus F-Gasen (Sušnik, 2019, S. 6).....	30
Abbildung 11: Kältemittelfüllmenge nach Heizleistung für Wärmepumpen mit Kältemittel R-290 (Becker et al., 2022, S. 92).....	32
Abbildung 12: Tabelle zur Eingabe der Daten.....	37
Abbildung 13: monatliche Arbeitszahlen Wärmepumpe	39
Abbildung 14: monatlicher Verlauf des Heizwärmebedarfs bei unterschiedlichen Gebäuden (Standort Linz)	41
Abbildung 15: zeitlicher Verlauf GWP und PENRT bei Variante 1	43
Abbildung 16: Ökobilanz-Vergleich Variante 1	43
Abbildung 17: Treibhauspotenzial der Varianten 1 bis 8.....	44
Abbildung 18: Nicht erneuerbare Primärenergieinhalt der Varianten 1 bis 8	45
Abbildung 19: Zeitlicher Verlauf GWP und PENRT bei Variante 9	45
Abbildung 20: Aufteilung der Treibhausgasemissionen der Wärmepumpe mit Kältemittel R-410A in den Varianten 9 und 13	46
Abbildung 21: Treibhauspotenzial der Varianten 9 bis 16.....	47
Abbildung 22: Nicht erneuerbarer Primärenergieinhalt der Varianten 9 bis 16.....	47
Abbildung 23: zeitlicher Verlauf GWP und PENRT Variante 18	48
Abbildung 24: Treibhauspotenzial der Varianten 17 bis 24.....	49

Abbildung 25: Nicht erneuerbarer Primärenergieinhalt der Varianten 17 bis 24.....49

Abbildung 26: Vergleich Treibhauspotenzial von Varianten mit unterschiedlichem Heizwärmebedarf
.....50

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Lebenszyklusphasen nach ÖNORM EN 15804 (2022) (eigene Darstellung) 6

Tabelle 2: schadensorientierte Wirkungskategorien (Goedkoop et al., 2009, S. 8).....7

Tabelle 3: Kennwerte Inverter (Hengstler et al., 2021, S. 147–155)..... 15

Tabelle 4: Ökobilanzergebnisse Inverter (Hengstler et al., 2021, S. 155) 15

Tabelle 5: Ökobilanzergebnisse Unterkonstruktion (Hengstler et al., 2021, S. 159) 16

Tabelle 6: Ökobilanzergebnisse elektrische Leitungen (Hengstler et al., 2021, S. 163)..... 16

Tabelle 7: Ökobilanzergebnisse multikristalliner PV-Module (Hengstler et al., 2021, S. 197)..... 18

Tabelle 8: Umweltbelastungen (GWP und PE_{NRT}) unterschiedlicher Transportarten (treeze.ch, 2022)
..... 19

Tabelle 9: Zusammenfassung Ökobilanzergebnisse für Herstellung und Entsorgung (ohne
Recyclinggutschrift) einer Photovoltaikanlage pro kWp Leistung20

Tabelle 10: Ökobilanzdaten Herstellung elektrische Fußbodenheizung.....22

Tabelle 11: Treibhauspotenzial für die Herstellung von Wärmepumpen nach unterschiedlichen
Quellen24

Tabelle 12: nicht erneuerbare Primärenergie für die Herstellung von Wärmepumpen nach
unterschiedlichen Quellen24

Tabelle 13: Ökobilanzergebnisse wassergeführte Wärmeverteilung und -abgabe (KBOB/ecobau/IPB-
Empfehlung 2009/1:2016, 2016)25

Tabelle 14: Umweltindikatoren eines Warmwasserspeichers und Durchlauferhitzers (ÖKOBAUDAT,
2021).....26

Tabelle 15: Vergleich der CO₂-Emissionen der Stromerzeugung nach unterschiedlichen Quellen ...27

Tabelle 16: Eingesetzte Kältemittel von im Dez. 2021 verfügbaren L/W-Wärmepumpen (Behringer et
al., 2021, S. 88, 136) (Becker et al., 2022, S. 73, 96–97) 31

Tabelle 17: Überblick Varianten 35

Tabelle 18: monatliche Konversionsfaktoren Strom..... 40

Tabelle 19: Energiebedarf für Warmwasserbereitung in kWh (4 Personen).....40

Literaturverzeichnis

- Anderl, M., Bartel, A., Geiger, K., Gugele, B., & Gössl, M. (2021). *Klimaschutzbericht 2021*. Umweltbundesamt.
- Beccali, M., Cellura, M., Finocchiaro, P., Guarino, F., Longo, S., & Nocke, B. (2014). Life cycle performance assessment of small solar thermal cooling systems and conventional plants assisted with photovoltaics. *Solar Energy*, *104*, 93–102.
- Beccali, M., Cellura, M., Longo, S., & Guarino, F. (2016). Solar heating and cooling systems versus conventional systems assisted by photovoltaic: Application of a simplified LCA tool. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, *156*, 92–100.
- Becker, C., Gloël, J., Moie, J., Timm, E., Huth, P., Koch, F., & Lützkendorf, C. (2022). *Hauswärmepumpen mit natürlichen Kältemitteln* [Zwischenbericht]. Umweltbundesamt.
- Behringer, D. D., Heydel, D. F., Gschrey, B., Osterheld, S., Schwarz, W., Warncke, K., Freeling, F., Nödler, D. K., Henne, D. S., Reimann, D. S., Blepp, M., Jörß, W., Liu, R., Ludig, D. S., Rüdener, I., & Gartiser, D. S. (2021). *Persistent degradation products of halogenated refrigerants and blowing agents in the environment: Type, environmental concentrations, and fate with particular regard to new halogenated substitutes with low global warming potential*. Umweltbundesamt.
- Blom, I., Itard, L., & Meijer, A. (2010). LCA-based environmental assessment of the use and maintenance of heating and ventilation systems in Dutch dwellings. *Building and Environment*, *45*(11), 2362–2372.
- DEFRA / DECC. (2010). *2010 Guidelines to Defra / DECC's GHG Conversion Factors for Company Reporting*.
- Dong, Y. H., & Ng, S. T. (2014). Comparing the midpoint and endpoint approaches based on ReCiPe—A study of commercial buildings in Hong Kong. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, *19*(7), 1409–1423.

- Eberle, U., Jepsen, D., Volz, S., Ausberg, L., & Reintjes, N. (2015). *EcoDesignKit B2.1 Die Ökobilanz*. Ökopol - Institut für Ökologie und Politik GmbH.
- E-control. (2022). <https://www.e-control.at/industrie/oeko-energie/stromkennzeichnung>.
- EnergieSchweiz, Bundesamt für Energie BFE. (2017). *Graue Energie von Neubauten Ratgeber für Baufachleute*.
- Flohr, F. (2019). D4.1 Thermophysikalische Stoffwerte gebräuchlicher Kältemittel. In P. Stephan, D. Mewes, S. Kabelac, K. Schaber, & T. Wetzel (Hrsg.), *VDI Wärmeatlas* (12. Auflage, S. 511–530). Springer Reference Technik (). Springer Vieweg.
https://doi.org/10.1007/978-3-662-52991-1_22-1
- Fraunhofer Institut. (2022). *Photovoltaics Report*.
- Frey, H. (2019). *Energieautarke Gebäude*. Springer-Verlag GmbH Deutschland.
- Frischknecht, R. (1999). *Umweltrelevanz natürlicher Kältemittel—Ökobilanzen von Wärmepumpen und Kälteanlagen, Bern*.
- Frischknecht, R. (2005). *Methoden der Umweltbewertung technischer Systeme Teil 1: Ökobilanzen (Life cycle assessment, LCA)*.
- Frischknecht, R., Itten, R., Wyss, F., Blanc, I., Heath, G. A., Raugei, M., Sinha, P., & Wade, A. (2015). *Life Cycle Assessment of Future Photovoltaic Electricity Production from Residential-scale Systems Operated in Europe* (NREL/TP-6A20-73849, 1561524).
<https://doi.org/10.2172/1561524>
- Frischknecht, R., Stolz, P., Heath, G., Raugei, M., Sinha, P., & de Wild-Scholten, M. (2020). *Methodology Guidelines on Life Cycle Assessment of Photovoltaic 2020*. IEA PVPS TCP.
- Fritsche, U. R., & Greß, H.-W. (2019). *Der nichterneuerbare kumulierte Energieverbrauch und THG Emissionen des deutschen Strommix im Jahr 2018 sowie Ausblicke auf 2020 bis 2050*. HEA - Fachgemeinschaft für effiziente Energieanwendung e.V.

- Goedkoop, M., Heijungs, R., & Huijbregts, M. (2009). Report I: Characterisation. *ReCiPe 2008*, 133.
- Gugerli, H., Frischknecht, R., Kasser, U., & Lenzlinger, M. (2008). *Merkblatt SIA 2032: Graue Energie im Fokus*. 8.
- Heck, T. (2007). *Wärmepumpen*. In: Dones, R. (Ed.) et al., *Sachbilanzen von Energiesystemen: Grundlagen für den ökologischen Vergleich von Energiesystemen in Ökobilanzen für die Schweiz. Final Report ecoinvent No. 6-X*. Paul Scherrer Institut Villigen, Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf, CH. www.ecoinvent.ch
- Heider, J., Conrad, N., Stark, T., Abdulganiev, A., Kosack, P., & Wagner, A.-K. (2020). *Forschungsprojekt „IR-Bau“ Potenzial von Infrarot-Heizsystemen für hocheffiziente Wohngebäude Projektabschlussbericht: Stand: 02/2020* (S. 214) [Projektabschlussbericht].
- Hengstler, J., Russ, M., Stoffregen, A., Hendrich, A., Held, D. M., & Briem, A.-K. (2021). *Aktualisierung und Bewertung der Ökobilanzen von Windenergie- und Photovoltaikanlagen unter Berücksichtigung aktueller Technologieentwicklungen* (S. 392). Umweltbundesamt. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/5750/publikationen/2021-05-06_cc_35-2021_oekobilanzen_windenergie_photovoltaik.pdf
- Hwang, Y., Ferreira, C. I., & Piao, C. C. (2016). *Guideline for Life Cycle Climate Performance*. International Institute of Refrigeration.
- IBO - Österreichisches Institut für Bauen und Ökologie GmbH. (2016). *Oekoindex 3—Anwendung: Grundlagen, Berechnungsergebnisse, Optimierung*.
- Johnson, E. P. (2011). Air-source heat pump carbon footprints: HFC impacts and comparison to other heat sources. *Energy Policy*, 39(3), 1369–1381.
- Jungbluth, N., Stucki, M., Flury, K., Frischknecht, R., & Büsser, S. (2012). *Life Cycle Inventories of Photovoltaics*. ESU-services Ltd., fair consulting in sustainability.

- Jungbluth, N., Stucki, M., Frischknecht, R., & Buesser, S. (2010). *Photovoltaics*. In *Dones, R. (Ed.) et al., Sachbilanzen von Energiesystemen: Grundlagen für den ökologischen Vergleich von Energiesystemen und den Einbezug von Energiesystemen in Ökobilanzen für die Schweiz*. ecoinvent report No. 6-XII, ESU-services Ltd, Uster, CH, 2010.
- Kamel, R. S., & Fung, A. S. (2014). Modeling, simulation and feasibility analysis of residential BIPV/T+ASHP system in cold climate—Canada. *Energy and Buildings*, 82. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.07.081>
- KBOB/ecobau/IPB-Empfehlung 2009/1:2016. (2016). *Liste Ökobilanzen im Baubereich 2009-1-2016-gerundet MJ*. https://www.kbob.admin.ch/kbob/de/home/themen-leistungen/nachhaltiges-bauen/oekobilanzdaten_baubereich.html
- Klingler, M., Kasser, U., Savi, D., Primas, A., Stettler, Y., & Gujer, P. (2014). *Ökobilanzdaten für Lüftungs- und Wärmeanlagen* [Schlussbericht]. Bundesamt für Energie, CH-3003 Bern.
- Kranzl, S. (2018). *TREIBHAUSGASEMISSIONEN VON STROM-Empfehlungen zur Ökobilanzierung*. Umweltbundesamt. <https://www.umweltbundesamt.at/fileadmin/site/publikationen/rep0654.pdf>
- Krutzler, T., Zechmeister, A., Stranner, G., Wiesenberger, H., Gallauner, T., Gössl, M., Heller, C., Heinfellner, H., Ibesich, N., Lichtblau, G., Schieder, W., Schneider, J., Schindler, I., Storch, A., & Winter, R. (2017). *ENERGIE- UND TREIBHAUSGAS-SZENARIEN IM HINBLICK AUF 2030 UND 2050* [Synthesebericht]. Umweltbundesamt.
- Lin, H., Clavreul, J., Jeandaux, C., Crawley, J., & Butnar, I. (2021). Environmental life cycle assessment of heating systems in the UK: Comparative assessment of hybrid heat pumps vs. condensing gas boilers. *Energy and Buildings*, 240, 110865. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.110865>

- Litjens, G. B. M. A., Worrell, E., & van Sark, W. G. J. H. M. (2018). Lowering greenhouse gas emissions in the built environment by combining ground source heat pumps, photovoltaics and battery storage. *Energy and Buildings*, 180, 51–71.
<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.09.026>
- „Mission2030 – Die Klima- und Energiestrategie der österreichischen Bundesregierung“; *Parlamentarische Enquete des Nationalrates (Stenographisches Protokoll)*. (2018). Republik Österreich - Parlament. https://www.parlament.gv.at/PAKT/VHG/XXVI/III/III_00145/fname_695844.pdf
- myPV. (2022a). <https://www.my-pv.com/de/prinzip/power-coach>.
- myPV. (2022b). *MyPV - Markus Gundendorfer Information zu den verbauten Heizungen*.
- OIB-Richtlinie 6. (2019). *Energieeinsparung und Wärmeschutz*.
- ÖKOBAUDAT. (2021). *Oekobaudat.de*. Deutsches Bundesministerium des Innern, für Bau und Heimat. <https://www.oekobaudat.de/service/downloads.html>
- ÖNORM EN 15804. (2022). *Nachhaltigkeit von Bauwerken—Umweltproduktdeklarationen—Grundregeln für die Produktkategorie Bauprodukte*. Austrian Standards International.
- ÖNORM EN ISO 14040. (2021). *Umweltmanagement—Ökobilanz: Grundsätze und Rahmenbedingungen*. Austrian Standards International.
- ÖNORM EN ISO 14044. (2021). *Umweltmanagement—Ökobilanz—Anforderungen und Anleitungen*. Austrian Standards International.
- Roßkopf, T. (2017). Ermittlung monatlicher Konversionsfaktoren für den Energieträger Strom. *economicum Themenband Session 6 vom 5. 10. 2017*. https://www.energieinstitut.at/pdfviewer/economicum_themenband-6/
- Saoud, A., Harajli, H., & Manneh, R. (2021). Cradle-to-grave life cycle assessment of an air to water heat pump: Case study for the Lebanese context and comparison with solar

- and conventional electric water heaters for residential application. *Journal of Building Engineering*, 44, 103253. <https://doi.org/10.1016/j.job.2021.103253>
- Schlömer, S., Bruckner, T., Fulton, L., Hertwich, E., McKinnon, A., Percyk, D., Roy, J., Schaeffer, R., Sims, R., Smith, P., & Wiser, R. (2014). *Annex III: Technology-specific cost and performance parameters*. In: *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Edenhofer, O., R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, E. Farahani, S. Kadner, K. Seyboth, A. Adler, I. Baum, S. Brunner, P. Eickemeier, B. Kriemann, J. Savolainen, S. Schlömer, C. von Stechow, T. Zwickel and J.C. Minx (eds.)]*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Sušnik, M. (2019). *Vermarktung und Verwendung von fluorierten Gasen: Spezielle Regeln für Wärmepumpen, Kühl- und Klimatechnik, den Brandschutz und elektrische Schaltanlagen*. Wirtschaftskammer Österreich.
- Thyholt, M., & Hestnes, A. G. (2008). Heat supply to low-energy buildings in district heating areas Analyses of CO2 emissions and electricity supply security. *Energy and Buildings*, 9.
- treeze.ch. (2022). *Transportrechner* https://treeze.ch/fileadmin/user_upload/calculators/KBOB_Rechner/transport.html.
- Vering, C., Schwarz, D., Stefaniak, P., Venzik, V., & Müller, D. (2022). Kältemittel in Wärmepumpen für die Gebäudeheizung: Ökologische Auswirkungen im gesamten Lebenszyklus. *Chemie Ingenieur Technik*, 94(4), 542–554.
<https://doi.org/10.1002/cite.202100016>

- Weißberger, M. N. (2016). *Lebenszyklusorientierte Analyse der ökologischen Eigenschaften von Niedrigstenergiewohngebäuden unter besonderer Berücksichtigung der Gebäudetechnik* (S. 228) [mediaTUM - Dokumenten- und Publikationsserver der Technischen Universität München; PDF]. <https://doi.org/10.14459/2016MD1325463>
- Zahoransky, R., Allelein, H.-J., Bollin, E., Schelling, U., Schwarz, H., Wörsdorfer, D., Fichter, C., Allmendinger, F., Degler, D., & Kettner, M. (2022). *Energietechnik Systeme zur konventionellen und erneuerbaren Energieumwandlung. Kompaktwissen für Studium und Beruf* (9. Auflage). Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH.

Wärmepumpenheizung		Elektrische Fußbodenheizung mit PV-Anlage																		
Nutzung	Herstellung	PENRT																		
		WP 11	WP 12	WP 13	WP 14	WP 15	WP 16	WP 17	WP 18	WP 19	PV 11	PV 12	PV 13	PV 14	PV 15	PV 16	PV 17	PV 18	PV 19	
Kältemittelverlust Stromverbrauch Heizung Wartung Stromverbrauch Warmwasser Haushaltsstrom	Leckageverlust Befüllung	8.416	8.416	8.416	8.416	8.416	8.416	8.416	8.416	8.416	8.416	8.416	8.416	8.416	8.416	8.416	16.261	16.261	16.261	
	Warmwasserbereitung	3.717	3.717	3.717	3.717	3.717	3.717	3.717	3.717	3.717	3.717	3.717	3.717	3.717	3.717	3.717	3.717	3.717	3.717	3.717
	Wärmeabgabe	18.450	18.450	18.450	18.450	18.450	18.450	18.450	18.450	18.450	18.450	18.450	18.450	18.450	18.450	18.450	18.450	18.450	18.450	18.450
		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		729.292	364.646	364.646	182.323	364.646	182.323	364.646	182.323	364.646	182.323	364.646	182.323	364.646	182.323	364.646	729.292	1.093.937	729.292	
		273.725	273.725	136.863	136.863	136.863	136.863	136.863	136.863	136.863	136.863	136.863	136.863	136.863	136.863	136.863	1.437.749	1.437.749	1.437.749	
		284.712	284.712	142.356	142.356	142.356	142.356	142.356	142.356	142.356	142.356	142.356	142.356	142.356	142.356	142.356	284.712	284.712	284.712	
		337.320	337.320	168.660	168.660	168.660	168.660	168.660	168.660	168.660	168.660	168.660	168.660	168.660	168.660	168.660	337.320	337.320	337.320	
		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		139.230	69.615	139.230	69.615	139.230	69.615	139.230	69.615	139.230	69.615	139.230	69.615	139.230	69.615	139.230	139.230	208.845	139.230	
		14.063	14.063	14.063	14.063	14.063	14.063	14.063	14.063	14.063	14.063	14.063	14.063	14.063	14.063	14.063	18.750	18.750	18.750	
		3.717	3.717	3.717	3.717	3.717	3.717	3.717	3.717	3.717	3.717	3.717	3.717	3.717	3.717	3.717	3.717	3.717	3.717	

