EBP

carbotech
Umweltprojekte und Beratung

Bericht

Ökologische Bewertung von Heizsystemen

Verfasser
Fredy Dinkel, Thomas Kägi, Carbotech AG, Basel
Christoph Hauser, Dr. Sabine Perch-Nielsen, EBP Schweiz AG, Zürich

Anzahl Seiten: 63
Basel und Zürich, 13. 03. 2020

Carbotech AG
Postfach, CH-4002 Basel
www.carbotech.ch

EBP Schweiz AG
Zollikerstrasse 65
CH-8702 Zollikon

Impressum

Auftraggeber
VSG und FOGA

Auftragnehmer und Verfasser
Fredy Dinkel, Thomas Kägi, Carbotech AG, Zürich
Christoph Hauser, Dr. Sabine Perch-Nielsen, EBP Schweiz AG, Zürich

Projektleitung
Dr. Fredy Dinkel, Carbotech AG

Begleitgruppe
Hans Christian Angele, VSG
Hubert Palla, VSG
Bettina Bordonet, SVGW
Matthias Hafner, SVGW
Manuel Pauli, Energie 360°
Deborah Sägesser, Kanton Basel-Landschaft
Thomas Peyer, Swisspower

Review
Norbert Egli, Tridee GmbH

–
Dieser Bericht wurde von der Carbotech AG und EBP mit Sorgfalt erarbeitet unter Verwendung aller uns zur Verfügung stehenden, aktuellen und angemessenen Hilfsmittel und Grundlagen, dies im Rahmen der vertraglichen Abmachung mit dem Auftraggeber unter Berücksichtigung der Vereinbarung bezüglich eingesetzter Ressourcen. Die Grundlagen der Bewertungsmethode und Datengrundlagen, auf welcher dieser Bericht basiert, können ändern. Danach sind die Schlussfolgerungen nicht mehr uneingeschränkt gültig und vom Auftraggeber nur noch auf eigene Verantwortung verwendbar. Aus dem Inhalt dieses Berichtes hervorgehende Veröffentlichungen, welche Resultate und Schlussfolgerungen daraus nur teilweise und nicht im Sinne des Gesamtberichtes darstellen, sind nicht erlaubt. Insbesondere dürfen solche Veröffentlichungen diesen Bericht nicht als Quelle angeben oder es darf nicht anderweitig eine Verbindung mit diesem Bericht oder den Autoren und deren Organisationen hergestellt werden können.

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung 4

1 Ausganglage 12

2 Zielsetzung und Rahmenbedingungen 13
2.1 Ziele 13
2.2 Zielgruppe 13
2.3 Untersuchte Systeme 14
2.4 Wichtige Annahmen und Anpassungen 16
2.4.1 Strommix 16
2.4.2 Biogasinventare 18
2.4.3 Wärmepumpen 19
2.4.4 Heizölsysteme 19
2.4.5 Allokationen 19

3 Vorgehen und Methodik 22
3.1 Generelles Vorgehen 22
3.2 Externer Review 22
3.3 Begleitgruppe 22
3.4 Ökobilanzierung 22
3.5 Grenzen der Studie 24
3.5.1 Inhaltliche Grenzen 24
3.5.2 Formale Grenzen 24

4 Resultate und Diskussion 25
4.1 Einfamilienhaus und Mehrfamilienhaus Altbauten 25
4.2 Neubau-Areal 29
4.3 Sensitivitätsanalysen 32
4.3.1 Einfluss Sanierungsstandard 32
4.3.2 Einfluss Strommix 32
4.3.3 Einfluss Anteil erneuerbare Brennstoffe 34
4.3.4 Einfluss Allokationsmethode beim BHKW 36
4.3.5 Einfluss der Allokation bei der Verwertung bzw. Entsorgung 39

5 Schlussfolgerungen 42

6 Literatur 45

A1 Steckbriefe 1

A2 Hintergründe zur Ökobilanzierung 6
A2.1 Vorgehen bei der Ökobilanzierung 6
A2.2 Zielsetzung und Rahmenbedingungen 7
A2.3 Sachbilanz 7
A2.4 Wirkbilanz 9
A2.5 Unsicherheiten und Signifikanz 11

A3 Reviewbericht 12

A4 Stellungnahmen von Mitgliedern der Begleitgruppe 16
A4.1 Stellungnahme von Energie 360° AG 16
A4.2 Stellungnahme Lufthygieneamt beider Basel 17

Glossar und Abkürzungen

ARA	Abwasser-Reinigungs-Anlage
BAFU	Bundesamt für Umwelt der Schweiz
BHKW	Block-Heiz-Kraftwerk oder auch Wärmekraftkopplung genannt
Brennwert	Der Brennwert (oder oberer Heizwert) gibt an wieviel Energie in Form von Wärme bei der Verbrennung eines Stoffes gewonnen werden kann, wenn durch Kondensation die im Wasserdampf enthaltene Energie ebenfalls genutzt wird. Er ist ein Maß für die spezifisch in einem Stoff enthaltene chemisch gebundene Energie und ist somit höher als der Heizwert.
CML	Institute of Environmental Sciences (CML) der Universität von Leiden. Dieses Institut hat in den letzten 30 Jahren wesentliche Beiträge zur Entwicklung der Ökobilanz geleistet, z. B. die Entwicklung der wirkungsorientierten Bewertungsmethode
Ecoinvent	Internationale Datenbank mit tausenden von Ökoinventaren
EFH	Einfamilienhaus
Emissionsfrachten	Schadstoffausstoss im betrachteten Gebiet (z.B. für die Luft: Schweiz, für das Wasser: Einzugsgebiet eines Flusses, z.B. Rhein)
ENTSO-E	European Network of Transmission System Operators for Electricity: Europäischer Verband in der alle Übertragungsnetzbetreiber Pflichtmitglied sind.
Exergie	Exergie bezeichnet den Teil der Gesamtenergie eines Systems, der Arbeit verrichten kann, wenn dieses in das thermodynamische (thermische, mechanische und chemische) Gleichgewicht mit seiner Umgebung gebracht wird. Exergie ist ein Potential zwischen mindestens zwei Zuständen, wobei einer davon meist der Umgebungszustand ist. Die Exergie ist im Gegensatz zur Energie keine Erhaltungsgröße.
FE	Funktionelle Einheit
FKW	Fluorierte Kohlenwasserstoffe. Synthetische Stoffe, welche meistens einen hohen spezifischen Beitrag zur Klimaerwärmung leisten.
FOEN	Englische Abkürzung für das BAFU
Funktionelle Einheit	Bezugsgrösse, auf die sich ein Vergleich oder eine Analyse bezieht. Widerspiegelt die Funktion des Produktes.
GEAK	Gebäudeenergieausweis der Kantone. Der Gebäudeenergieaus GEAK® zeigt auf, wie viel Energie ein Gebäude im Normbetrieb benötigt.
GWP	Global Warming Potential: Treibhauspotential
Heizwert	Der Heizwert (oder unterer Heizwert) gibt an wieviel Energie in Form von Wärme bei der Verbrennung eines Stoffes gewonnen werden kann, ohne Kondensation des Wasserdampfes. Entsprechend ist der Heizwert tiefer als der Brennwert eines Stoffes.
ILCD	Wirkungsorientierte Bewertungsmethode des Joint Research Centre der European Commission, 2012, neben der Berechnung der Wirkpotentiale gibt sie verschiedene Vorschläge, wie die verschiedenen Wirkungen zu einer Kennzahl zusammengefasst werden können.
Impact 2002+	Die IMPACT 2002+ Methode ist eine wirkungsorientierte Bewertungsmethode, welche die Umweltwirkungen in vier Schadenskategorien aggregiert und diese anschliessend zu einer Kennzahl gewichtet.

IPCC	Intergovernmental Panel of Climate Change: UN Gremium, welches sich mit der Klimaveränderung befasst.
ISO 14'040 ff	Normen über die Erstellung von Ökobilanzen
JAZ	Jahresarbeitszahl. Mit dieser wird gemessen, wieviel Wärme über das ganze Jahr mit einer bestimmten Menge an Elektrizität bereitgestellt werden kann. Die JAZ ist das Verhältnis von Wärmeenergie Output zu elektrischer Energie Input.
KBOB	Koordinationskonferenz der Bau- und Liegenschaftsorgane der öffentlichen Bauherren. Diese Organisation stellt u.a. Ökobilanzdaten zur Verfügung.
KEA	Kumulierter Energie Aufwand: Summe der benötigten energetischen Ressourcen über den Lebensweg eines Produktes oder einer Dienstleistung
KVA	Kehrichtverbrennungsanlage
kWh	Einheit der Energie. 1 kWh = 3.6 MJ
LCA	Life Cycle Assessment: Ökobilanz oder Lebenszyklusanalyse
LCC	Life Cycle Costing: Analyse der Kosten über den gesamten Lebensweg eines Produktes oder einer Dienstleistung zur Ermittlung der Total Cost of Ownership (TCO)
Methode der ökologischen Knappheit 2013	Totalaggregierende Bewertungsmethode, bei der die bereits bestehende Belastung in einem Gebiet sowie die umweltpolitischen Zielsetzungen berücksichtigt werden, Ergebnis: Umweltbelastungspunkte (UBP). Als Gewichtungsfaktor der einzelnen Substanzen wird die ökologische Knappheit verwendet, d. h. das Verhältnis zwischen der heutigen Emissionsfracht in der Schweiz und der maximal tolerablen Fracht (kritischer Fluss). (BUWAL 1990 bzw. Braunschweig et al. 1993, überarbeitet im Auftrag des BAFU in den Jahren 1997, 2006 und 2013).
MFH	Mehrfamilienhaus
MöK	Methode der ökologischen Knappheit
MuKEn 2014	Die Mustervorschriften der Kantone im Energiebereich sind ein von den Kantonen gemeinsam erarbeitetes «Gesamtpaket» energierechtlicher Mustervorschriften im Gebäudebereich.
Öko-Effizienz	Setzt ökologische und ökonomische Kennzahlen in ein gleichgewichtetes Verhältnis: z. B. drückt sich die Öko-Effizienz von Massnahmen als Umweltnutzen pro Kosten aus.
Ökoinventar	Enthält sämtliche umweltrelevanten, quantitativen Angaben eines Produktes, Prozesses oder einer Dienstleistung in Form von Inputs und Outputs.
ökologische Knappheit:	Relation zwischen Belastbarkeit einer Umweltressource (z. B. Luftemission, Eisenerz) und der heutigen Belastung (BUWAL 1990, bzw. BAFU 2006 und 2013)
PV	Photovoltaik
ReCiPe	Gesamtaggregierende Bewertungsmethode, Es handelt sich dabei um eine Weiterentwicklung der Methode Eco-indicator 99.
Sachbilanz:	Darstellung von Stoffflüssen und Energieverbräuchen in physikalischen Grössen
Single score Methode	Bewertungsmethode, welche die Gesamtumweltbelastung in einem Indikator abbildet (z. B. Methode der ökologischen Knappheit, Impact 2002+, ILCD, ReCiPe)
TYNDP	Ten-Year Network Development Plan: 10 Jahres Entwicklungsplan der ENTSO-E zum Stromnetzwerk in Europa
UBP	Umweltbelastungspunkte ist die Einheit in der die Resultate der Methode der ökologischen Knappheit angegeben werden.
Umweltbelastungspunkt	UBP: siehe UBP sowie Methode der ökologischen Knappheit
Umweltfussabdruck	Synonym für Gesamtumweltbelastung
VSG	Verband der Schweizerischen Gasindustrie

Wirkbilanz:	Im Rahmen der Wirkbilanz werden die Ergebnisse der Sachbilanz hinsichtlich bestimmter Wirkungen auf die Umwelt, wie z. B. Treibhaus- oder Ozonbildungspotential, beurteilt. Dies geschieht mit Gewichtungsfaktoren als Bestandteil eines Gewichtungsmodells.
Wirkung	Auswirkung durch Emissionen oder die Nutzung von Ressourcen auf die Umwelt
WP	Wärmepumpe

Zusammenfassung

Die Energieversorgung ist im Umbruch und besonders im Gebäudebereich sind grosse Veränderungen im Gange. Damit rücken neue Heizsystem und Kombinationen in den Vordergrund und es besteht Bedarf für aktuelle Grundlagen zu den Umweltauswirkungen und deren Bewertung. Der Umweltfussabdruck verschiedener Heizsysteme sowie die Wirksamkeit unterschiedlicher Verbesserungsmassnahmen (Integration von solaren Komponenten, Einsatz biogener Energieträger etc.) wurde mit der Methode der Ökobilanz (LCA) ermittelt und miteinander verglichen. Der ökologische Vergleich der verschiedenen Heizsysteme erfolgte pro 1 kWh Wärme am Ausgang des Energiewandlers (Nutzenergie).

Der Fokus bei der Auswahl der Heizsysteme liegt auf den Standardlösungen, die gemäss den Mustervorschriften der Kantone im Energiebereich (MuKEn 2014) zur Erfüllung der Vorschriften beim Wärmeerzeugungsersatz eingesetzt werden können (Modul F) und zudem auf der Lösung Biogas. Diese Systeme werden für Einfamilienhäuser (EFH) und Mehrfamilienhäuser (MFH) sowie für die Beheizung ganzer Areale betrachtet. In der Untersuchung wurden die Rahmenbedingungen in der Schweiz betrachtet. Die relevanten Kennzahlen der Heizsysteme wurden auf die heutige Situation hin aktualisiert und ein Ausblick auf die Zukunft gegeben. Die Auswirkungen der Emissionen und des Ressourcenbedarfs wurden mit verschiedenen umfassenden Methoden, welche die verschiedenen Umweltauswirkungen gewichten und zu einer Kennzahl zusammenfassen, berechnet. Dabei wurde die Methode der ökologischen Knappheit 2013 (MöK) als Hauptmethode verwendet. Die anderen gesamtaggregierenden Methoden ILCD und Impact 2002+ wurden verwendet, um abzuklären, ob sich mit einer anderen Bewertung unterschiedliche Schlussfolgerungen ergeben. Zusätzlich zu diesen Methoden wurden die Auswirkungen auf das Klima berechnet und separat ausgewiesen.

Resultate

Alle drei betrachteten gesamtaggregierenden Methoden zeigen ein vergleichbares Bild, mit Ausnahme der Holzfeuerungen, welche bei der Methode ILCD auf Grund der Partikelemissionen schlechter bewertet werden als mit den anderen Methoden. Die Diskussion der Resultate basiert im Wesentlichen auf den Ergebnissen der MöK. Aus einer gesamt ökologischen Sicht, welche Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit, die Ökosysteme, das Klima wie auch die Ressourcen berücksichtigt, lassen sich die untersuchten Heizungssysteme (Standardvarianten und Varianten mit erneuerbaren Energieträgern) in drei Klassen einteilen, siehe Abbildung 1.

In die **Klasse mit geringen Belastungen**[1] gehören die folgenden Heizungssysteme:

- Fernwärme ab KVA
- BHKW mit der Allokation nach Exergie
- Fernwärme CH mix, mit Zertifikat 100 % erneuerbar
- Gasfeuerungen mit 100 % Biogas aus Abfällen und Reststoffen
- BHKW mit 100 % Biogas
- Hybridheizung: 100 % Biogas und Wärmepumpe
- Wärmepumpen, welche mit Ökostrom betrieben werden

Zu beachten ist, dass

- die Fernwärme wie auch die Gasfeuerung mit 100 % Biogas nur begrenzt ausbaufähig und nur dort verfügbar sind, wo die entsprechenden Infrastrukturen, Fernwärme- oder Gasnetz, bestehen.
- Wärme ab BHKW so gut abschneidet, weil bei der Allokation nach Exergie der Hauptteil der Belastungen dem Strom angerechnet wird, welcher in dem Falle eine höhere Belastung als Netzstrom hat.

[1] Umweltauswirkungen < 30 % des Heizsystems mit der höchsten Umweltbelastung (Ölheizung 2017)

Bei einem **Fokus auf das Klima** gehören zusätzlich noch die Holzfeuerungen und die Wärmepumpen mit heutigem Netzstrom zu den besten Systemen. Dafür gehört das BHKW nur dann in diese Klasse, wenn mindesten 30 % Biogas zum Einsatz kommt.

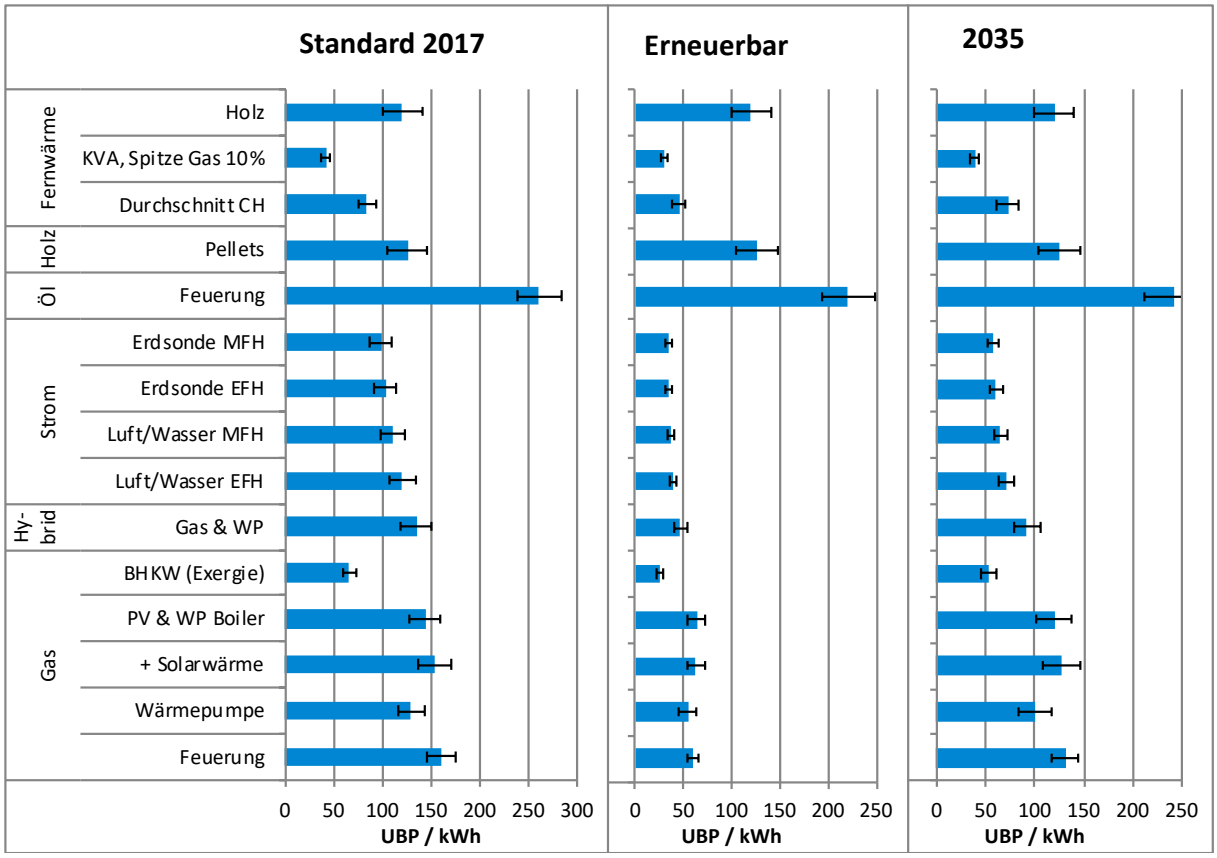

Abbildung 1: Umweltfussabdruck verschiedener Heizsysteme für EFH/MFH gemäss der Methode der ökologischen Knappheit 2013

Bei den Varianten Erneuerbar wurde für die gasbasierten Heizsysteme mit 100 % Biogas und bei den strombasierten Heizsystemen mit erneuerbarem Strommix gerechnet. Bei der Ölheizung wurden 20 % Bioöl aus Abfällen angenommen.
Bei den Varianten 2035 wurde für die gasbasierten Heizsysteme mit 30 % Biogasanteil und bei den strombasierten Heizsystemen mit dem prognostizierten Strommix 2035 gerechnet. Bei der Ölheizung wurden 10 % Bioöl angenommen.
Eine Unterscheidung zwischen EFH und MFH wurde nur für die WP gemacht, bei den anderen Systemen sind die Unterschiede zu gering.

Im **Mittelfeld**[2] befinden sich die folgenden Systeme:

- Wärmepumpen, welche mit heutigem Netzstrom betrieben werden
- Fernwärme, Durchschnitt CH
- Fernwärme, ab Holzfeuerung
- Holzfeuerungen
- Erdgas-Wärmepumpen
- Erdgasfeuerungen, wenn diese einen Biogasanteil von 30 % haben, wie dies für 2035 geplant ist.

[2] Umweltauswirkungen > 30 % und < 50 % des Heizsystems mit der höchsten Umweltbelastung (Ölheizung 2017)

Die Umweltauswirkungen der Wärmepumpen sind im Wesentlichen von den zwei Faktoren JAZ und Art der Strombereitstellung bestimmt. Bei einer höheren JAZ, wie diese Erdsonden-WP aufweisen, sinken die Umweltauswirkungen. Ebenso ergibt sich eine Reduktion der Umweltauswirkungen, wenn Gas oder andere Heizungen mit Solarwärme oder WP-Boiler mit PV-Strom kombiniert werden.

Bei einem **Fokus auf das Klima** gehören nur die folgenden Systeme in diese Klasse:

- BHKW
- Hybridheizung: Wärmepumpe & Gas
- Fernwärme, Durchschnitt CH
- Gas-Wärmepumpe mit 30 % Biogas Anteil
- Erdgasfeuerung mit einem Biogasanteil von 30 %, kombiniert mit einem PV&WP-Boiler

In die **Klasse mit den höchsten Belastungen** zählen die Ölheizungen, auch wenn diese 20 % biogene Öle aus Reststoffen und Abfällen verwenden (Ölfeuerung Zertifikat). Ebenfalls in diese Klasse gehören die Gasfeuerungen, welche mit 100 % Erdgas betrieben werden, obwohl deren Umweltauswirkungen rund 40 % geringer sind als diejenigen der Ölheizungen.

Beim Fokus auf das Klima fällt auch Gasfeuerung mit 30 % Biogas in die Klasse mit den höchsten Belastungen.

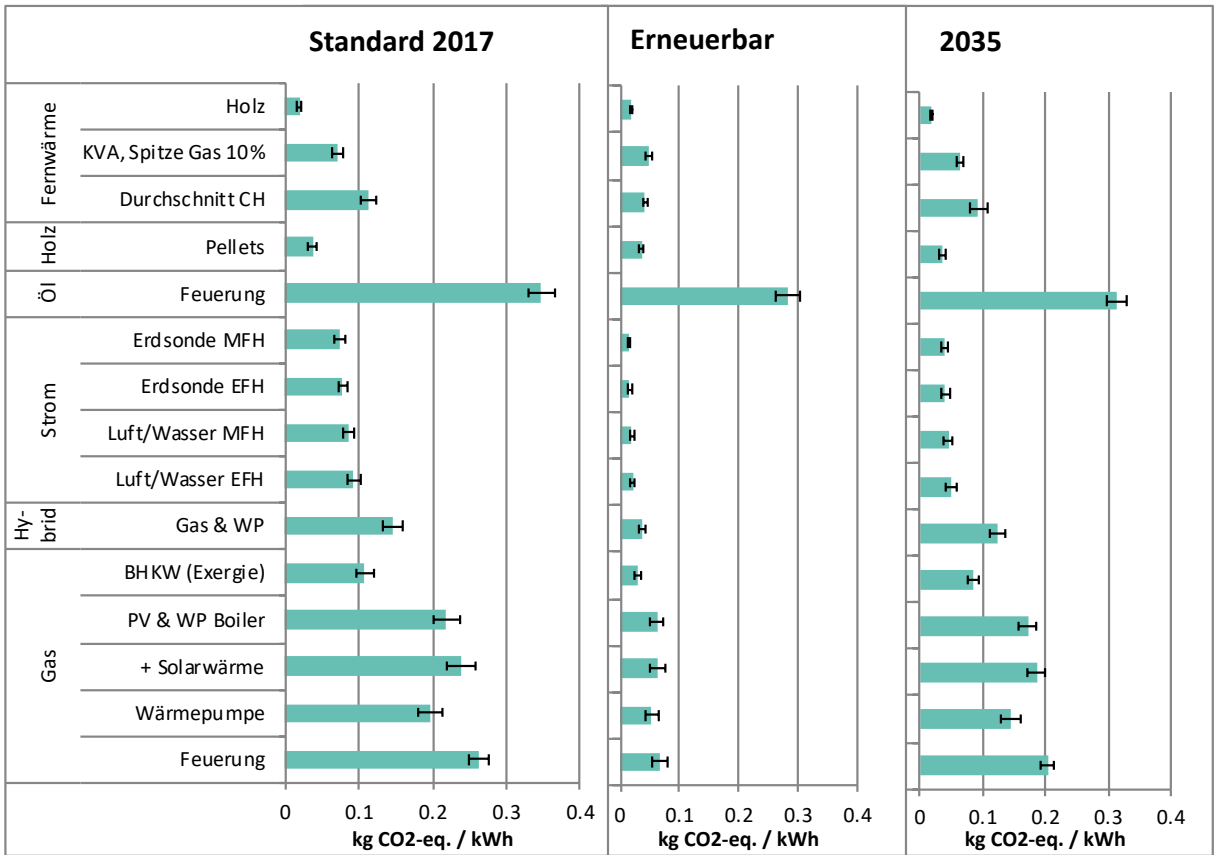

Abbildung 2: CO_2-Fussabdruck verschiedener Heizsysteme für EFH/MFH gemäss der Methode IPCC 2013, 100a
Bei den Varianten Erneuerbar wurde für die gasbasierten Heizsysteme mit 100 % Biogas und bei den strombasierten Heizsystemen mit erneuerbarem Strommix gerechnet. Bei der Ölheizung wurden 20 % Bioöl aus Abfällen angenommen.
Bei den Varianten 2035 wurde für die gasbasierten Heizsysteme mit 30 % Biogasanteil und bei den strombasierten Heizsystemen mit dem prognostizierten Strommix 2035 gerechnet. Bei der Ölheizung wurde 10 % Bioöl angenommen.

Bei den untersuchten **Heizsystemen für Areale** zeigt die Fernwärme (KVA mit Gasspitze) die geringsten Umweltauswirkungen, gefolgt von der Grundwasser-WP und der Wärme ab BHKW mit der Allokation Exergie. Holzschnitzel-Heizungen und Erdgas-Heizungen mit 30 % Biogas haben im Rahmen der Unsicherheiten vergleichbare Belastungen, welche fast doppelt so gross sind wie das Heizsystem Grundwasser-WP. Die reine Erdgas-Heizung weist die höchsten Auswirkungen auf.

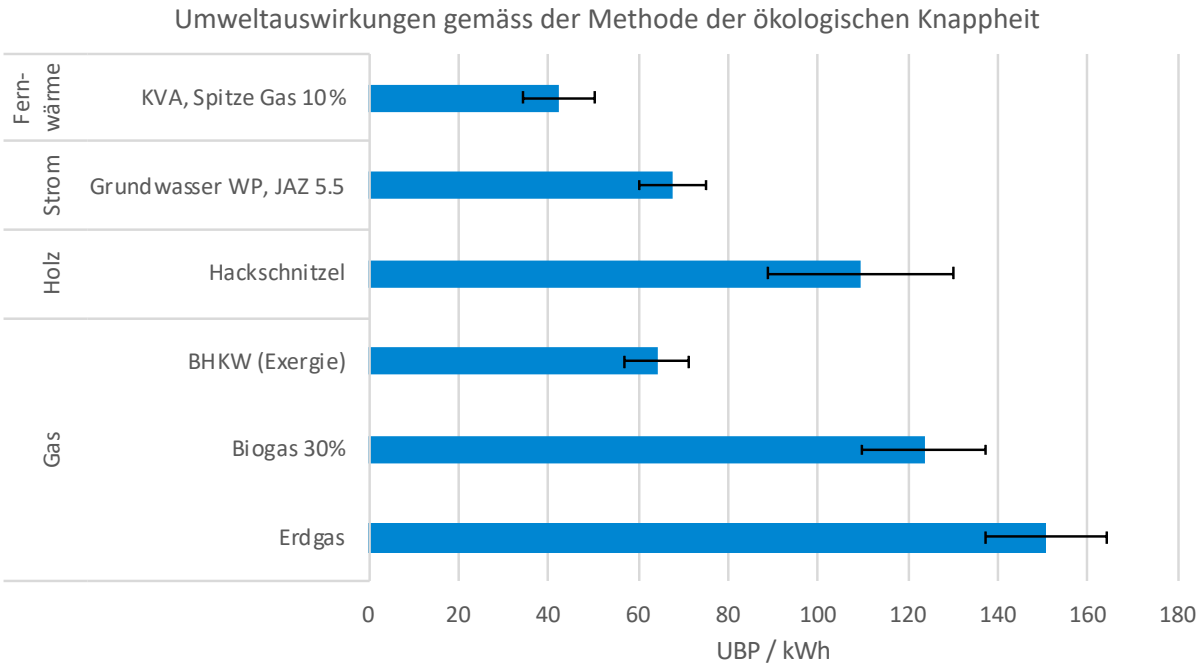

Abbildung 3: Umweltfussabdruck verschiedener Heizsysteme Stand 2017 für Areale gemäss der Methode der ökologischen Knappheit 2013.

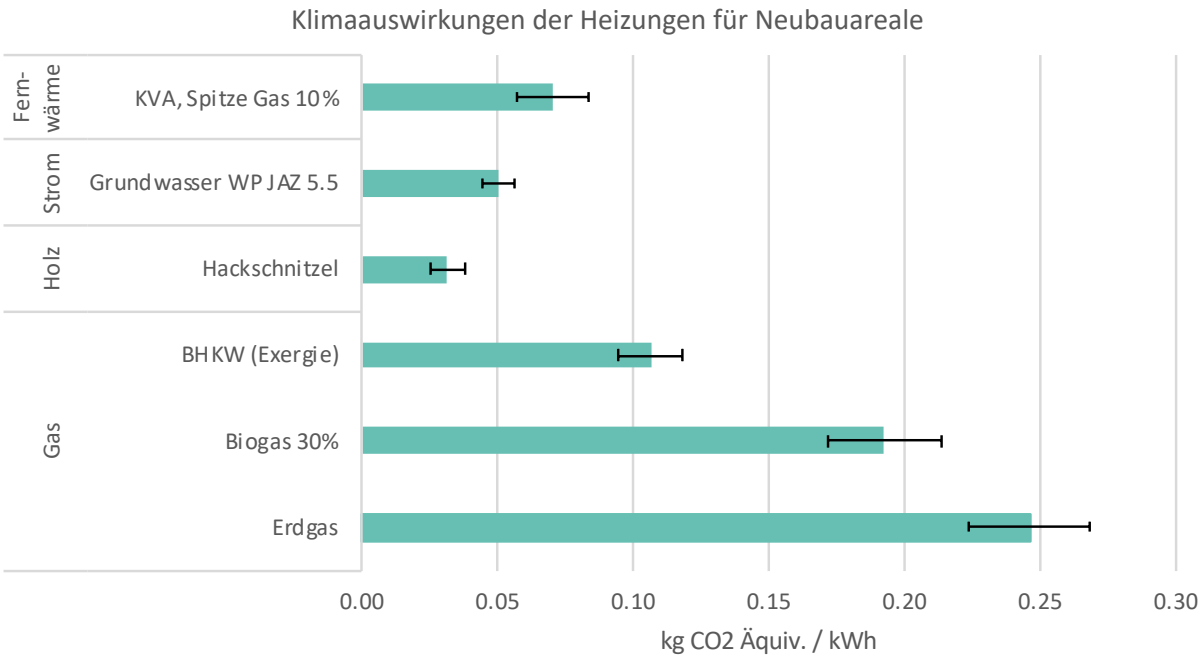

Abbildung 4: CO_2-Fussabdruck verschiedener Heizsysteme Stand 2017 für Areale gemäss IPCC 2013, 100a.

Bei der **Fokussierung auf das Klima**, siehe **Abbildung 4**, hat die Holzschnitzel-Feuerung die geringsten Auswirkungen, gefolgt von der Grundwasser-WP und der Fernwärme. Wesentlich grössere Umweltauswirkungen haben die Erdgas-Feuerungen. In der Mitte befindet sich das Erdgas-BHKW mit der Allokation nach Exergie.

2035: Zu erwartende Optimierungspotentiale

Sensitivitätsrechnungen haben folgende Optimierungspotentiale bis 2035 gezeigt:

- WP werden in Zukunft geringere Umweltauswirkungen haben, falls der politische Wille und die internationalen Verpflichtungen umgesetzt werden und damit die Strombereitstellung dann mit geringeren Umweltauswirkungen verbunden sein wird. Schon heute können mit der Wahl eines ökologischen Stromproduktes die Umweltauswirkungen von WP markant reduziert werden.
- Zudem ist zu erwarten, dass in Zukunft die JAZ von WP weiter erhöht werden und sich dadurch die Umweltauswirkungen reduzieren.
- Die Analyse der besten Biogasanlage der Schweiz zeigte, dass hier noch Optimierungspotential besteht. Inwiefern beim Zubau von Biogasanlagen diese Optimierungsmassnahmen umgesetzt werden können, wurde nicht weiter untersucht.
- Ziel des VSG ist es bis 2030 einen Biogasanteil von 30 % im gasversorgten Wärmemarkt für Haushalte zu erreichen, was zu einer entsprechenden Reduktion der Umweltauswirkungen führt.
- Eine Sanierung der Gebäudehülle führt, neben dem wesentlichen Nutzen des geringeren Bedarfs an Wärmeenergie, bei den WP-Systemen zudem zu einer Reduktion von rund 10 % der Umweltauswirkungen, da die Vorlauftemperatur gesenkt werden kann.

Gemäss Aussage von Heizungsherstellern ist bei den fossilen Feuerungssystemen nicht mit wesentlichen Verbesserungen zu rechnen. Die Wirkungsgrade sind schon sehr hoch und die Emissionen weitgehend optimiert. Bei der nichtkonventionellen Gewinnung von Öl und Gas ist zudem mit erhöhten Umweltbelastungen aus der Vorkette zu rechnen. Der Frage, wie hoch der Anteil an Öl aus Ölschiefer oder Ölsand in Zukunft sein wird und wie sich dies auf die Gesamtbilanz auswirkt, wurde nicht nachgegangen.

Ausblick

Die vorliegende Studie ermöglicht eine Einordnung der unterschiedlichen Heizungssysteme aus ökologischer Sicht. Jedoch kann nicht jedes dieser Systeme überall realisiert werden. Hinderungsgründe können die Verfügbarkeit von Infrastruktur, wie Fernwärme- oder Gasnetze, sein wie auch das Potential von Rohstoffen zur Bereitstellung von Energieträgern wie Abfälle und Reststoffe sowie Holz. Zudem ist es nicht überall möglich Grundwasser-WP zu installieren.

In diesem Zusammenhang wäre die Kombination einer Potentialstudie mit den Ergebnissen dieser Ökobilanz interessant. Damit könnte das Potential für die Zukunft ermittelt werden, welches als Basis für die Energiestrategie dienen kann.

1 Ausganglage

Aktuell wird im Rahmen der Revision des CO_2-Gesetzes auf nationaler Ebene intensiv diskutiert, unter welchen Bedingungen Gebäude in Zukunft noch mit fossil betriebenen Wärmeerzeugern beheizt werden können. Auf kantonaler Ebene werden mit der Umsetzung der MuKEn 2014 in ihren Energiegesetzen wichtige Rahmenbedingungen für den Einsatz fossil betriebener Heizsysteme gesetzt. Zudem wollen auch immer mehr Besitzer von Gebäuden ihre Liegenschaften mit einem Heizsystem ausrüsten, welches geringe Umweltbelastungen verursacht. Entsprechend ist die Energieversorgung im Umbruch und besonders im Gebäudebereich sind grosse Veränderungen im Gange. Damit rücken neue Heizsysteme und Kombinationen in den Vordergrund und es besteht Bedarf für aktuelle Grundlagen zu den Umweltauswirkungen der verschiedenen Optionen.

In diesem Zusammenhang ist es für den VSG notwendig zu wissen, wie Wärmeerzeugung mit Gas im Vergleich zu anderen Systemen der Wärmebereitstellung aus ökologischer Sicht steht. Dazu ist es notwendig teilweise ältere Daten zu überarbeiten und entsprechend zu aktualisieren. Insbesondere bei der Bewertung der ökologischen Auswirkungen von Biogas gibt es sehr viele unterschiedliche und sich teilweise widersprechende Informationen. Hier besteht der Bedarf nach einer vertieften Prüfung und Konsolidierung des aktuellen Wissens. Dieses soll anschliessend in Ökobilanzinventare einfliessen.

Bei dieser Bewertung ist es wichtig, nicht nur einzelne Gebäude zu betrachten, sondern auch gebäudeübergreifende Systeme einzubeziehen, da sich diese aus Effizienzgründen für gasbetriebene Systeme anbieten. Mit dieser Studie sollen die Grundlagen geschaffen werden, um Strategien daraus abzuleiten und in der politischen Diskussion über wissenschaftlich fundierte Argumente zu verfügen, welche helfen, den Diskurs auf einer sachlichen Ebene zu führen.

Aufbau des Berichtes

Um den Bericht möglichst kurz und lesbar zu halten, werden die Hintergrundinformationen, wie technische Details der Heizsysteme oder allgemeine methodische Hintergründe, im Anhang dargestellt.
Im Hauptbericht werden in Kapitel 2 die für die Fragestellung dieses Projektes spezifischen Ziele und Rahmenbedingungen zusammengestellt. In Kapitel 3 wird das Vorgehen beschrieben und in Kapitel 4 werden die Resultate dargestellt.

2 Zielsetzung und Rahmenbedingungen

Auf der Basis der in Kapitel 1 beschriebenen Ausgangslage wurden die Ziele der Studie festgelegt und im folgenden Kapitel 2.1 beschrieben. Anschliessend werden in den folgenden Unterkapiteln die allgemeinen Rahmenbedingungen, wie die Definition der untersuchten Systeme oder die gemachten Annahmen dargestellt.

2.1 Ziele

Der Umweltfussabdruck verschiedener Heizsysteme sowie der Einfluss unterschiedlicher Verbesserungsmassnahmen (Integration von solaren Komponenten, Einsatz biogener Energieträger etc.) soll mit einer Ökobilanz (LCA) ermittelt und miteinander verglichen werden. Das Vorgehen bei der Erstellung einer Ökobilanz wird im Anhang beschrieben, siehe Anhang A2.

Ein Vergleich der verschiedenen Heizsysteme kann nicht absolut erfolgen, sondern nur in Bezug auf die Erfüllung der gleichen Funktion. Diese Bezugsgrösse wird in der Ökobilanzierung als funktionelle Einheit (FE) bezeichnet.
Der ökologische Vergleich der verschiedenen Heizsysteme erfolgt pro 1 kWh Wärme am Ausgang des Energiewandlers (Nutzenergie). Entsprechend ist die funktionelle Einheit:

1 kWh Wärme am Ausgang des Energiewandlers (Nutzenergie)

2.2 Zielgruppe

Die Studie richtet sich in erster Linie an den Auftraggeber. Die Erkenntnisse aus der vorliegenden Studie sollen zudem einen sachorientierten Dialog über die ökologischen Auswirkungen der untersuchten, aktuellen Heizsysteme fördern. Entsprechend ist eine weitere Zielgruppe die interessierte Öffentlichkeit.

2.3 Untersuchte Systeme

Betrachtete Heizsysteme

Der Fokus der Heizsysteme liegt auf den Standardlösungen, die gemäss den Mustervorschriften der Kantone im Energiebereich (MuKEn 2014) zur Erfüllung der Vorschriften beim Wärmeerzeugungsersatz eingesetzt werden können (Modul F). Diese Standardlösungen wurden mit den Möglichkeiten Biogas und biogene Öle ergänzt. Konkret werden in bestehenden Ein- und Mehrfamilienhäusern folgende Heizsysteme betrachtet:

- Gas-Brennwertheizung (mit reinem Erdgas, mit 30 % Biogas und 100 % Biogas)
- Gas-Wärmepumpe
- Gas-Brennwertheizung mit Solarwärme-Anlage
- Gas-Brennwertheizung mit Photovoltaik und Wärmepumpen-Boiler
- Blockheizkraftwerk
- Hybridheizung Gas und Wärmepumpe
- Luft/Wasser-Wärmepumpe
- Erdsonden-Wärmepumpe
- Öl-Brennwertheizung (mit reinem Heizöl und mit 20 % biogene Öle)
- Pellet-Feuerung
- Fernwärme mit Wärme aus der Kehrichtverbrennung (KVA) und einer Spitzendeckung von ca. 10 % Gas
- Fernwärme mit Wärme aus Hackschnitzeln
- Fernwärme Durchschnittsdaten Schweiz

Im Neubau-Areal werden folgende Heizsysteme betrachtet:

- Gasfeuerung (mit reinem Erdgas und mit 30 % Biogas) [3]
- Holzfeuerung mit Hackschnitzeln
- Blockheizkraftwerk
- Wärmepumpe mit Grundwasser

Angaben zu den Heizsystemen finden sich in den Steckbriefen im Anhang A1.

Betrachtete Gebäude

Zur Abschätzung des Wärmebedarfs, der durch die Heizsysteme gedeckt werden soll, müssen Annahmen zu den Gebäuden getroffen werden. Der Fokus wird bei Einzelgebäuden (Ein- und Mehrfamilienhäuser) auf unsanierte oder kaum sanierte Altbauten gelegt. Bei Neubauten wird ein Areal betrachtet. Die Details sind in Tabelle 1 zusammengestellt.

[3] Inwiefern die rein fossilen Heizsysteme Erdgas und Erdöl den gesetzlichen Anforderungen der MuKEn genügen, war nicht Gegenstand dieser Studie. Gemäss MuKEn dürfen diese z.B. dann eingesetzt werden, wenn die Gebäudehülle definierten Anforderungen entspricht, bzw. die Gebäudehülle entsprechend saniert wird. Ungeachtet dessen wurden diese Systeme gerechnet und dargestellt.

Tabelle 1: Annahmen zu den betrachteten Gebäuden

Einfamilienhaus Bestand	Standardannahmen — unsanierter Altbau, der Gebäuden in den GEAK Gebäudehülle Klassen E, F und G entsprechen soll — 160 m² Energiebezugsfläche — 140 kWh/m² Nutzenergie für Raumwärme und Warmwasser — Referenz-Feuerungsleistung fossil von 9 kW Sensitivität — sanierter Altbau, der einer GEAK Gebäudehülle Klasse D entsprechen soll — 100 kWh/m² Nutzenergie für Raumwärme und Warmwasser — Referenz-Feuerungsleistung fossil von 7.5 kW
Mehrfamilienhaus Bestand	Standardannahmen — unsanierter Altbau, der Gebäuden in den GEAK Gebäudehülle Klassen E, F und G entsprechen soll — 620 m² Energiebezugsfläche — 100 kWh/m² Nutzenergie für Raumwärme und Warmwasser — Referenz-Feuerungsleistung fossil von 28 kW Sensitivität — sanierter Altbau, der einer GEAK Gebäudehülle Klasse D entsprechen soll — 80 kWh/m² Nutzenergie für Raumwärme und Warmwasser — Referenz-Feuerungsleistung fossil von 21 kW
Areal Neubauten	— Neubau-Areal von 40'000 m² Energiebezugsfläche — 45 kWh/m² Nutzenergie für Raumwärme und Warmwasser — Referenz-Feuerungsleistung fossil von 950 kW

Geografische und zeitliche Systemgrenze

Der Fokus liegt auf den heute (2019) in der Schweiz verfügbaren Heizsystemen (Standardlösungen). In der Szenarien-Analyse wird auch die prognostizierte Schweizer Situation im Jahr 2035 betrachtet.

Inhaltliche Systemgrenze für die Ökobilanz

Für die betrachteten Systeme wurde der gesamte Lebenszyklus betrachtet. Insbesondere wurde nebst der eigentlichen Nutzungsphase auch die gesamte Vorkette der Energieträger, die Herstellung der Heizsysteme sowie die finale Entsorgung der Heizsysteme mitberücksichtigt.

Nicht berücksichtigt wurde die Herstellung oder der Rückbau der betrachteten Gebäude, da der Vergleich der Heizsysteme jeweils für das gleiche Gebäudesetting durchgeführt wurde und die Herstellung oder der Rückbau des Gebäudes für den Vergleich für alle gleich angenommen wird. Entsprechend wurden auch keine Massnahmen zur Reduktion des Energiebedarfs betrachtet. Nicht weil diese unwesentlich sind, ganz im Gegenteil handelt es sich dabei um sehr relevante Massnahmen zur Reduktion der Umweltauswirkungen, sondern weil dies nicht dem Ziel der Studie entspricht und solche Massnahmen ganz unabhängig vom Heizsystem realisiert werden müssen.

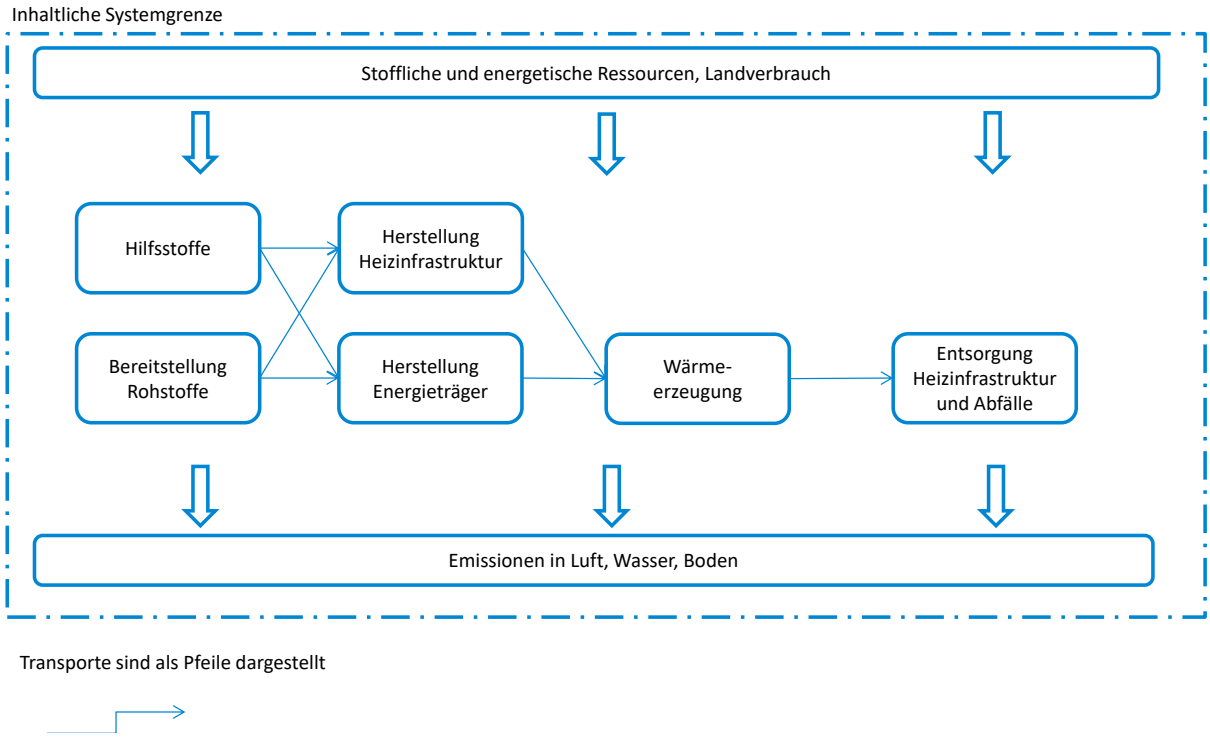

Abbildung 5: Systemgrenze der Heizsysteme für die Ökobilanz

2.4 Wichtige Annahmen und Anpassungen

2.4.1 Strommix

Bei strombasierten Heizsystemen wie Wärmepumpen hat die Zusammensetzung des Strommix einen grossen Einfluss auf die Umweltauswirkung der Systeme. Im Rahmen der Sensitivitätsanalysen wurden daher drei verschiedene Strommixe untersucht, siehe auch:

- Strommix 2017
- Erneuerbarer Strom
- Strommix 2035

Methode zur Ermittlung der Strommixe

Wärmepumpen verbrauchen im Winter deutlich mehr Strom als im Sommer. Da die verschiedenen Stromerzeugungstechnologien unterschiedlich über das Jahr verteilt produzieren, wurde für alle drei Strommixe eine «Wärmepumpen-Verteilung» berechnet. Dazu wurden separate Winter- und Sommerhalbjahr-Strommixe ermittelt und entsprechend dem jahreszeitlichen Bedarf unterschiedlich gewichtet: 22 % Sommermix und 78 % Wintermix. Diese Gewichtung ergibt sich aus den folgenden Annahmen: Ein angenommener Heizwärmebedarf von 60 kWh/m² wird gemäss SIA 2028 nach den monatlichen Heizgradtagen auf die Monate verteilt. Zusätzlich werden 15 kWh/m² Warmwasserbedarf über alle Monate gleich verteilt angenommene.

Strommix 2017: Beim «Strommix 2017» handelt es sich um einen Schweizer Konsumentenmix auf Basis der historischen monatlichen Nettostromerzeugung in der Schweiz unter Berücksichtigung der monatlichen Importe (EU-Strommix). Dabei fliessen die Importe proportional in die Berechnung ein. Wenn in einem Beispielmonat die Nettostromerzeugung in der Schweiz 5'000 GWh beträgt und sich die monatlichen Importe auf 2'500 GWh belaufen, enthält der Schweizer Konsumentenmix in diesem Monat 2/3 Nettostromerzeugung Schweiz und 1/3 EU-Strommix (Importe). Bei den Importen werden alle Importe berücksichtigt und nicht die Netto-Importe (Importe minus Exporte). Exportiert wird folglich der Schweizer Konsumentenmix.
Die Nettostromerzeugung ergibt sich aus der monatlichen Bruttostromerzeugung aller Schweizer Kraftwerke abzüglich des Verbrauchs der Speicherpumpen in der Schweiz (Basisjahr 2017). Anhand der Monatswerte der Elektrizitätsbilanz der Schweiz sowie der Schweizerischen Statistik für erneuerbare Energien sowie der Statistik zur thermischen Stromproduktion wurde die Nettostromerzeugung auf die folgenden Energieträger aufgeteilt: Photovoltaik, Biomasse, Wind, KVA (erneuerbar), Biogas (ARA), Wasserkraft, Kernkraft, KVA (nicht erneuerbar), Öl und Erdgas.

Der EU-Strommix basiert auf den historischen monatlichen Produktionsdaten aller europäischen Länder in der ENTSO-E exklusive der Schweiz und liegen aufgeteilt auf die oben aufgeführten Energieträger vor (Basisjahr 2015). Die Gewichtung der Länder erfolgte proportional zu ihrer Stromerzeugung.

Erneuerbarer Strom: Der «Erneuerbare Strom» entspricht der erneuerbaren Nettostromerzeugung in der Schweiz ohne Berücksichtigung der Importe. Die Aufteilung auf die Energieträger bezieht sich auf das Jahr 2017.
Strommix 2035: Der «Strommix 2035» ist ebenfalls ein Schweizer Konsumentenmix mit Annahmen zur künftigen Nettostromerzeugung in der Schweiz, zu Importen und zum zukünftigen EU-Strommix. Für die Schweiz wurde die folgende Bruttostromerzeugung im Jahr 2035 angenommen (gemäss ENTSO-E 10-year network development plan TYNDP, Szenario «Sustainable Transition»; Durchschnitt der Jahre 2030 und 2040):

- Biomasse: 3.4 TWh
- Kernkraft: 3.7 TWh
- KVA (erneuerbar): 1.1 TWh
- KVA (nicht erneuerbar): 3.4 TWh
- Photovoltaik: 7.1 TWh
- Wasserkraft: 35.8 TWh
- Wind: 1.2 TWh

Die Höhe des Strombedarfs wurde mit 63 TWh angenommen (gemäss Energieperspektiven Szenario «politische Massnahmen»). Der Pumpenverbrauch der Pumpspeicher-Kraftwerke orientiert sich am historischen Verhältnis zur Bruttoerzeugung und wurde mit 3.8 TWh geschätzt. Daraus ergaben sich Netto-Importe (Stromverbrauch minus Nettostromerzeugung) in der Höhe von 11 TWh und folglich jährliche Importe in der Höhe von 32 TWh (historisches Verhältnis bezüglich Importe und Netto-Importe) im Jahr 2035. Der künftige EU-Strommix für das Jahr 2035 berechnet sich aus den offiziellen Szenarien aller Länder, welche als Basis für die künftige europäische Netzplanung international kommuniziert wurden (ENTSO-E 10-year network development plan TYNDP). Das Jahr 2035 wurde als Mittelwert des Jahres 2030 (Szenario EUCO) und des Jahres 2040 (Szenario «Sustainable Transition») berechnet.
Zu beachten ist, dass die EFH- und MFH-Bewohner gebundene Kunden sind und damit im Durchschnitt einen saubereren Strommix beziehen als die durchschnittlichen Schweizer Konsumenten, welche auch die Grossverbraucher der Industrie beinhalten, die ihren Stromanbieter frei wählen können.

Tabelle 2: Zusammensetzung CH-Strommix für Wärmepumpen

	CH Konsumentenmix						Wärmepumpen CH-Mix	
Stromerzeugung	**Jahr**		**Winter**		**Sommer**		**Jahr**	
	heute	2035	heute	2035	heute	2035	heute	2035
Biomasse	1.9%	5.9%	2.3%	6.6%	1.4%	4.7%	2.1%	6.2%
Biogas (ARA)	0.1%	0.0%	0.1%	0.0%	0.1%	0.0%	0.13%	0.0%
Braunkohle	4.1%	0.8%	5.0%	1.2%	3.2%	0.1%	4.6%	1.0%
Gas	5.7%	6.6%	7.3%	10.5%	4.0%	0.4%	6.5%	8.3%
Geothermie	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
Kernkraft	29.2%	10.0%	29.1%	12.6%	29.4%	5.6%	29.2%	11.1%
KVA (erneuerbar)	1.3%	1.3%	1.5%	1.2%	1.1%	1.5%	1.4%	1.3%
KVA (n. erneuerbar)	1.2%	4.0%	1.4%	3.8%	1.0%	4.5%	1.3%	3.9%
Öl	0.4%	0.2%	0.5%	0.3%	0.3%	0.0%	0.4%	0.2%
Photovoltaik	2.8%	12.2%	1.7%	6.9%	3.8%	17.7%	2.2%	9.3%
Steinkohle	5.0%	2.0%	6.4%	3.1%	3.6%	0.1%	5.7%	2.4%
Wasserkraft	42.4%	45.2%	37.1%	35.2%	48.1%	63.1%	39.6%	41.5%
Wind	3.6%	10.1%	4.9%	16.0%	2.3%	2.2%	4.3%	12.9%
Andere	2.1%	1.4%	2.6%	2.1%	1.5%	0.1%	2.4%	1.6%
Andere Erneuerbare	0.2%	0.3%	0.3%	0.4%	0.2%	0.0%	0.2%	0.3%
Summe	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%

2.4.2 Biogasinventare

Diverse Biogasinventare in ecoinvent und KBOB mussten aufgrund alter Datengrundlage insbesondere hinsichtlich der Methanschlüpfe und der Zusammenstellung der Biogasanlagen aktualisiert werden. Diese Anpassungen sind in einem separaten Bericht (Kägi u. a., 2019) dokumentiert, welcher auch als Grundlage für die Aktualisierung der Werte in ecoinvent und KBOB dienen. Die wichtigsten Informationen werden hier kurz dargestellt.

Zusammensetzung Biogasherstellung

Die jährliche Energiemenge, die mit Biogas zur Wärmeversorgung erzeugt wurde, betrug im Jahre 2018 366 GWh (Hafner, 2019). Den größten Anteil hatte Biogas aus Klärschlamm (223 GWh), gefolgt von Biogas aus biogenen Abfällen (137 GWh). Biogas aus landwirtschaftlichen Abfällen macht mit 5 GWh nur einen kleinen Teil des gesamten Energiebedarfs zur Wärmeerzeugung aus. Bei den Reinigungstechnologien wurde 2018 das meiste Biogas mit Aminwäsche behandelt (203 GWh), gefolgt von der Membrantechnologie (93 GWh) und der PSA-Technologie (55 GWh). 14 GWh werden anderweitig verarbeitet.

Methanschlüpfe Biogasaufbereitung

Gemäss Hafner (2019) haben die verschiedenen Aufbereitungstechnologien die folgenden durchschnittlichen Methanschlüpfe:

PSA-Technologie: 1.25 %
Aminwäsche: 0.06 %
Membrantechnologie: 0.064 %

Indirekte Auswirkungen bei landwirtschaftlichem Biogas

Die Co-Vergärung von Gülle hat neben der Gewinnung von Biogas eine Veränderung der Gülle zur Folge, so dass diese nach der Vergärung eine bessere Pflanzenverfügbarkeit aufweist. Dieser positive Aspekt ist jedoch

mit höheren Ammoniakemissionen bei der Düngung verbunden. Im ursprünglichen Inventar wird die, aufgrund des besser verfügbaren Stickstoffs im Gärsubstrat, zu erwartende Mehremission an Ammoniak bei der Gärsubstratausbringung mittels Güllefass mitberücksichtigt. Gemäss Ökostrom Schweiz verpflichten sich alle Bauern, das Gärsubstrat mittels Schleppschlauchverfahren auszubringen. Somit liegen die zu erwartenden Mehremissionen an Ammoniak rund 30 % tiefer.
Eine weitere Konsequenz der landwirtschaftlichen Biogasanlagen besteht darin, dass die Verwendung von Gülle und Mist in einer Biogasanlage eine Reduktion der Methanemissionen bei der Gülle und Mistlagerung auf dem Hof zur Folge hat. Diese werden in ecoinvent nicht dem Biogasprozess als Gutschrift zugeordnet, da es eine indirekte Konsequenz des Biogasprozesses ist. Die Autoren dieser Studie sind der Ansicht, dass neben den zusätzlichen Ammoniakemissionen auch die Reduktion der Methanemissionen berücksichtigt werden sollen. Eine andere Möglichkeit wäre, dass beide Auswirkungen nicht dem Biogasprozess, sondern den vor und nachgelagerten Prozessen zugeordnet werden sollen. Da die Diskussion in der Begleitgruppe zu keiner Einigung geführt hat, wurde der Prozess entsprechend ecoinvent modelliert. Da die landwirtschaftlichen Biogasanlagen zur Wärmebereitstellung mit Biogas weniger als 2 % ausmachen, hat dies auf die Resultate dieser Studie keinen Einfluss. Dennoch sollte diesem Problem in einer Untersuchung nachgegangen werden, da es für andere Fragestellungen relevant sein kann.

Optimierte Biogasanlage

Bei der Variante „optimierte Biogasanlage“ handelt es sich um eine Best case-Analyse, in der Daten eines Klärwerks in Solothurn verwendet wurden, welches Strom und Wärme der danebenliegenden KVA nutzt und ihre Abluft in die KVA zurückführt.

2.4.3 Wärmepumpen

Bei den Wärmepumpen wurden die JAZ und die Art und Verluste der Kältemittel aktualisiert. Die Kältemittelverluste haben sich gemäss Angaben aus der letztjährigen FKW-Erhebung (FOEN, 2018) gegenüber den in den ecoinvent Inventaren hinterlegten Werten halbiert.

2.4.4 Heizölsysteme

In dieser Studie wurden die heutigen konventionellen Bereitstellungsmethoden abgebildet ohne Ölsand oder Ölschiefer. In Zukunft ist zu erwarten, dass ein gewisser Anteil von Öl aus Ölschiefer oder Ölsand bereitgestellt wird. Dies wird mit höheren Umweltauswirkungen in der Erdölkette verbunden sein.

2.4.5 Allokationen

Allokationen sind immer dann notwendig, wenn das untersuchte System unterschiedliche Funktionen erfüllt, auf welche die Umweltauswirkungen des Systems aufgeteilt werden müssen. Bei den meisten der untersuchten Heizsysteme ist keine Allokation notwendig, da diese genau eine Funktion erfüllen, die Bereitstellung einer bestimmten Wärmemenge. Bei den folgenden Prozessen waren Allokationen notwendig:

- Wärmebereitstellung mit einem BHKW
- Verwertungs- und Entsorgungssysteme von Reststoffen und Abfällen

Für Allokationen in den Vorketten, wie z.B. Raffination von Erdöl, welche eine Vielzahl von Produkten von Bitumen bis Naphtha bereitstellen, wurden die Allokationen der betreffenden ecoinvent-Prozesse übernommen.

2.4.5.1 Allokation bei BHKW

Im Gegensatz zu den anderen untersuchten Wärmeerzeugungssystemen, welche nur Wärme bereitstellen, produziert ein BHKW neben der Wärme auch Strom. Damit stellt sich die Frage, wie die gesamten Umweltauswirkungen eines BHKW, durch die Bereitstellung der Energieträger, der Emissionen bei der Verbrennung

sowie der Herstellung, dem Unterhalt und der Verwertung der Infrastruktur, auf die beiden Produkte Wärme und Strom aufgeteilt werden sollen. Bei BHKW üblich ist die Allokation nach Exergie. Sie bietet den Vorteil, dass die Aufteilung auf physikalischen Gesetzen basiert und somit nicht von den aktuellen Umständen, wie Marktpreise oder heutige Zusammensetzung des Strommarktes abhängig ist. Zudem berücksichtigt sie die höhere Wertigkeit des Stromes im Vergleich zur Wärme. Diese Allokationsform führt dazu, dass die Wärme relativ gut abschneidet, während der Strom stark belastet wird. In der Begleitgruppe wurde die zu verwendende Allokation diskutiert. Diese Diskussion hat gezeigt, dass die geeignete Allokation wesentlich davon abhängt, welche Fragestellung beantwortet werden soll. Entsprechend kann die geeignete Allokation anders sein, wenn politische Massnahmen im Fokus stehen als bei der individuellen Perspektive des Heizungsersatzes. Für die Fragestellung des individuellen Heizsystemersatzes wurde die Allokation nach Exergie als sinnvoll erachtet, da sie auf physikalischen Grundlagen beruht. Daher wurde diese Allokationsart in der Standardauswertung verwendet.
Dabei stellt sich jedoch die berechtigte Frage, ob Strom ab BHKW mit einer Umweltbelastung, welche wesentlich höher ist als der heutige Strommix, in Zukunft noch einen Absatz findet respektive, ob zukünftig BHKWs gebaut werden, mit dem Hauptziel Strom bereitzustellen. Im Zusammenhang mit einer Politikberatung, ist die Allokation nach Substitution die geeignete Form. Da sie dem politischen Willen Rechnung trägt, die CO_2-Belastung zu reduzieren und damit auch definiert, wenn auch indirekt, wieviel CO_2-Emissionen, bzw. Umweltauswirkungen eine kWh Strom zu einem gewissen Zeitpunkt noch verursachen darf. Die Allokation nach Substitution zeigt, wieviel Umweltauswirkungen der Wärmebereitstellung verbleiben, wenn der Strom des BHKW die Umweltziele des Bundes einhält. Um auch dieser Betrachtungsweise Rechnung zu tragen, wurde als Sensitivität eine Allokation nach dem Substitutionsprinzip gerechnet. Dabei wurde angenommen, dass die erzeugte Elektrizität den für WP adäquaten Strommix ersetzt, siehe Kapitel 4.3.4.

2.4.5.2 Allokation bei Verwertungs- und Entsorgungssystemen

Diese Art von Allokation war notwendig beim Prozess «Fernwärme ab KVA» sowie beim Prozess «Biogas aus biogenen Reststoffen».
Neben dem Auftrag Abfälle mit möglichst geringen Auswirkungen auf die Umwelt zu entsorgen, müssen heutige KVAs die Abwärme soweit möglich nutzen. Das heisst, eine KVA bietet drei Funktionen an: Abfallentsorgung, Wärme- und Strombereitstellung. Im Rahmen dieses Projektes sind die folgenden beiden Allokationsarten sinnvoll:

- **Cut-Off:**
  Diese Allokationsart stützt sich auf die primäre gesetzliche Aufgabe der KVA, welche darin besteht, Abfälle, welche nicht verwertet werden können, mit möglichst geringen Umweltauswirkungen zu entsorgen. Ökobilanziell endet damit der Lebensweg eines Produktes, das nicht verwertet wird. Die entstehende Wärme gehört zu einem neuen Lebensweg, falls diese genutzt wird, und somit ist die Abwärme lastfrei, da die Emissionen der Verbrennung dem zu entsorgenden Produkt zugewiesen wurden. Der Fernwärme bzw. dem generierten Strom werden nur die Aufwände für die Umwandlung von Abwärme in Strom bzw. Nutzwärme und deren Verteilung angelastet.
- **Allokation nach Aufteilung**
  Bei dieser Allokation werden die Umweltauswirkungen nach physikalischen oder ökonomischen Kriterien auf die verschiedenen Funktionen verteilt. Da die Entsorgungsdienstleistung und Energiebereitstellung nicht dieselbe physikalische Einheit haben, kommt im Gegensatz z. B. zur Allokation beim BHKW nur die ökonomische Allokation in Frage.

Im Rahmen dieses Projektes wurde für Biogas aus biogenen Abfällen eine ökonomische Allokation durchgeführt, bei der 18 % zu Lasten des Biogases geht und 82 % zu Lasten der Entsorgungsdienstleistung. Die Auswirkungen der Biogasherstellung aus Klärschlamm und Gülle wurde vollständig dem Biogas zugewiesen, da

es dabei nicht um einen Entsorgungsprozess handelt, sondern um eine zusätzliche Behandlung. Siehe dazu auch (Kägi u. a., 2019).

Auf Grund der Tatsache, dass es heute vorgeschrieben ist, die Abwärme einer KVA zu nutzen und um dieselbe Allokationsart wie beim Biogas aus biogenen Abfällen anzuwenden, wurde für die Abwärme aus der KVA ebenfalls eine ökonomische Allokation durchgeführt. Dabei wird 80.6 % der Entsorgung, 7.8 % der Wärme und 11.6 % dem Strom zugewiesen (Dinkel u. a., 2018). Die Diskussion mit dem Reviewer ergab, dass dies neben der Cut-Off Methode, welche vom BAFU für die KVA bevorzugt wird, ebenfalls eine mögliche und für die Fragestellung dieser Studie sinnvolle Allokation darstellt. Mit einer Sensitivitätsanalyse wird in Kapitel 4.3.5 geprüft, wie stark sich diese Allokation auf die Resultate auswirkt und ob sich bei einer Allokation nach Cut-Off andere Schlussfolgerungen ergeben würden.

3 Vorgehen und Methodik

In diesem Kapitel wird das in diesem Projekt verwendete Vorgehen beschrieben. Die allgemeinen Hintergründe sind im Anhang zusammengestellt, bzw. es wird auf die entsprechende Literatur verwiesen.

3.1 Generelles Vorgehen

In einen Workshop mit dem Auftraggeber wurden die zu analysierenden Heizsysteme besprochen und festgelegt
Die Studie wurde unter Einbezug einer Begleitgruppe aus Fachleuten der öffentlichen Hand sowie aus der Energie und Heizungsbranche durchgeführt. Dazu fanden zwei Sitzungen mit der Begleitgruppe statt. Eine Sitzung fand zu Beginn der Studie statt. An dieser wurden die Systeme sowie die Rahmenbedingungen der Ökobilanz besprochen.
Anschliessend wurden die Datengrundlagen aktualisiert und ausgewertet. Die Daten sowie das Vorgehen zur Analyse wurde von einem Reviewteam überprüft. In der zweiten Sitzung mit der Begleitgruppe wurden die Resultate diskutiert.

3.2 Externer Review

Die Studie wurde einem Critical Review, angelehnt an ISO 14'040/44 (2006a, b), unterzogen. Das Review wurde studienbegleitend von Norbert Egli, Tridee GmbH durchgeführt.
Der Bericht des Reviewers ist in Anhang 3 dargestellt.

Als weitere Gutachter für spezifische Detailfragen wurden beigezogen:

- M. Rauen von Viessmann für die Emissionswerte und Zweitmeinung zu Wirkungsgraden
- M. Pauli von Energie 360° für die Begutachtung der Biogasketten
- V. Anspach von Ökostrom Schweiz für die Biogasherstellung landwirtschaftlicher Anlagen

3.3 Begleitgruppe

Um die Arbeiten möglichst breit abstützen und zusätzliches Expertenwissen einbinden zu können, wurde eine Begleitgruppe gebildet. Sie setzte sich aus den an der Thematik interessierten Stakeholdern zusammen. Die Begleitgruppe traf sich an zwei halbtägigen Workshops und ihre Anregungen wurden diskutiert und entsprechend berücksichtigt.
Einige der Beteiligten haben Stellungnahmen zum vorliegenden Bericht abgegeben. Diese Stellungnahmen sind in Anhang 4 dargestellt.

3.4 Ökobilanzierung

Die Lebenszyklusanalyse oder Ökobilanz ist heute anerkanntermassen die umfassendste und aussagekräftigste Methode, um die Umweltauswirkungen von Produkten und Systemen zu beurteilen (siehe auch Abbildung 6). Bei der Ökobilanzierung werden die Emissionen in Boden, Wasser und Luft sowie der Ressourcenbedarf über den gesamten Lebenszyklus eines Produktes, eines Systems oder einer Dienstleistung erfasst und

deren Auswirkungen auf die Umwelt berechnet und teilweise zu einer Kennzahl zusammengefasst. Im Rahmen dieses Projekts wurden die Umweltauswirkungen daher mit der Methode der Ökobilanz (Life Cycle Assessment, LCA) modelliert. Dabei richtete sich das Vorgehen im Wesentlichen nach der Norm ISO 14'040/44 Norm (ISO 14'040 2006) (ISO 14'044 2006). Bezüglich der Verwendung von gesamtaggregierenden Bewertungsmethoden, wie dies die Umweltbelastungspunkte (UBP) sind, ist die Studie nicht in Übereinstimmung mit der Norm.

Die verschiedenen Heizsysteme wurden pro kWh Nutzenergie für ein jeweils genau definiertes Gebäudesetting verglichen, siehe dazu Kapitel 2.3.

In der Untersuchung wurden die Rahmenbedingungen in der Schweiz betrachtet. Die relevanten Kennzahlen der Heizsysteme wurden wo notwendig auf die heutige Situation hin aktualisiert (siehe dazu die Steckbriefe im Anhang A1).

Für alle Prozesse der Vorkette und der finalen Entsorgung wurden die aktuellsten Ökoinventare aus ecoinvent v3.5 (ecoinvent, 2018) verwendet. Eine Ausnahme bildet die ganze Biogasvorkette, bei der diverse Aktualisierungen der Hintergrundinventare vorgenommen wurden, siehe dazu (Kägi u. a., 2019). Die Sachbilanz sowie die Umweltauswirkungen und deren Bewertung wurde mit der Ökobilanz-Software SimaPro V9 (PRé Consultants, 2017) berechnet.

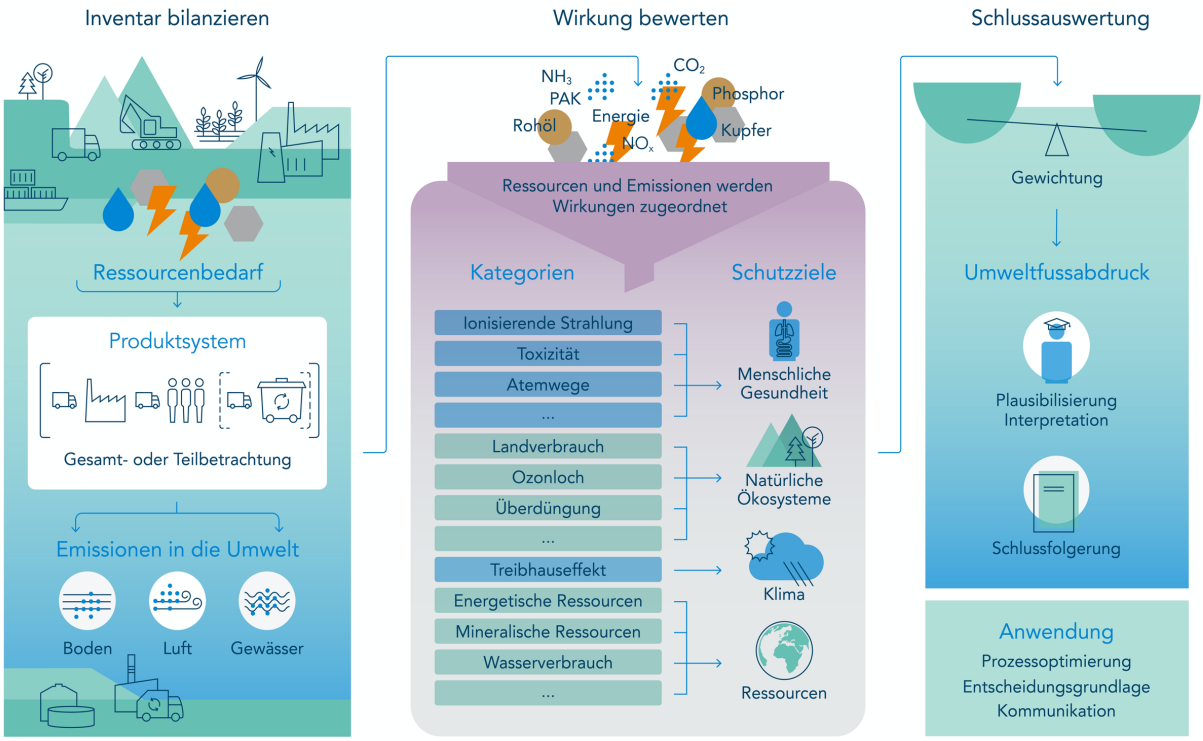

Abbildung 6: Schematische Funktionsweise der Ökobilanz.

Die Auswirkungen der Emissionen und des Ressourcenbedarfs wurden mit der Methode der ökologischen Knappheit 2013 (Frischknecht R. & Büsser Knöpfel S., 2013) sowie den Methoden Impact 2002+ und ILCD v1.04 ausgewertet. Da alle Methoden zu ähnlichen Resultaten führten, siehe Kapitel 4.1und 4.2, basiert die Diskussion der Ergebnisse im Wesentlichen auf den Resultaten der Methode der ökologischen Knappheit 2013, welche als Hauptmethode verwendet wurde.

Die Methode der ökologischen Knappheit (2013) wurde mit dem Ziel entwickelt, die verschiedenen Umweltauswirkungen (u.a. CO_2-Emissionen, weitere Luftemissionen, Versauerungs-Emissionen, Verbrauch nicht erneuerbarer Ressourcen, Emissionen ins Wasser und Boden etc.) zu einer einzigen Kenngrösse (Umweltbelastungspunkte [UBP]) zusammenzufassen. Es handelt sich um eine ökologische Bewertungsmethode, bei der neben den bereits bestehenden Belastungen die umweltpolitischen Ziele der Schweiz berücksichtigt werden. Je grösser die Umweltbelastung eines Produktes ist, desto mehr Umweltbelastungspunkte erzeugt seine Bewertung.
Aufgrund der Aktualität des Themas wurde zusätzlich der Einfluss auf das Klima (IPCC 2013) separat berechnet und diese Resultate in der Diskussion der Ergebnisse berücksichtigt.

3.5 Grenzen der Studie

3.5.1 Inhaltliche Grenzen

Folgende Grenzen hat diese Studie:

- Es werden nur ökologische Auswirkungen der Heizsysteme betrachtet. Die sozialen Auswirkungen als zusätzliche Dimension der Nachhaltigkeit werden nicht berücksichtigt.
- Die Studie betrachtet Standardlösungen der in der Schweiz erhältlichen Heizsysteme (Durchschnittswerte) und teilweise Best available Technology für ausgewählte Gebäudesettings. Die Studie gilt nur beschränkt für spezifische Heizungen und Gegebenheiten.
- Die Resultate gelten nur für die getroffenen Annahmen. Bei anderen Rahmenbedingungen können sich andere Resultate ergeben, welche mit den in diesem Bericht erarbeiteten, nicht übereinstimmen müssen.
- Es werden nur Heizungssysteme verglichen und keine anderen Möglichkeiten zur Reduktion der Umweltauswirkungen in Gebäuden, wie z.B. Massnahmen zur Reduktion des Energiebedarfs.

Bei der Interpretation der Resultate müssen diese Grenzen berücksichtigt werden.

3.5.2 Formale Grenzen

Das Vorgehen der Ökobilanz richtete sich bezüglich der Erstellung der Sachbilanzen und Wirkungsabschätzungen nach der Norm ISO 14'040/44 (ISO 14'040 2006) (ISO 14'044 2006). Bezüglich der Verwendung zur Bewertung und Interpretation von gesamtaggregierenden Bewertungsmethoden, wie dies bspw. die Umweltbelastungspunkte (UBP), ILCD oder Impact 2002+ sind, steht die Studie nur solange in Übereinstimmung mit der Norm., als sie nicht veröffentlicht wird.[4]

[4] In Abschnitt 4.1.8 von ISO 14'040:2006 (Version SN, deutsch) wird die "Priorität des wissenschaftlichen Ansatzes" postuliert. Die Ökofaktoren für die Schweiz gemäss der UBP-Methode basieren auf den wissenschaftlich begründeten und politisch legitimierten Zielen der Umweltgesetzgebung sowie des Umweltzustandes in der Schweiz. Die Anwendung der UBP genügt dieser ISO-Anforderung, steht jedoch in Widerspruch zu einer Bestimmung der Norm, sobald die Studie nicht allein zu internen Zwecken dient, sondern veröffentlicht wird. Damit steht diese Bestimmung jedoch im Widerspruch zum in der Schweiz gesetzlich verankerten Öffentlichkeitsprinzip für die Behörden. Deshalb verwenden die Bundesbehörden bei Ihren Ökobilanzstudien die sinngemässe Formulierung: «Sachbilanzen, Wirkungsabschätzungen und Gewichtungen erfolgten gemäss ISO 14'040/14'044, stehen bezüglich Veröffentlichung jedoch nicht in Einklang mit ISO 14'044, Ziffer 4.4.5, weil diese Bestimmung eine an den geltenden Gesetzen orientierte Anwendung der Ökobilanzierung durch schweizerische Amtsstellen nicht zulassen würde.»

4 Resultate und Diskussion

4.1 Einfamilienhaus und Mehrfamilienhaus Altbauten

Die ökologischen Auswirkungen pro funktionelle Einheit von einer kWh Wärme zeigen für Einfamilienhäuser (EFH) und Mehrfamilienhäuser (MFH) nur sehr geringe Unterschiede. Der Grund liegt darin, dass die wesentlichen Umweltauswirkungen durch die Bereitstellung und Nutzung der Energieträger entstehen. Die Umweltauswirkungen durch die Herstellung, Wartung und Entsorgung der Heizsysteme ist von untergeordneter Bedeutung. Daher werden im Folgenden nur die Resultate für EFH gezeigt. Ausnahmen sind Wärmepumpen, welche unterschiedliche JAZ für EFH und MFH aufweisen. Die folgenden Graphiken zeigen die Resultate für die untersuchten Heizungssysteme für bestehende EFH sowie für die WP auch für MFH mit den drei Methoden MöK, ILCD und Impact 2002+. Durch den Vergleich der Resultate mit drei unterschiedlichen Methoden soll abgeklärt werden, ob die unterschiedlichen Bewertungen der verschiedenen Methoden zu anderen Schlussfolgerungen führen oder ob es für die untersuchten Systeme zulässig ist, eine Methode zu verwenden.

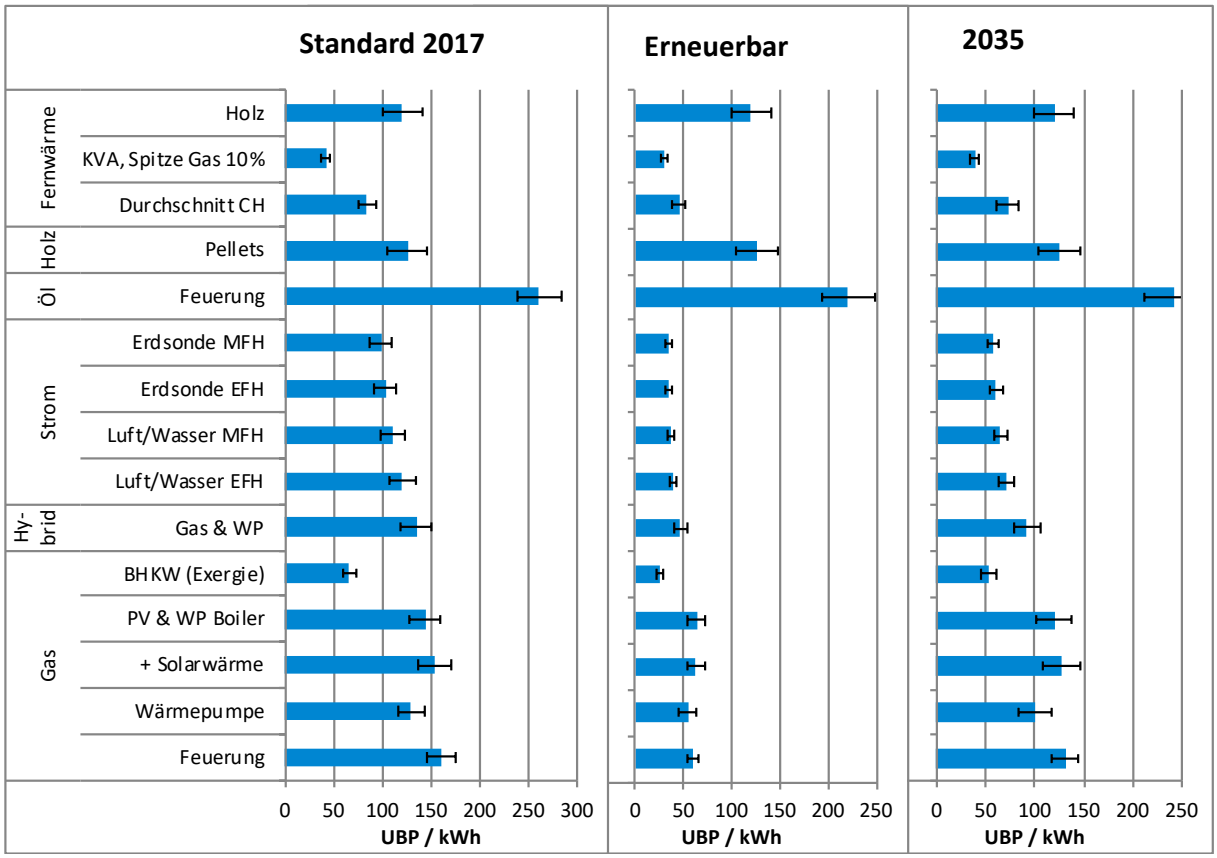

Abbildung 7: Umweltfussabdruck verschiedener Heizsysteme für EFH/MFH gemäss der Methode der ökologischen Knappheit 2013.

Bei den Varianten Erneuerbar wurde für die gasbasierten Heizsysteme mit 100 % Biogas und bei den strombasierten Heizsystemen mit erneuerbarem Strommix gerechnet. Bei der Ölheizung wurden 20 % Bioöl angenommen.

Bei den Varianten 2035 wurde für die gasbasierten Heizsysteme mit 30 % Biogasanteil und bei den strombasierten Heizsystemen mit dem prognostizierten Strommix 2035 gerechnet. Bei der Ölheizung wurden 10 % Bioöl aus Abfällen angenommen.

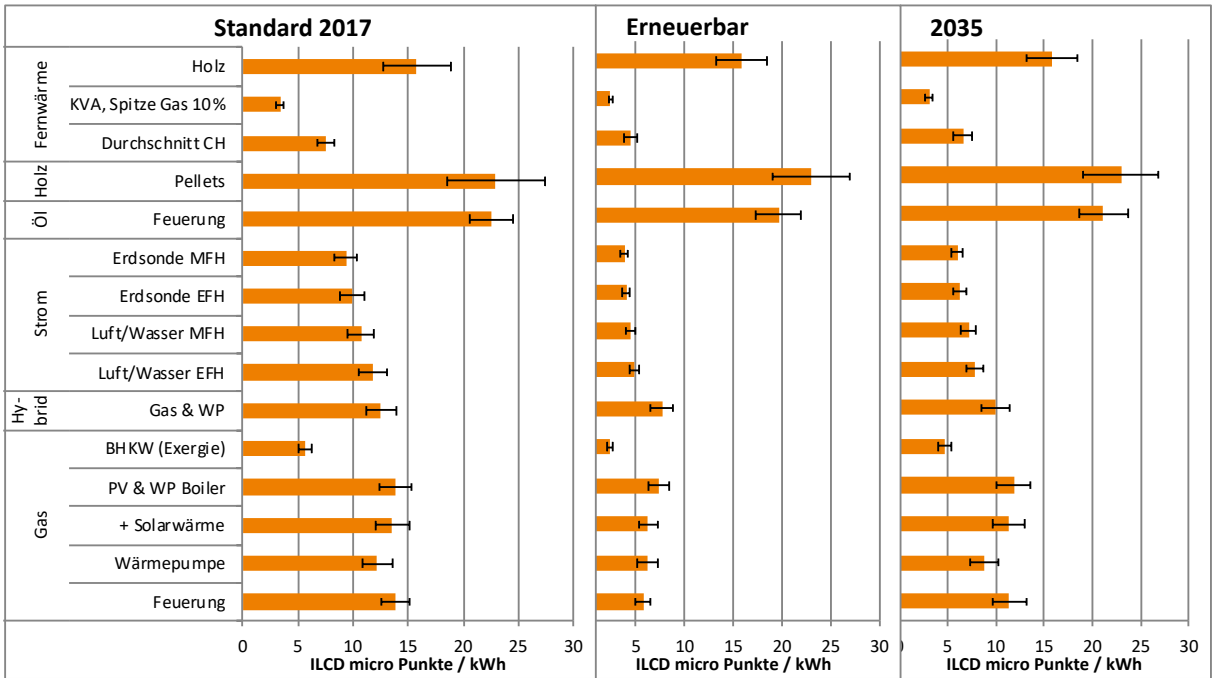

Abbildung 8: Umweltfussabdruck verschiedener Heizsysteme für EFH/MFH gemäss der Methode ILCD.
Bei den Varianten Erneuerbar wurde für die gasbasierten Heizsysteme mit 100 % Biogas und bei den strombasierten Heizsystemen mit erneuerbarem Strommix gerechnet. Bei der Ölheizung wurden 20 % Bioöl angenommen
Bei den Varianten 2035 wurde für die gasbasierten Heizsysteme mit 30 % Biogasanteil und bei den strombasierten Heizsystemen mit dem prognostizierten Strommix 2035 gerechnet. Bei der Ölheizung wurden 10 % Bioöl angenommen.

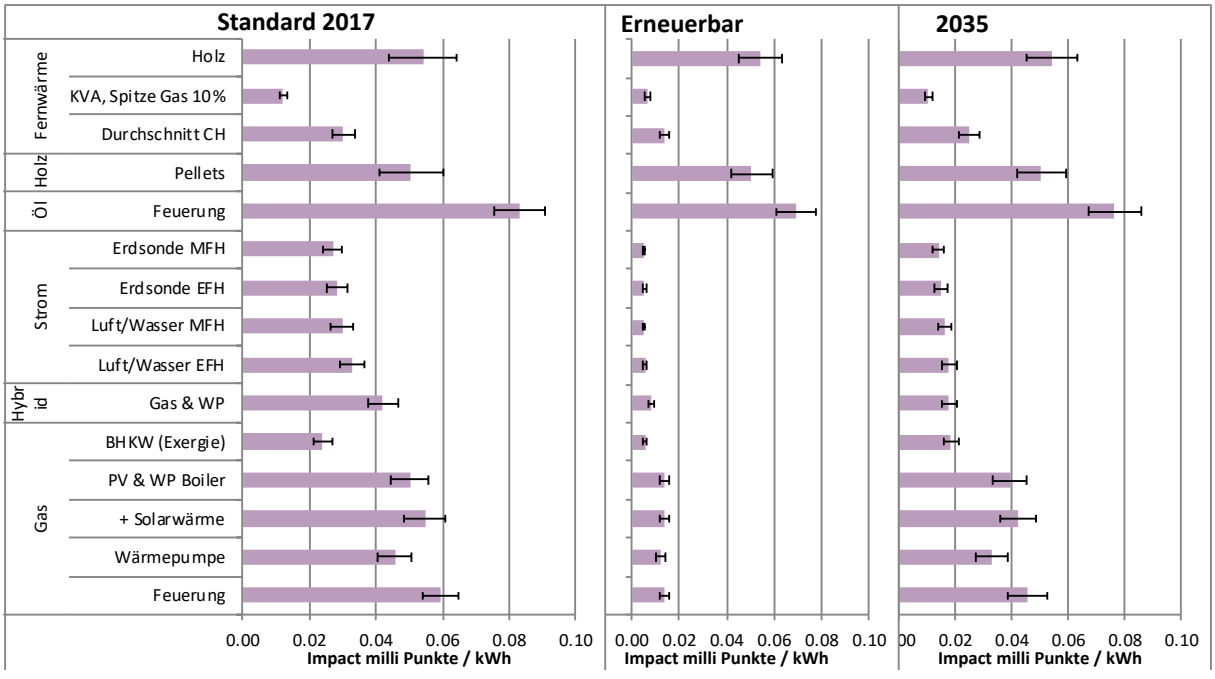

Abbildung 9: Umweltfussabdruck verschiedener Heizsysteme für EFH/MFH gemäss der Methode Impact 2002+ .
Bei den Varianten Erneuerbar wurde für die gasbasierten Heizsysteme mit 100 % Biogas und bei den strombasierten Heizsystemen mit erneuerbarem Strommix gerechnet. Bei der Ölheizung wurden 20 % Bioöl angenommen.
Bei den Varianten 2035 wurde für die gasbasierten Heizsysteme mit 30 % Biogasanteil und bei den strombasierten Heizsystemen mit dem prognostizierten Strommix 2035 gerechnet. Bei der Ölheizung wurden 10 % Bioöl angenommen.

Analyse der gesamtaggregierenden Methoden

Mit Ausnahme der Holzfeuerungen im Speziellen der Pellet Feuerung zeigen alle drei Methoden vergleichbare Resultate, siehe Abbildung 7 bis Abbildung 9. D.h. die relativen Unterschiede der verschiedenen Heizsysteme sind im Rahmen der Unsicherheit der Resultate vergleichbar. Somit können unabhängig von der verwendeten Methode dieselben Schlussfolgerungen bezüglich der relativen Umweltauswirkungen der Heizsysteme gezogen werden. Ein vergleichbares aber dennoch etwas anderen Bild zeigt die Auswertung bezüglich des Klimas alleine, siehe Abbildung 11. Zu beachten ist, dass die Klimaauswirkungen auch bei den anderen Methoden berücksichtigt werden.

Der Grund, dass ILCD die Pellet Feuerung so schlecht bewertet, liegt in der sehr hohen Gewichtung der Feinstaubemissionen bei dieser Methode, siehe Abbildung 10. Da die beiden anderen Methoden diese auch als relevant bewerten, jedoch nicht ganz so hoch, ergibt sich der Unterschied zwischen den Resultaten der Methode ILCD und den beiden Methoden MöK und Impact 2002+. Die Bewertung der MöK bezieht sowohl die schweizerische Umweltgesetzgebung und Umweltpolitik wie auch die aktuelle Belastung in der Schweiz ein. Da diese Studie für die Schweiz erstellt wurde, erachten wir die Bewertung der MöK als sinnvoll für diese Studie und wird daher als Hauptmethode verwendet.

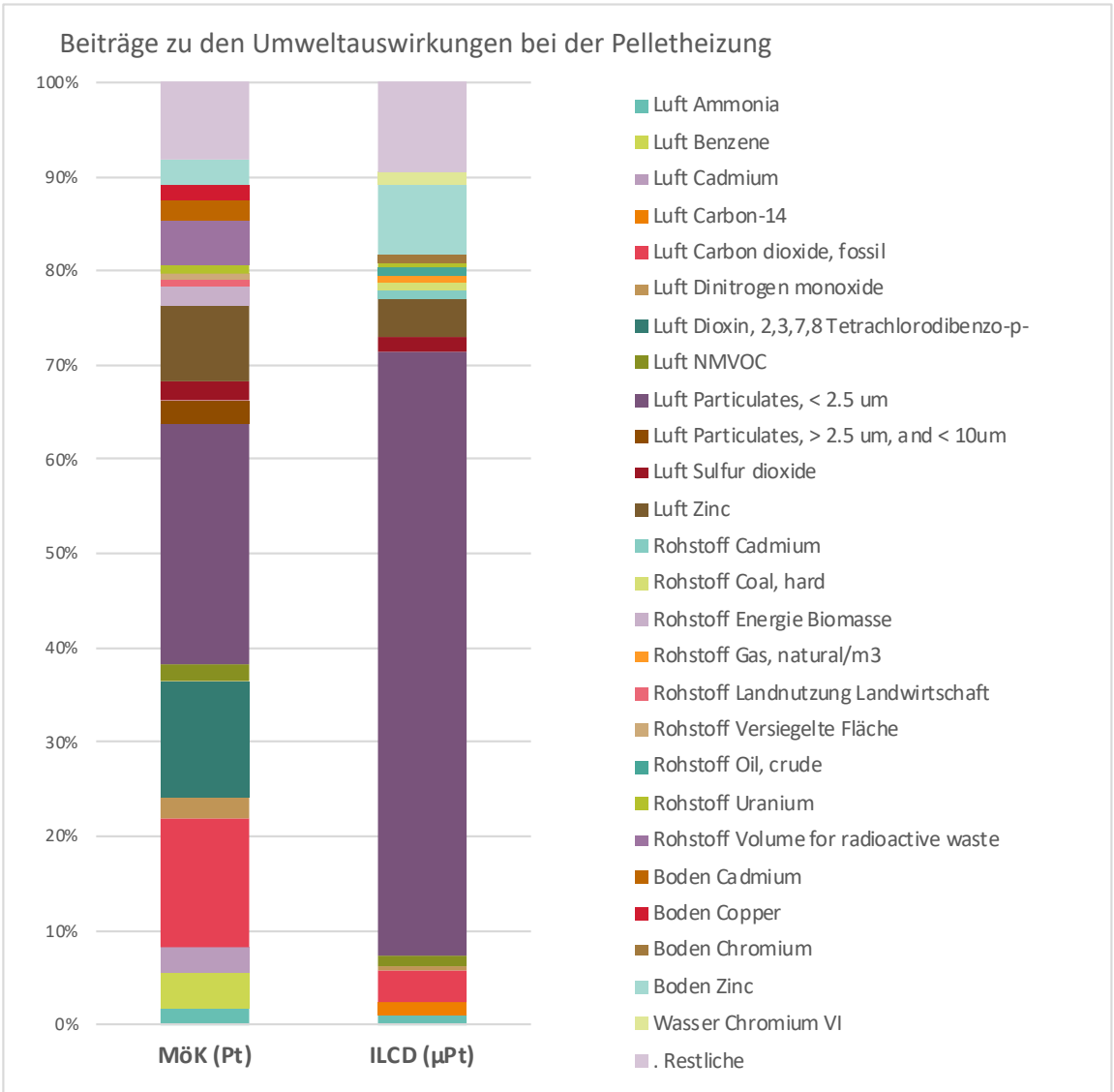

Abbildung 10: Bewertung der verschiedenen Umwelteinwirkungen der Pellet-Feuerung durch die beiden Methoden MöK und ILCD

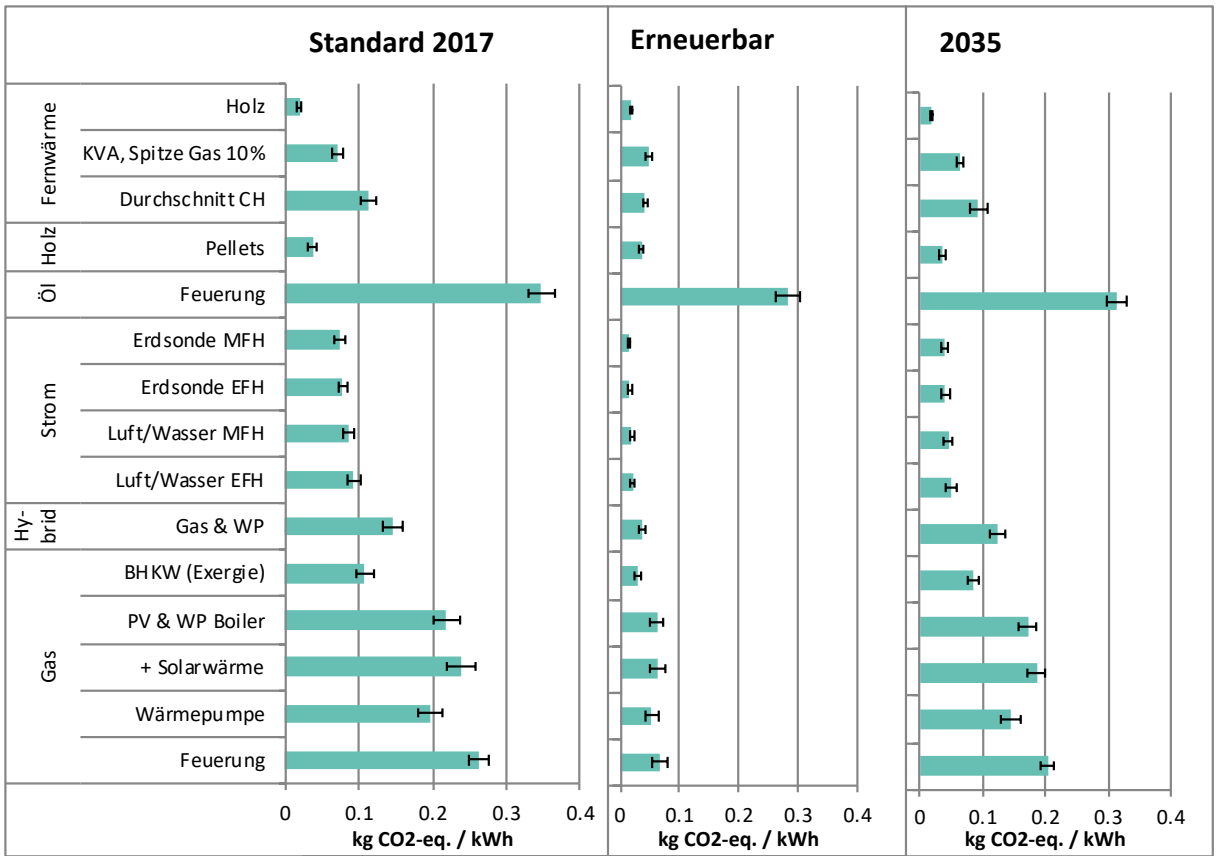

Abbildung 11: CO_2-Fussabdruck verschiedener Heizsysteme für EFH/MFH gemäss IPCC 2013.
Bei den Varianten Erneuerbar wurde für die gasbasierten Heizsysteme mit 100 % Biogas und bei den strombasierten Heizsystemen mit erneuerbarem Strommix gerechnet. Bei der Ölheizung wurden 20 % Bioöl angenommen.
Bei den Varianten 2035 wurde für die gasbasierten Heizsysteme mit 30 % Biogasanteil und bei den strombasierten Heizsystemen mit dem prognostizierten Strommix 2035 gerechnet. Bei der Ölheizung wurden 10 % Bioöl aus Abfällen angenommen.

Analyse der Umweltauswirkungen der Heizsysteme

Die geringsten Umweltauswirkungen hat heute das Fernwärmesystem, welches die Wärme zu 90 % aus der Abfallverbrennung der KVA bezieht und nur 10 % Erdgas zur Spitzenabdeckung benötigt. Der Grund liegt darin, dass die KVA primär dazu da ist, um bestehende Abfälle zu entsorgen und entsprechend nur ein sehr geringer Anteil der Umweltauswirkungen auf die Energie (Wärme und Strom) alloziert wird. Ähnlich geringe Umweltauswirkungen hat die Gasheizung, welche zu 100 % mit Biogas aus Abfällen und Nebenprodukten betrieben wird. Diese beiden Systeme haben natürlich nur eine begrenzte Kapazität, da die Menge an biogenen Reststoffen und Abfällen beschränkt ist.
Ebenfalls sehr tiefe Auswirkungen hat das BHKW mit der Allokation Exergie. Dabei ist zu beachten, dass die Wärme ab BHKW so gut abschneidet, weil bei der Allokation nach Exergie der Hauptteil der Belastungen dem Strom angerechnet wird, welcher in dem Falle eine höhere Belastung als Netzstrom hat, siehe dazu auch die Sensitivitätsanalyse in Kapitel 4.3.4.
Grössere Umweltauswirkungen als die oben genannten Heizsysteme weisen heute die WP-Systeme auf, wobei aufgrund der unterschiedlichen JAZ die WP mit Erdsonde die geringeren Umweltauswirkungen aufweist als die Luft/Wasser WP.

Im Rahmen der Unsicherheit haben Holzheizungen vergleichbare Umweltauswirkungen wie die Gasheizung, welche zu 100 % mit Erdgas betrieben wird. Die gesamten Umweltauswirkungen dieser Systeme sind relativ hoch und werden nur von der Wärme ab heizölbetriebenen Heizungen wesentlich übertroffen.
Die Kombination von fossilen Heizungen mit Anteilen von biogenen Energieträgern oder anderen Systemen, wie Solarwärme oder PV für den Betrieb eines WP Boilers führen zu Reduktionen der Umweltbelastungen.
Bei der Verwendung von erneuerbaren Energieträgern, Strom oder Biogas, reduzieren sich die Umweltauswirkungen der WP und der Gasheizungen wesentlich, sie gehören dann zu den Heizsystemen mit geringen Umweltauswirkungen.
In Zukunft ist zu erwarten, dass sich die Umweltauswirkungen der WP um rund 40 % reduzieren auf Grund des veränderten Strommixes. Bei den Gasheizungen ist eine Reduktion von rund 20 % zu erwarten auf Grund des erhöhten Anteils an Biogas.

Bei der Fokussierung auf das Klima schneiden die Holzheizungen erwartungsgemäss am besten ab. Diese unterschiedliche Bewertung zu den gesamtaggregierenden Methoden ergibt sich dadurch, dass die anderen Methoden ebenfalls Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit, z.B. durch Partikel- oder NO_x-Emissionen, oder auf Ökosysteme berücksichtigen. Ebenfalls geringe Umweltauswirkungen haben WP Systeme sowie Fernwärme ab KVA gefolgt von Wärme ab BHKW mit der Allokation nach Exergie. Die fossilen Heizungen haben erwartungsgemäss die höchsten Klimaauswirkungen, wobei diejenige von Öl wesentlich höher sind als die von Gasheizungen.

4.2 Neubau-Areal

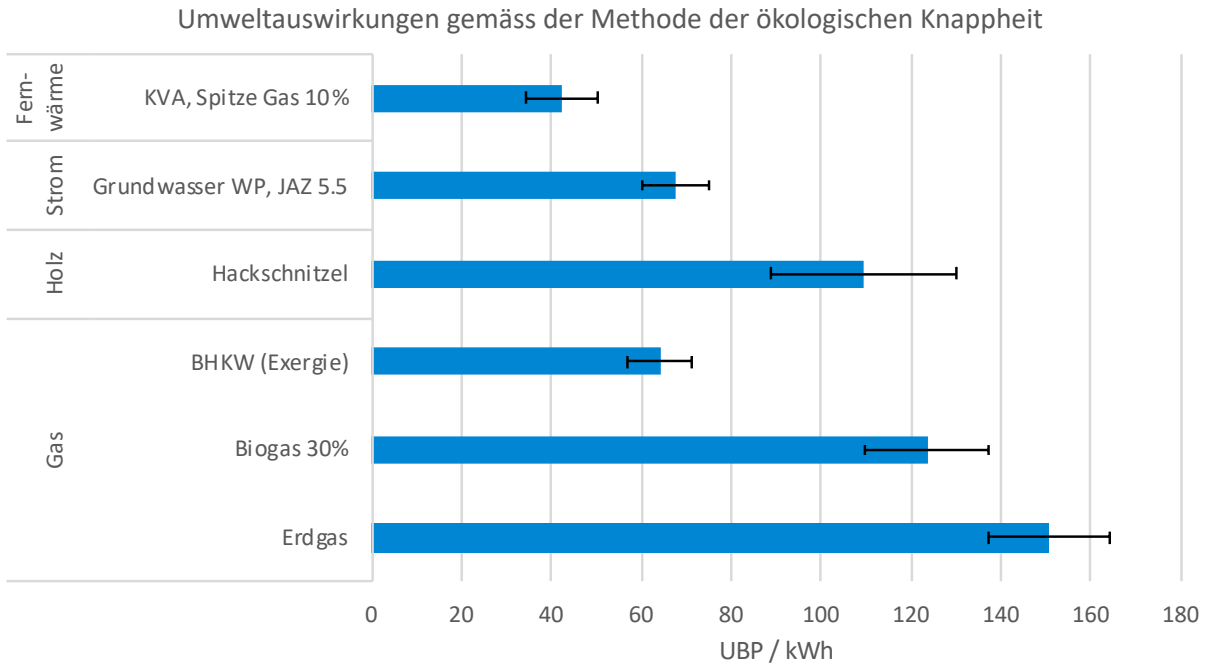

Abbildung 12: Umweltfussabdruck verschiedener Heizsysteme für Areale gemäss der Methode der ökologischen Knappheit (MöK) 2013.

Analyse der gesamtaggregierenden Methoden

Wie Abbildung 12 und Abbildung 14 zeigen, ergeben die beiden Methoden MöK und Impact 2002+ vergleichbare Resultate. Bei der Methode ILCD, siehe Abbildung 13, zeigt sich ein grosser Unterschied bei der Bewertung der Hackschnitzel Feuerung. Diese zeigt sehr viel höhere relative Auswirkungen bei dieser Methode. Der Grund dafür sind die sehr hohe Bewertung der Partikel-Emissionen, siehe dazu Seite 27. Wie in Kapitel 4.1 diskutiert, erachten wir die Methode der ökologischen Knappheit als die adäquateste für diese Studie

Analyse der Umweltauswirkungen der Heizsysteme

Die Fernwärme (KVA mit Gasspitze) hat die geringsten Umweltauswirkungen, gefolgt von der Grundwasser-WP und dem BHKW. Holzschnitzel Heizungen und Erdgas-Heizungen mit 30 % Biogas haben im Rahmen der Unsicherheiten vergleichbare Belastungen, welche fast doppelt so gross sind wie das Heizsystem Grundwasser-WP. Die reine Erdgas-Heizung weist die grössten Auswirkungen auf.

Bei der Fokussierung auf das Klima, siehe Abbildung 15, zeigt die Holzschnitzel-Feuerung die geringsten Umweltauswirkungen, gefolgt von der Grundwasser-WP und der Fernwärme. Wesentlich grössere Umweltauswirkungen haben die Erdgas-Feuerungen. Die Auswirkungen des Erdgas-BHKWs liegen dazwischen.

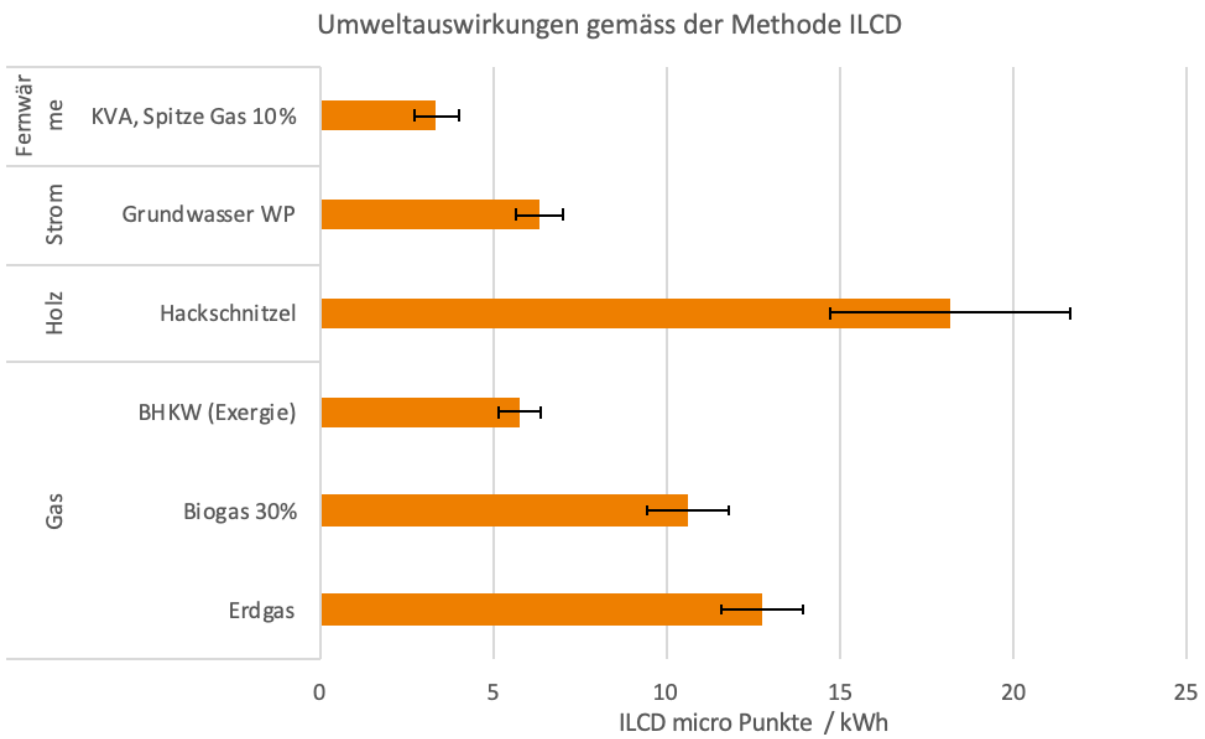

Abbildung 13: Umweltfussabdruck verschiedener Heizsysteme für Areale gemäss der Methode ILCD.

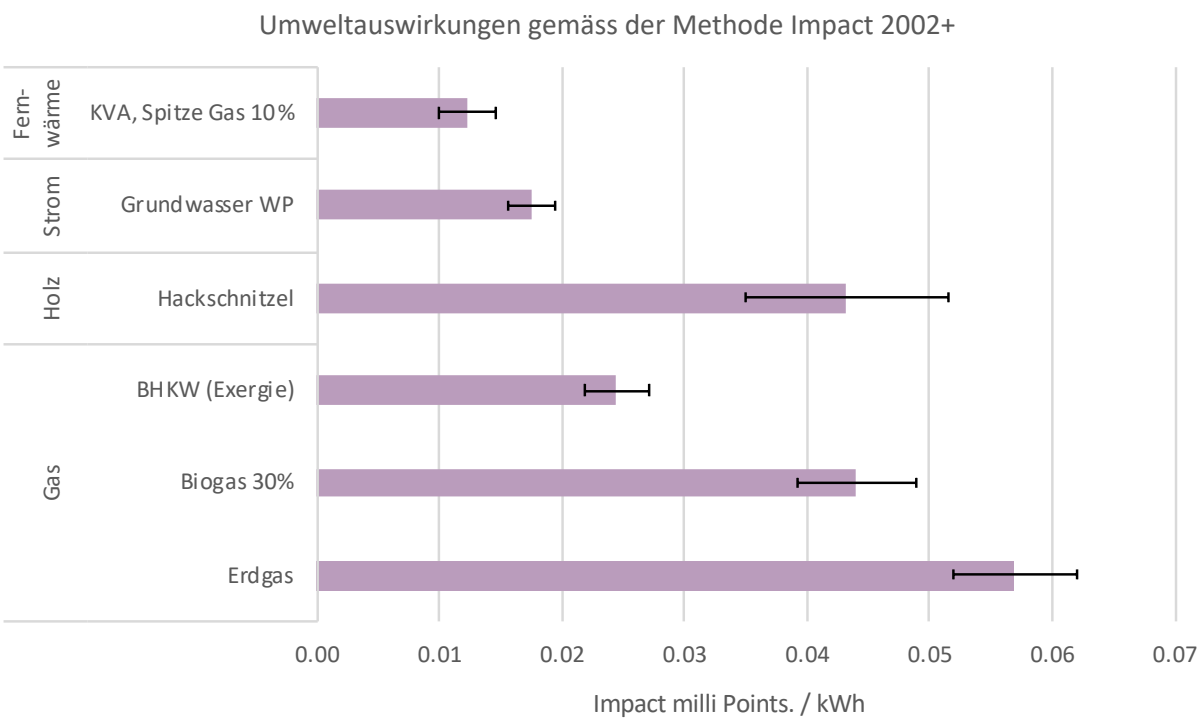

Abbildung 14: Umweltfussabdruck verschiedener Heizsysteme für Areale gemäss der Methode Impact 2002+.

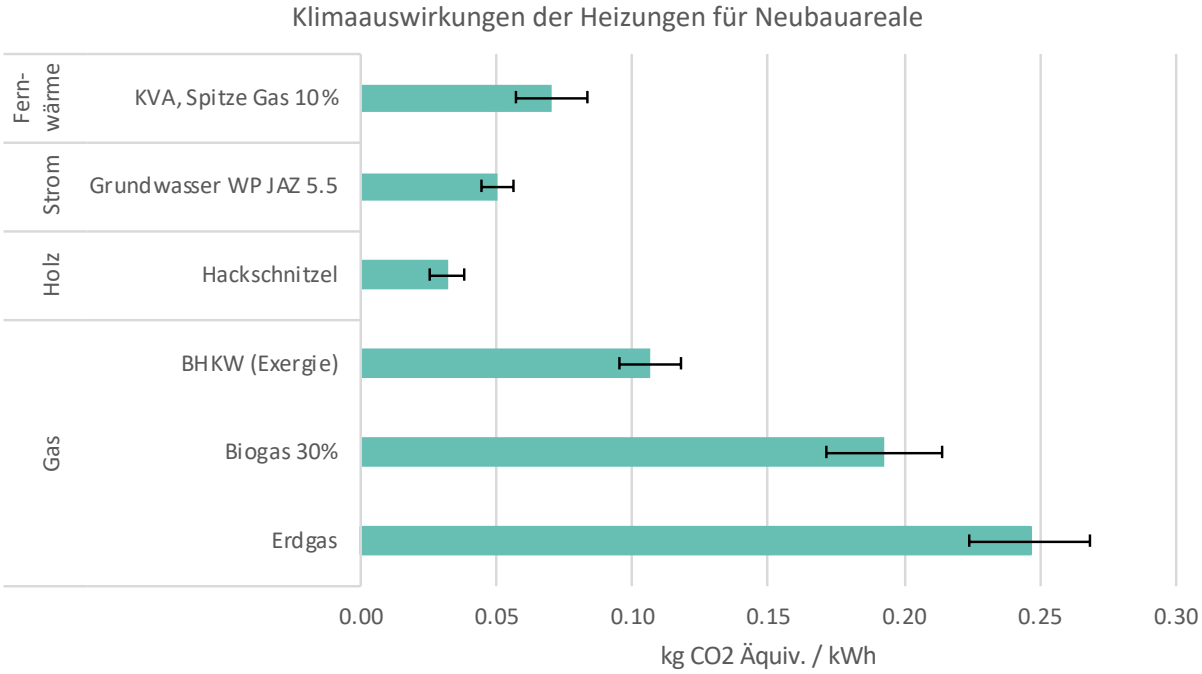

Abbildung 15: CO_2-Fussabdruck verschiedener Heizsysteme für Areale gemäss IPCC 2013.

4.3 Sensitivitätsanalysen

In den folgenden Kapiteln werden für relevante Einflussgrössen die Resultate von Sensitivitätsanalysen gezeigt. Diese wurden durchgeführt, um einerseits die Aussagekraft der Resultate zu prüfen und andererseits um zukünftige Entwicklungen und Optimierungspotentiale zu eruieren.

4.3.1 Einfluss Sanierungsstandard

Die Umweltauswirkung pro kWh Wärme ist bei WP-Heizsystemen bei sanierten Gebäuden knapp 10 % tiefer als bei unsanierten Altbauten. Der Grund ist, dass dank tieferen Vorlauftemperaturen bei sanierten Gebäuden die Wärmepumpen eine höhere Effizienz ausweisen.

Diese Erkenntnis zeigt sich bei allen betrachteten Bewertungsmethoden, weshalb nur die Methode der ökologischen Knappheit 2013 ausgewiesen wird.

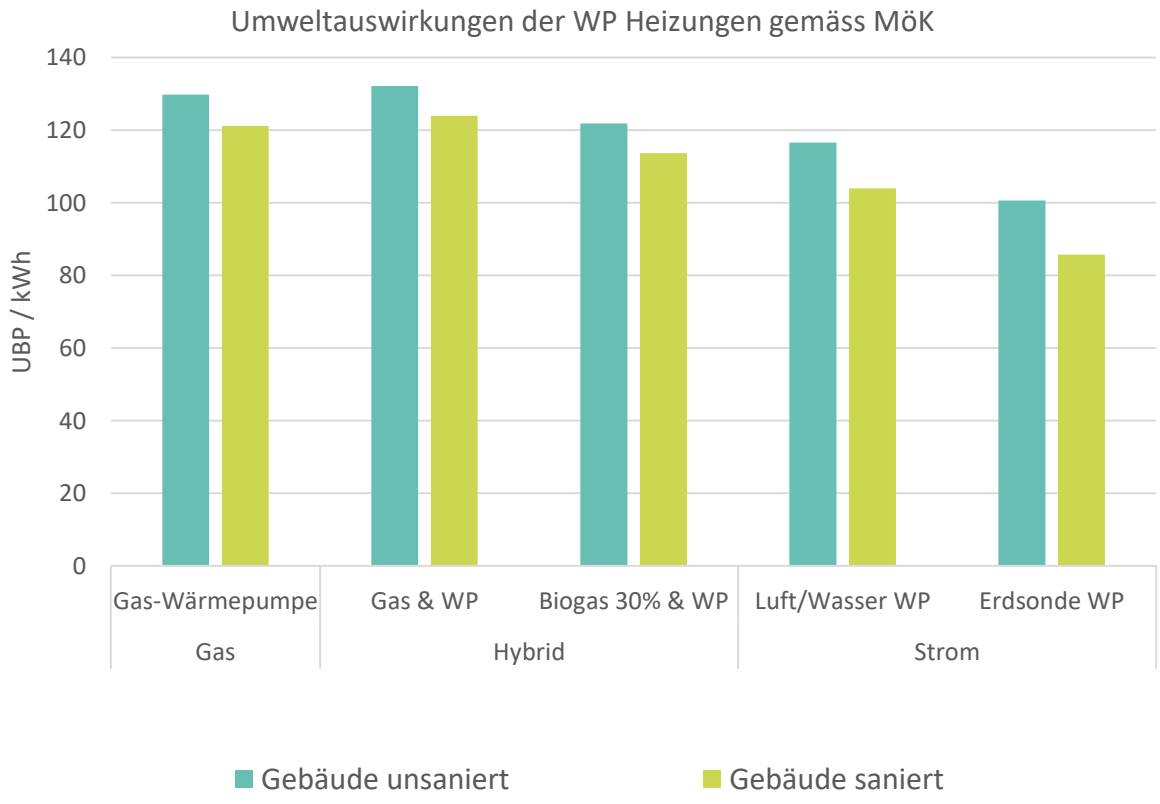

Abbildung 16: Einfluss des Sanierungsstandards auf das Resultat für ausgewiesene Heizsysteme gemäss der Methode der ökologischen Knappheit 2013:

4.3.2 Einfluss Strommix

Bei strombasierten Heizsystemen hat die Zusammensetzung des Strommix einen grossen Einfluss auf die Umweltauswirkung der Systeme. Abbildung 17 zeigt, die Resultate der Sensitivitätsanalysen bezüglich zukünftigem Strommix und erneuerbarem Strom. Diese Analyse zeigt, dass voraussichtlich 2035 die Umweltauswirkung pro kWh für rein strombasierte WP-Systeme um 40 % tiefer sind als heute. Bei Hybridsystemen ist mit einer Reduktion um 25 % zu rechnen. Werden die Systeme nur mit erneuerbarem Strom betrieben,

reduzieren sich die Umweltauswirkungen bei strombasierten Systemen um rund zwei Drittel und bei Hybridsystemen um rund 40 %.

Diese Erkenntnis zeigt sich bei allen betrachteten gesamtaggregierenden Bewertungsmethoden, weshalb nur die Methode der ökologischen Knappheit 2013 ausgewiesen wird.

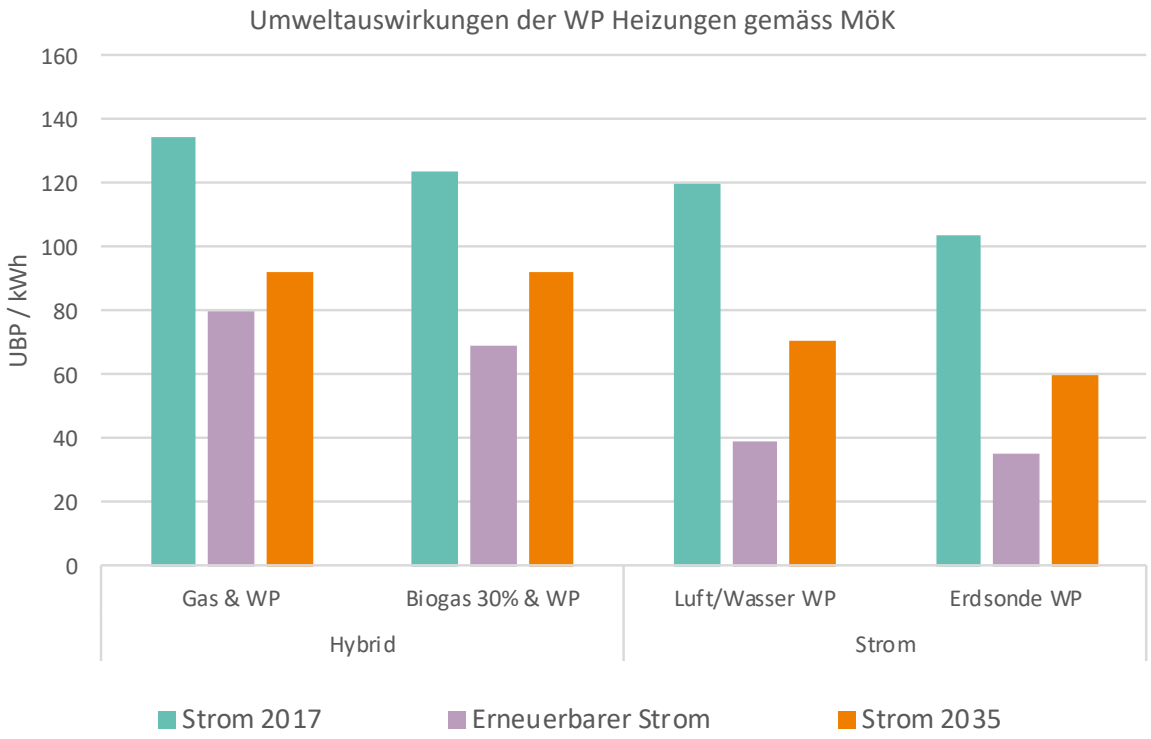

Abbildung 17: Einfluss des Strommix auf das Resultat für ausgewiesene Heizsysteme gemäss der Methode der ökologischen Knappheit 2013:

Wird nur der Einfluss auf das Klima betrachtet, sind die Einsparungen sogar noch grösser und belaufen sich bei strombasierten Systemen auf 50 % im Jahre 2035 respektive auf rund 80 %, wenn erneuerbarer Strom verwendet wird. Bei Hybridsystemen liegt die Einsparung bei 17 % für den Strommix 2035 und bei rund 30 %, wenn erneuerbarer Strom verwendet wird.

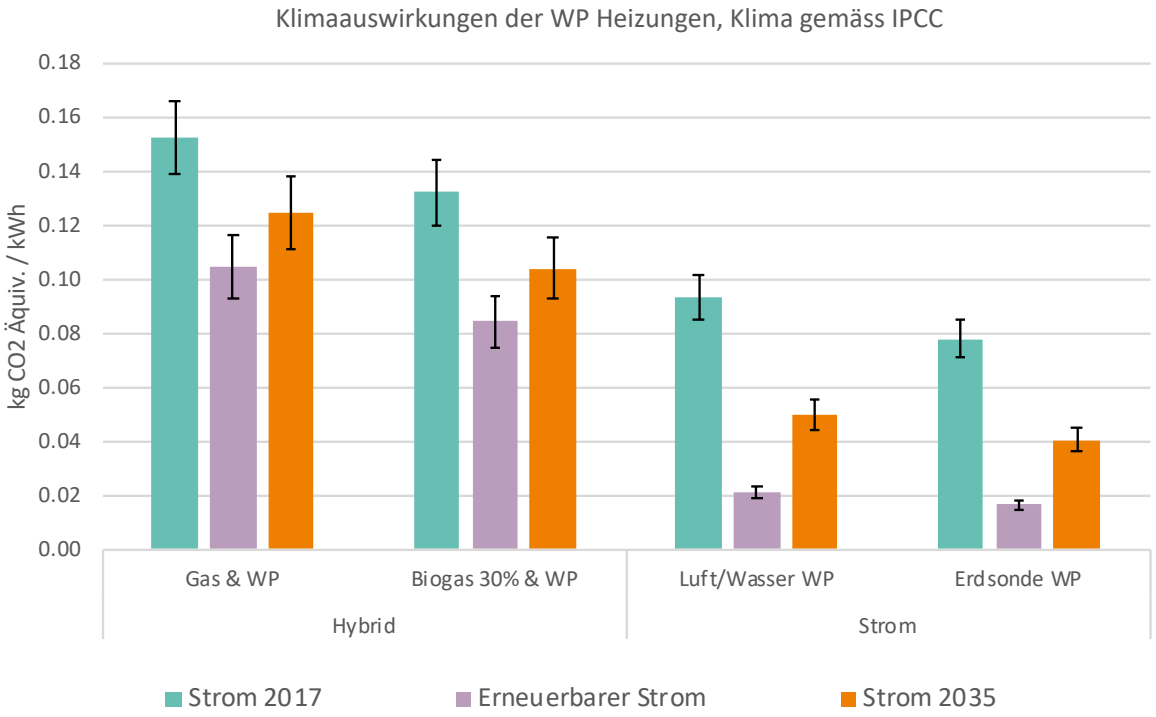

Abbildung 18: Einfluss des Strommix und des Sanierungsstandards auf das Resultat für ausgewiesene Heizsysteme auf das Klima

4.3.3 Einfluss Anteil erneuerbare Brennstoffe

Der Anteil Biogas aus Abfall- und Nebenprodukten hat einen wesentlichen Einfluss auf die Umweltauswirkung. Ein Anteil von 30 % Biogas reduziert die Umweltauswirkungen um knapp 20 %. Bei einem 100 % Biogasanteil liegt die Einsparung bei rund 60 %. Die Variante 100 % optimiert steht für eine best case Biogasbereitstellung mit minimalen Methanschlüpfen und Energieverbräuchen sowie Abwärmenutzung einer KVA. Entsprechend ist zu beachten, dass dieses Optimum nicht überall erreicht werden kann. Diese Variante weist eine Reduktion der Umweltauswirkungen von mehr als 80 % auf.

Diese Erkenntnis zeigt sich bei allen betrachteten gesamtaggregierenden Bewertungsmethoden, weshalb nur die Methode der ökologischen Knappheit 2013 ausgewiesen wird.

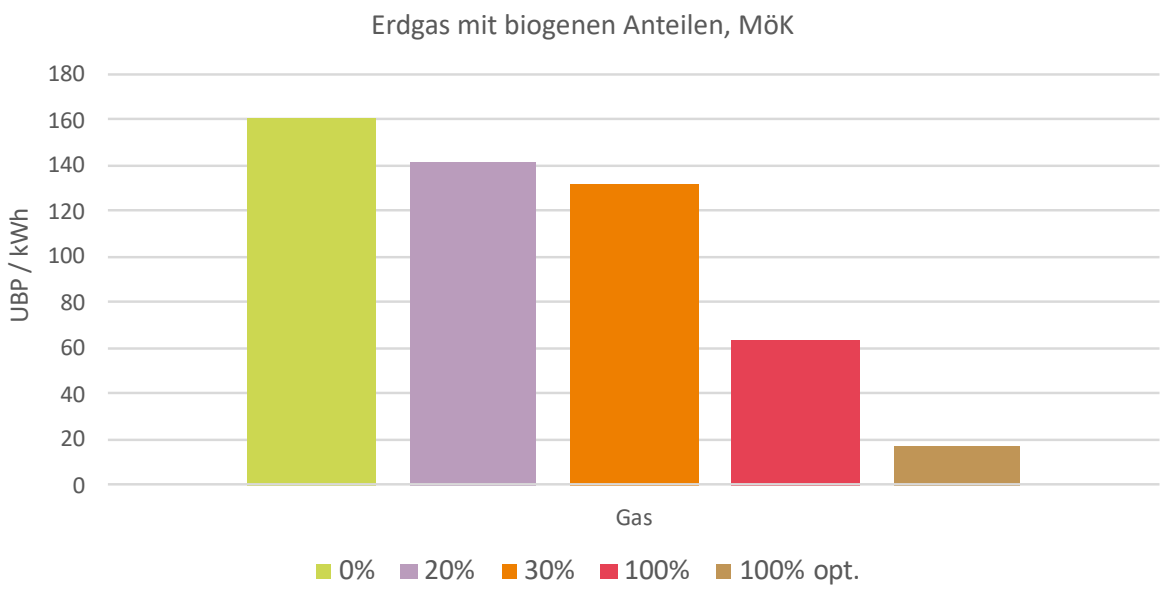

Abbildung 19: Einfluss des Anteils erneuerbare Brennstoffe auf das Resultat für die fossilen Heizsysteme gemäss der Methode der ökologischen Knappheit 2013:

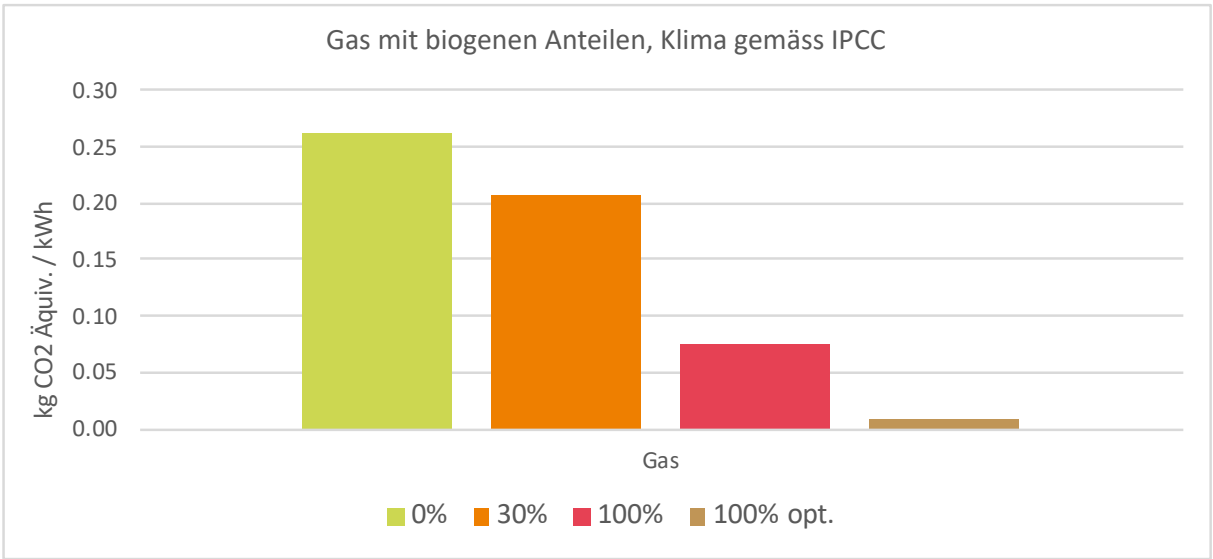

Abbildung 20: Einfluss des Anteils erneuerbare Brennstoffe auf das Resultat für die fossilen Heizsysteme auf das Klima

Wird nur der Einfluss auf das Klima betrachtet, sind die Einsparungen sogar noch grösser, siehe Abbildung 20. Ein Anteil von 30 % Biogas reduziert die Umweltauswirkungen um etwas mehr als 20 %. Bei einem 100 % Biogasanteil liegt die Einsparung bei rund 70 %. Die Variante 100 % optimierte Biogasanlage weist eine Reduktion der Umweltauswirkungen um mehr als 95 % auf.

Bei einer Ölfeuerung führt eine 20 % Beigabe von biogenen Ölen aus Reststoffen zu einer Reduktion der gesamten Umweltauswirkungen gemessen in UBP von rund 15 %, siehe Abbildung 21. Die Klimaauswirkungen werden um rund 19 % gesenkt, durch die Eingabe von 20 % biogenen Ölen, siehe Abbildung 22.

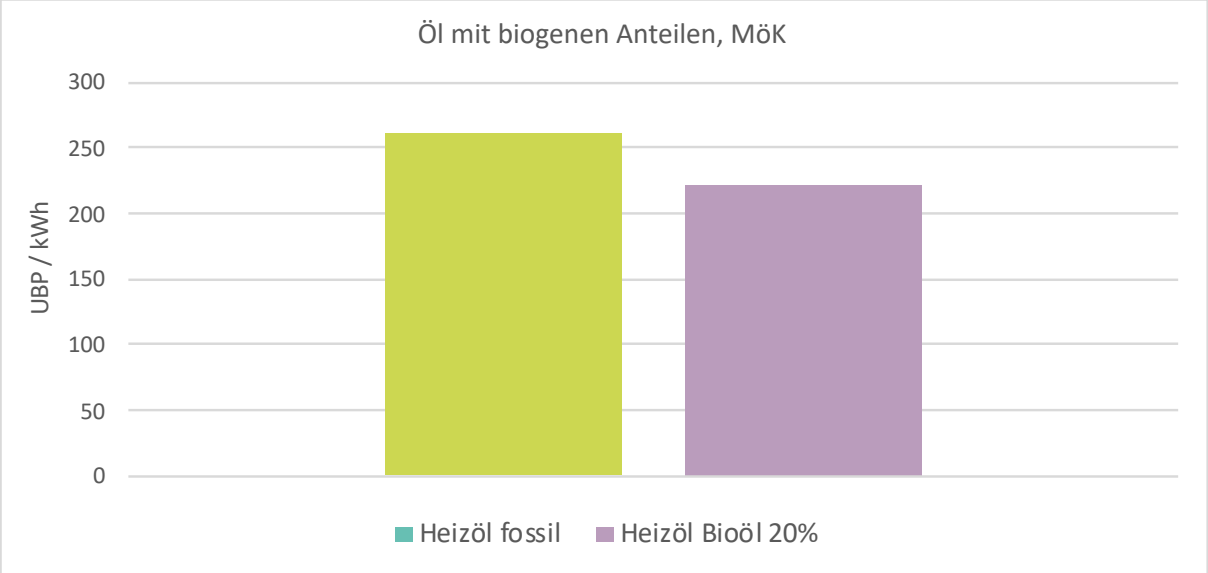

Abbildung 21: Einfluss des Anteils erneuerbare Brennstoffe auf das Resultat für die fossilen Heizsysteme auf das Klima

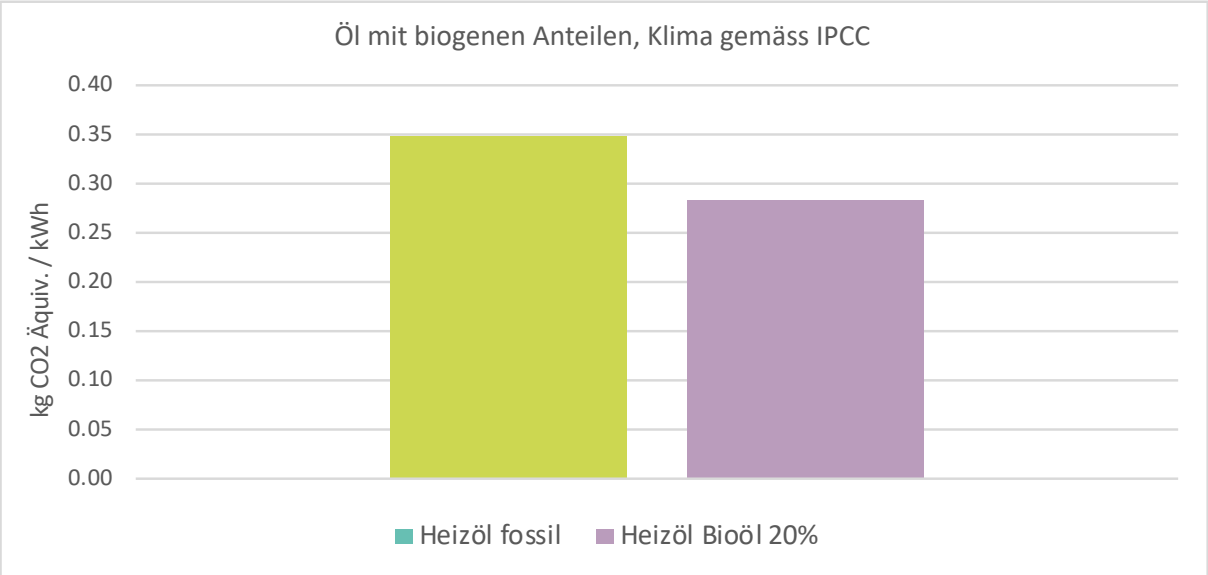

Abbildung 22: Einfluss des Anteils erneuerbare Brennstoffe auf das Resultat für die fossilen Heizsysteme auf das Klima

4.3.4 Einfluss Allokationsmethode beim BHKW

Wie in Kapitel 2.4.5.1 beschrieben wurde als Standard die Allokation nach Exergie durchgeführt, da diese auf einer physikalischen Grösse beruht und damit nicht abhängig ist von der aktuellen Marktsituation. Dies entspricht auch der Empfehlung der ISO Norm. Zudem trägt diese Allokationsart dem Umstand Rechnung, dass Strom eine höhere Wertigkeit hat als Wärme. Diese kann nur mit Verlusten in Strom umgewandelt werden, während Strom zu 100 % in Wärme umgewandelt werden kann bzw. mit einer Wärmepumpe ein Mehrfaches an Wärme erzeugt werden kann. Eine andere Art ist die Allokation nach dem Substitutionsansatz. Dabei wird für den BHKW Strom eine Gutschrift für den damit ersetzten Strommix gemacht. In dieser Studie wurde dafür ein Strommix gewählt, wie er bei den Wärmepumpen verwendet wurde. Diese Allokationsart ist z.B.

geeignet für die Fragestellung, wie hoch sind die Umweltbelastungen der BHKW-Wärme unter der Bedingung, dass der Strom keine höhere Belastung als der durchschnittliche oder der zukünftig angestrebte Strommix ausweist. Diese Betrachtung trägt auch dem Umstand Rechnung, dass voraussichtlich in Zukunft ein Strom mit hohen Auswirkungen auf das Klima bzw. die Umwelt keinen Absatz finden wird. Um zu sehen, welche Auswirkungen die Allokation auf die Resultate hat, wurden die Umweltauswirkungen mit beiden Allokationsarten berechnet.

Abbildung 22 zeigt die Resultate mit den beiden Allokationsmethoden für ein Mini-BHKW für EFH und ein grösseres BHKW für Areale. Daraus ist ersichtlich, dass die Umweltauswirkungen mit dem Substitutionsansatz rund 2 bis 2.5-Mal höher liegen als mit dem Ansatz Allokation Exergie und liegen in der Grössenordnung der normalen Erdgasheizung.

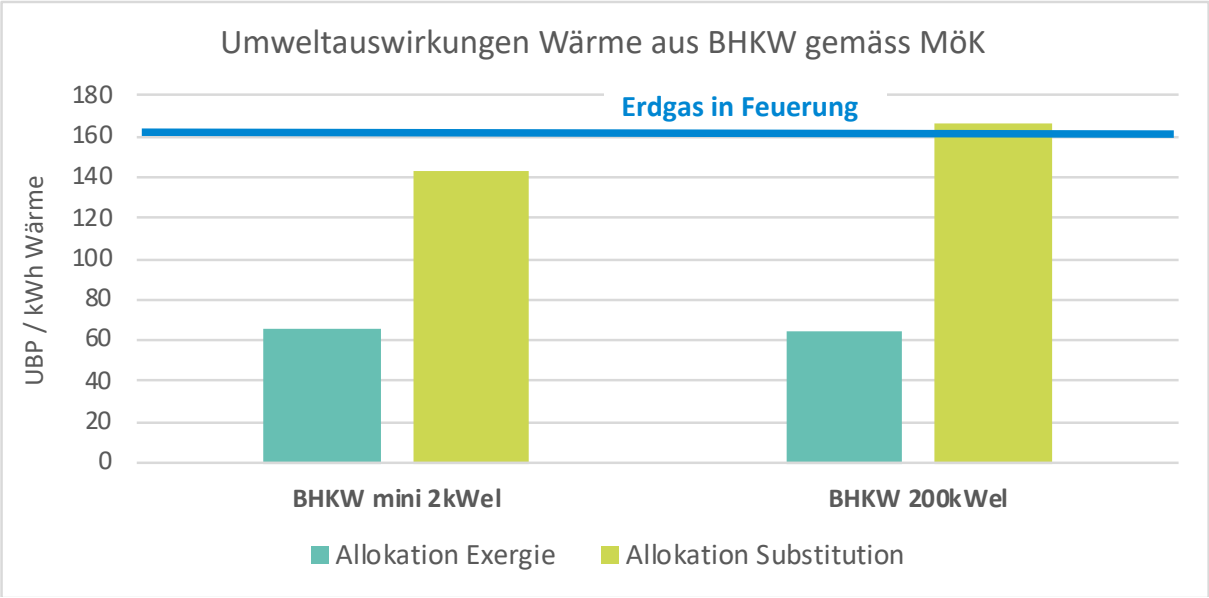

Abbildung 23: Einfluss der Allokationsart auf das Resultat für Wärme aus Erdgas BHKW

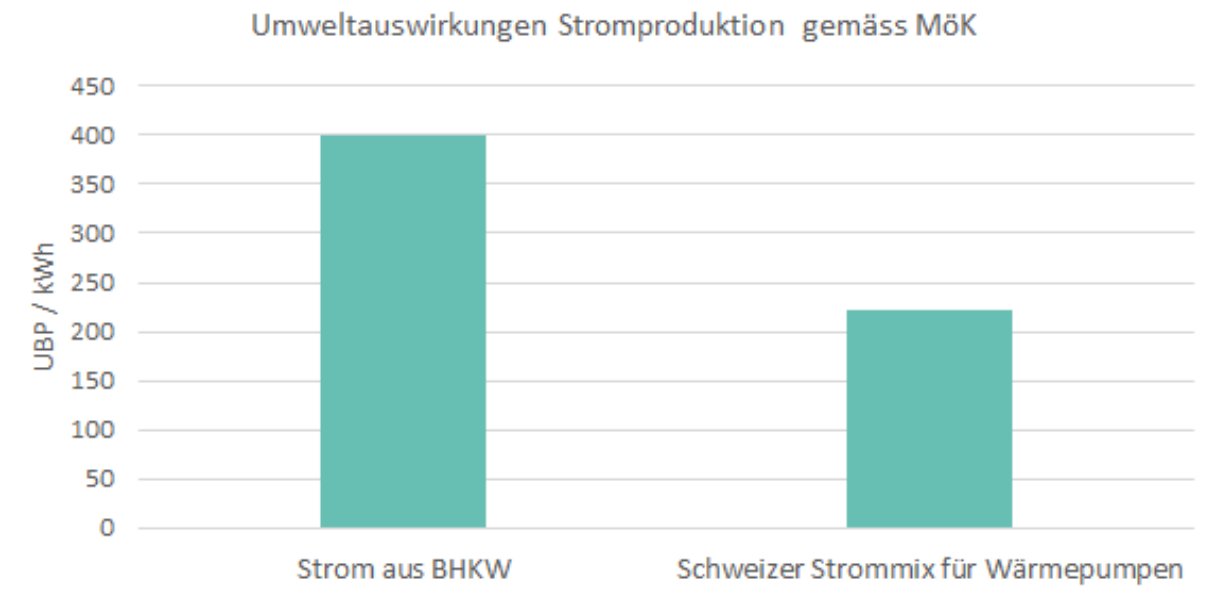

Abbildung 24: Strom ab Erdgas-BHKW mit der Allokation nach Exergie im Vergleich zum Schweizer Strom-Mix für WP.

Für dieses eher unerwartete Resultat sind im Wesentlichen zwei Gründe verantwortlich:

- Bei der Allokation nach Exergie wird ein Grossteil der Umweltauswirkungen des BHKW dem Strom angelastet. Dies führt dazu, dass die Umweltauswirkungen des BHKW Stromes wesentlich höher sind als die Umweltauswirkungen des Schweizer Strommix für WP, der damit ersetzt wird. Entsprechend wird mehr Belastung der Wärmebereitstellung zugeschrieben. Je höher der Stromanteil beim BHKW ist, desto stärker ist dieser Effekt. Dies zeigen die Resultate für das grössere BHKW mit einem Stromanteil von 33 % im Vergleich zum Mini-BHKW mit 25 % Stromanteil.
- Der gesamte, ungewichtete Wirkungsgrad der BHKW liegen zwischen 85 % und 90 %, während dieser bei der Gasheizung über 95 % beträgt.

Da die Unterschiede zwischen den Allokationen so gross sind, stellt sich die Frage, welches die «richtige» bzw. die adäquate Allokation ist. Um eine Antwort darauf zu finden, wurde der Frage nachgegangen, wie hoch die Umweltauswirkung für die Bereitstellung einer kWh Wärme wäre, falls der Strom des BHKWs mit einer WP ebenfalls in Wärme umgewandelt würde. Diese zusätzliche Modellierung berücksichtigt die Wertigkeit des Stromes ohne die Exergie zu verwenden. Die Resultate dieser Berechnungen sind in Abbildung 25 dargestellt und zeigen, dass die Wärmebereitstellung mit dem BHKW signifikant geringere Umweltauswirkungen verursacht als die Erdgasfeuerung, wobei die Auswirkungen abhängig von der Annahme zu den JAZ der WP sind. Diese Systeme weisen in etwa dieselben Umweltauswirkungen wie die WP mit den entsprechenden JAZ auf. Da die anderen gesamtaggregierenden Methoden ein sehr ähnliches Bild zeigen, werden diese Resultate nicht dargestellt. Ebenso sind die Resultate für das grössere BHKW praktisch identisch.

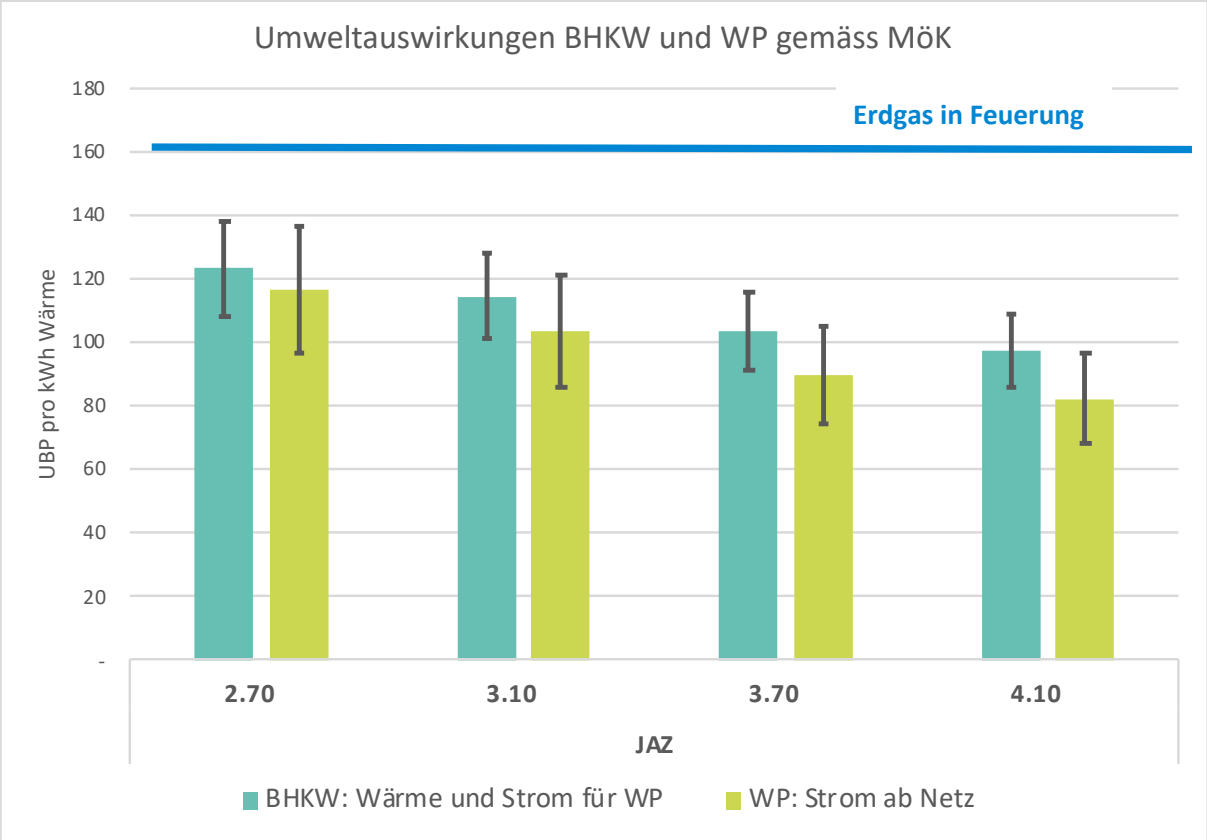

Abbildung 25: Umweltauswirkungen einer kWh Wärme ab WP und ab BHKW für ein EFH, falls der Strom des BHKW für die Wärmeerzeugung mit einer WP verwendet wird.

In Abbildung 26 sind die Resultate für die Auswirkungen auf das Klima dargestellt. Diese zeigen eine signifikant höhere Klimabelastung durch das BHKW gegenüber der WP.

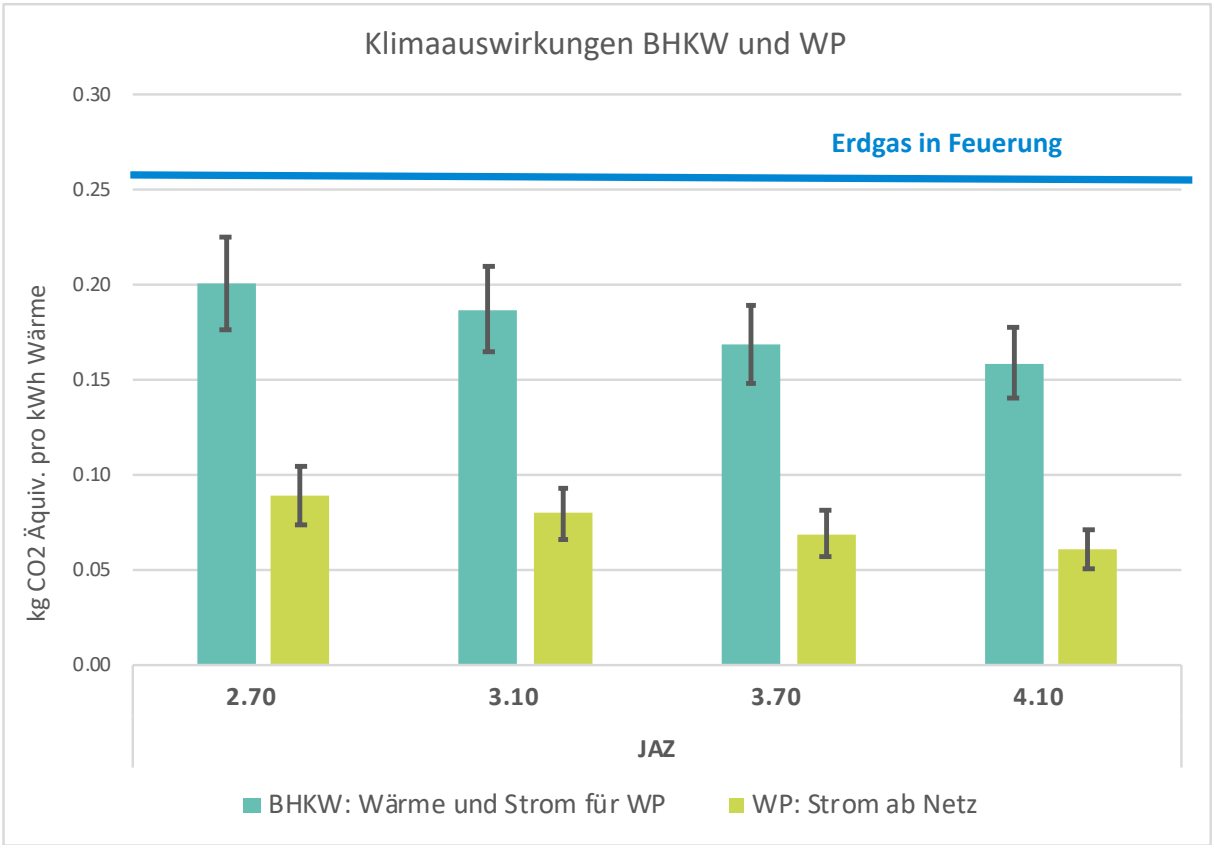

Abbildung 26: Klimaauswirkungen einer kWh Wärme ab WP und ab BHKW, falls der Strom des BHKW für die Wärmeerzeugung mit einer WP verwendet wird.

Die Resultate dieser Betrachtung zeigen kein klares Bild, welche Allokationsart die «richtige» ist, da die gesamten Umweltauswirkungen des BHKW, falls der Strom für die Erzeugung von Wärme mit einer WP genutzt wird, zwischen den Umweltauswirkungen der beiden Allokationsarten (Exergie und Substitution) liegen.

4.3.5 Einfluss der Allokation bei der Verwertung bzw. Entsorgung

In Abbildung 27 sind die Klimaauswirkungen und in Abbildung 28 die Umweltauswirkungen gemessen mit der Methode der ökologischen Knappheit in UBP dargestellt.
Die Resultate mit beiden Methoden zeigen, dass die Allokation die Resultate stark beeinflusst. Die Resultate mit der Cut-Off Allokation weisen rund die Hälfte der Auswirkungen aus verglichen mit den Resultaten der ökonomischen Allokation. Bezüglich des Vergleiches der Wärme ab einer Biogas-Feuerung und der Fernwärme ab KVA mit 10 % Erdgas zur Spitzenabdeckung ergeben sich jedoch keine Veränderung.

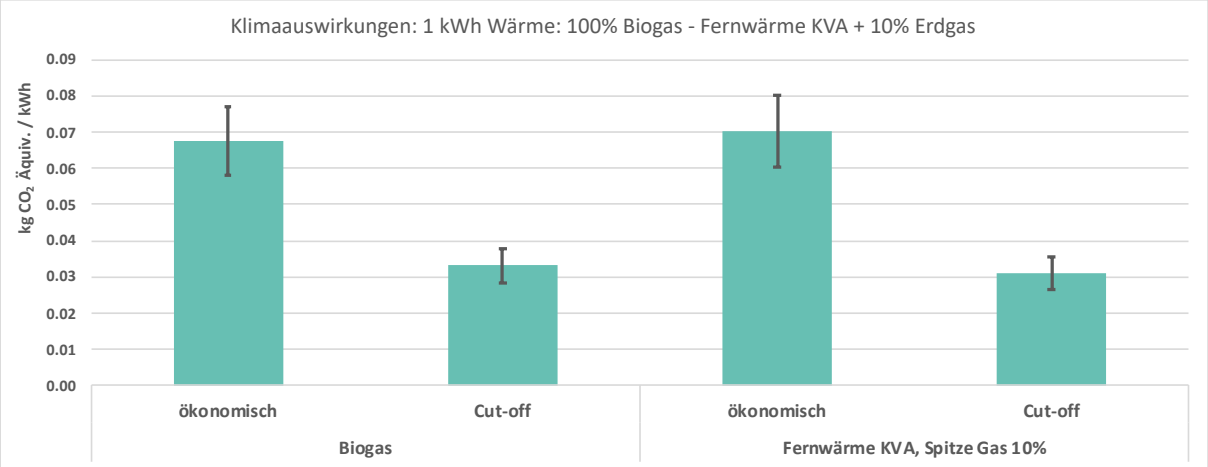

Abbildung 27: Klimaauswirkungen einer kWh Wärme ab Biogas in Feuerung bzw. Fernwärme ab KVA mit 10 % Erdgas Spitze mit zwei verschiedenen Allokationsmethoden.

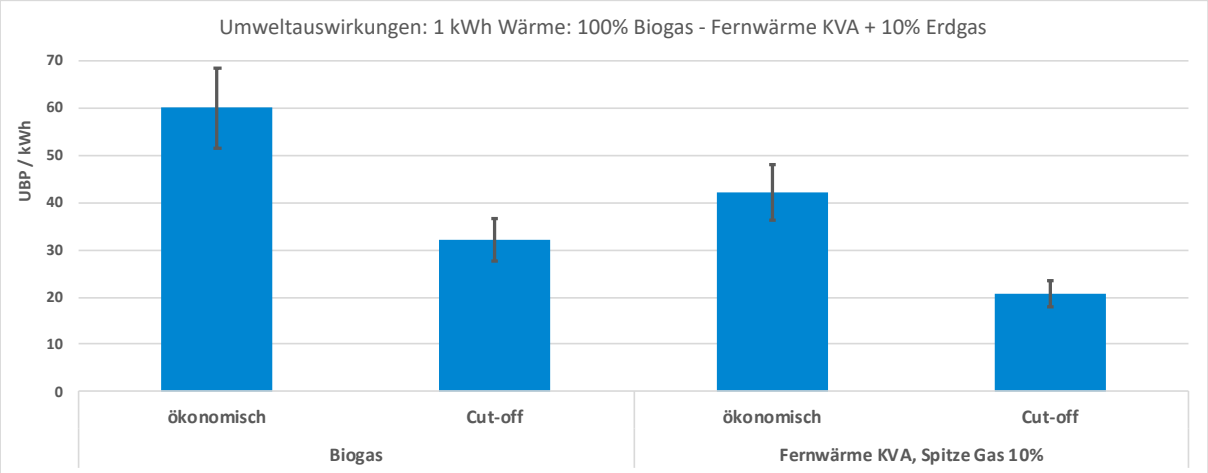

Abbildung 28: Umweltauswirkungen gemessen in UBP einer kWh Wärme ab Biogas in Feuerung bzw. Fernwärme ab KVA mit 10 % Erdgas Spitze mit zwei verschiedenen Allokationsmethoden.

Der Vergleich zu den anderen Heizsystemen zeigt

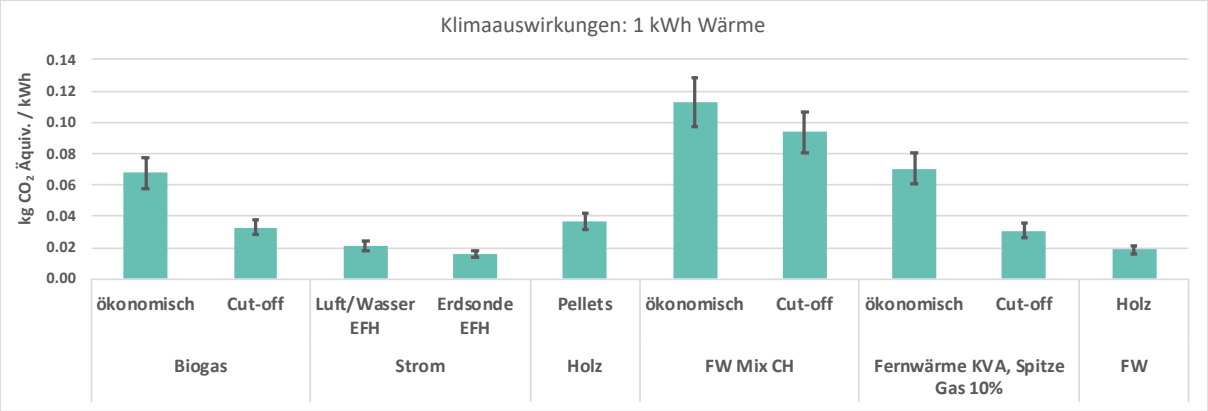

Abbildung 29 bzw. Abbildung 30. Um die Unterschiede besser sichtbar zu machen, wurde die Ölfeuerung nicht dargestellt. Diese Vergleiche zeigen, dass mit der Cut-off Allokation sowohl die KVA mit 10 % wie auch die Biogasfeuerung bezüglich der Auswirkungen auf das Klima den Besten, Wärmepumpen und Fernwärme

ab Holzfeuerung, ziemlich nahekommen. Bezüglich der gesamten Umweltauswirkungen gehören sie zu den Besten.
Zu beachten ist, dass die Cut-off-Allokation bei der KVA als sinnvoll betrachtet wird, während die Cut-off Allokation aus biogenen Reststoffen eher nicht zu empfehlen ist, da es sich dabei nicht um eine gesetzlich vorgeschriebene Entsorgung handelt, sondern um eine Verwertung, welche gemacht wird, um Biogas zu gewinnen.

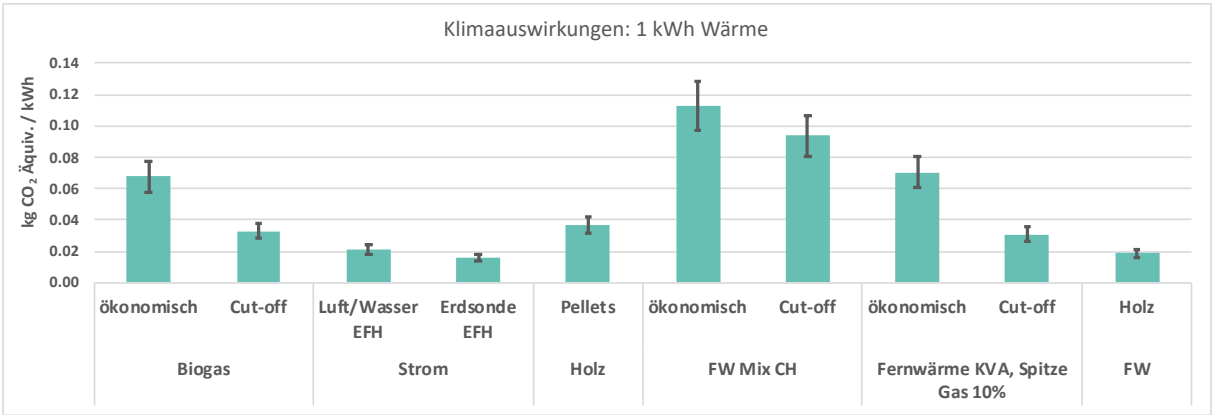

Abbildung 29: Klimaauswirkungen einer kWh Wärme mit erneuerbaren Energieträgern; Allokation Cut-off bei: Biogas in Feuerung und Fernwärme ab KVA mit 10 % Erdgas Spitze.

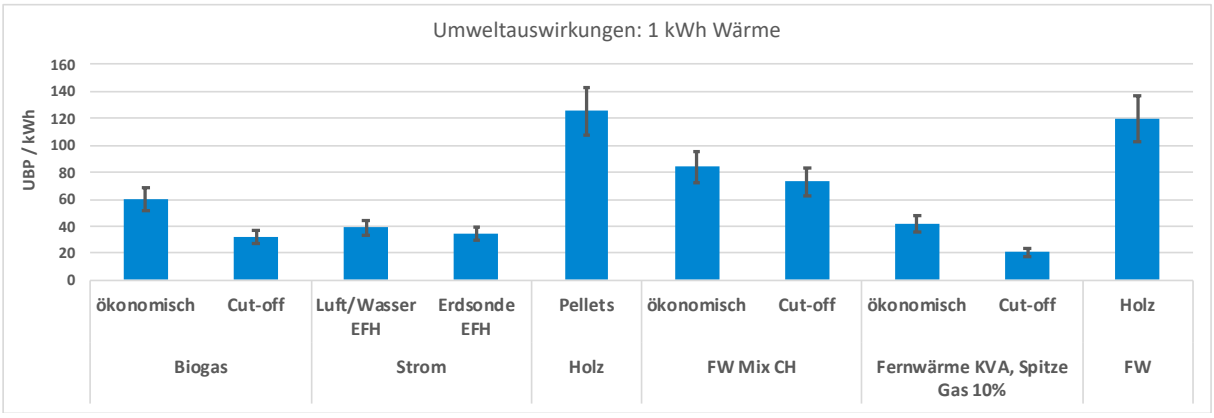

Abbildung 30: Klimaauswirkungen einer kWh Wärme; Allokation Cut-off bei: Biogas in Feuerung und Fernwärme ab KVA mit 10 % Erdgas Spitze.

5 Schlussfolgerungen

Aus einer gesamt ökologischen Sicht, welche sowohl die Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit, die Ökosysteme, das Klima wie auch die Ressourcen berücksichtigt, lassen sich die untersuchten Heizungssysteme in drei Klassen einteilen: einige mit tiefer Belastungen, ein Mittelfeld und wenige mit hohen Belastungen.

In die **Klasse mit geringen Belastungen**[5] gehören die folgenden Heizungssysteme:

- Fernwärme ab KVA
- BHKW mit der Allokation nach Exergie
- Fernwärme CH mix, mit Zertifikat 100 % erneuerbar
- Gasfeuerungen mit 100 % Biogas aus Abfällen und Reststoffen
- BHKW mit 100 % Biogas
- Hybridheizung: 100 % Biogas und Wärmepumpe
- Wärmepumpen, welche mit Ökostrom betrieben werden

Zu beachten ist, dass

- die Fernwärme wie auch die Gasfeuerung mit 100 % Biogas nur begrenzt ausbaufähig und nur dort verfügbar sind, wo die entsprechenden Infrastrukturen, Fernwärme- oder Gasnetz, bestehen.
- Wärme ab BHKW so gut abschneidet, weil bei der Allokation nach Exergie der Hauptteil der Belastungen dem Strom angerechnet wird, welcher in dem Falle eine höhere Belastung als Netzstrom hat.

Bei einem **Fokus auf das Klima** gehören zusätzlich noch die Holzfeuerungen und die Wärmepumpen mit heutigem Netzstrom zu den besten Systemen. Dafür gehört das BHKW nur dann in diese Klasse, wenn mindesten 30 % Biogas zum Einsatz kommt.

Im **Mittelfeld**[6] befinden sich die folgenden Systeme:

- Wärmepumpen, welche mit heutigem Netzstrom betrieben werden
- Fernwärme, Durchschnitt CH
- Fernwärme, ab Holzfeuerung
- Holzfeuerungen
- Erdgas-Wärmepumpen
- Erdgasfeuerungen, wenn diese einen Biogasanteil von 30 % haben, wie dies für 2035 geplant ist.

Die Umweltauswirkungen der Wärmepumpen sind im Wesentlichen von den zwei Faktoren JAZ und Art der Strombereitstellung bestimmt. Bei einer höheren JAZ, wie diese Erdsonden-WP aufweisen, sinken die Umweltauswirkungen. Ebenso ergibt sich eine Reduktion der Umweltauswirkungen, wenn Gas- oder andere Heizungen mit Solarwärme oder WP-Boiler mit PV-Strom kombiniert werden.

Bei einem **Fokus auf das Klima** gehört nur die folgenden Systeme in diese Klasse:

- BHKW mit der Allokation nach Exergie
- Hybridheizung: Wärmepumpe & Gas
- Fernwärme, Durchschnitt CH
- Gas-Wärmepumpe mit 30 % Biogas Anteil
- Erdgasfeuerung mit einem Biogasanteil von 30 %, kombiniert mit einem PV&WP-Boiler

[5] Umweltauswirkungen < 30 % des Heizsystems mit der höchsten Umweltbelastung (Ölheizung 2017)

[6] Umweltauswirkungen > 30 % und < 50 % des Heizsystems mit der höchsten Umweltbelastung (Ölheizung 2017)

In die **Klasse mit den höchsten Belastungen** zählen die Ölheizungen, auch wenn diese 20 % biogene Öle aus Reststoffen und Abfällen verwenden (Ölfeuerung Zertifikat). Ebenfalls in diese Klasse gehören die Gasfeuerungen, welche mit 100 % Erdgas betrieben werden, obwohl deren Umweltauswirkungen rund 40 % geringer sind als diejenigen der Ölheizungen.

Beim Fokus auf das Klima fällt auch Gasfeuerung mit 30 % Biogas in die Klasse mit den höchsten Belastungen.

Methodisches

Alle drei betrachteten gesamtaggregierenden Methoden zeigen ein vergleichbares Bild. Ausnahmen bilden die Holzfeuerungen, welche bei der Methode ILCD auf Grund der Partikelemissionen schlechter bewertet werden als mit den anderen Methoden. Die obigen Einstufungen basieren auf den Resultaten der Methoden MöK und Impact 2002+.
Beim Fokus auf das Klima schneiden die Holzheizungen erwartungsgemäss sehr gut ab und gehören zu den besten der untersuchten Systeme. Ebenso werden strombetrieben WP besser bewertet und gehören zu den Heizungssystemen mit den geringsten klimarelevanten Auswirkungen.
Je nach Allokationsmethode liegen die BHKW bei den Systemen mit den geringsten Belastungen oder bei den schlechtesten im Mittelfeld. Auf der Basis einer detaillierten Analyse erachten die Autoren eine Allokationsart am adäquatesten, welche die BHKW zu den Besten im Mittelfeld einordnet.

2035: Zu erwartende Optimierungspotentiale

Sensitivitätsrechnungen haben folgende Optimierungspotentiale gezeigt:

- WP werden in Zukunft geringere Umweltauswirkungen haben, falls der politische Wille und die internationalen Verpflichtungen umgesetzt werden und damit die Strombereitstellung mit geringeren Umweltauswirkungen verbunden sein wird. Schon heute können mit der Wahl eines ökologischen Stromproduktes die Umweltauswirkungen von WP markant reduziert werden.
- Zudem ist zu erwarten, dass in Zukunft die JAZ von WP weiter erhöht werden können.
- Die Analyse der besten Biogasanlage der Schweiz zeigte, dass hier noch Optimierungspotential besteht. Inwiefern beim Zubau von Biogasanlagen diese Optimierungsmassnahmen umgesetzt werden können, wurde nicht weiter untersucht. Der VSG hat sich zum Ziel gesetzt bis 2030 einen Biogasanteil von 30 % im gasversorgten Wärmemarkt für Haushalte zu erreichen. Dies führt zu einer Reduktion der Umweltauswirkungen von Gassystemen von rund 20 %.
- Eine Sanierung der Gebäudehülle führt neben dem wesentlichen Nutzen des geringeren Energiebedarfs bei den WP-Systemen zudem zu einer Reduktion von rund 10 % der Umweltauswirkungen, da die Vorlauftemperatur gesenkt werden kann.

Gemäss Aussage von Heizungsherstellern ist bei den fossilen Feuerungssystemen nicht mit wesentlichen Verbesserungen zu rechnen. Die Wirkungsgrade sind schon sehr hoch und die Emissionen weitgehend optimiert. Bei der nichtkonventionellen Gewinnung von Öl und Gas ist zudem mit erhöhten Umweltbelastungen aus der Vorkette zu rechnen. Welcher Anteil z.B. von Öl aus Ölschiefer oder Ölsand in Zukunft zu erwarten ist und wie gross der Einfluss auf die Resultate ist, wurde im Rahmen dieses Projektes nicht abgeklärt.

Einsatz erneuerbarer Energiequellen

Durch den Einsatz von erneuerbaren Energiequellen werden die Umweltauswirkungen von WP und Gassystemen um bis zu 70 % reduziert. Entsprechend sind diese Energieträger sehr zu empfehlen. Dabei ist zu beachten, dass diese hohe Reduktion für Biogas nur dann gilt, wenn dieses aus Reststoffen und Abfällen produziert wird und entsprechend begrenzt ist.

Ausblick

Die vorliegende Studie ermöglicht eine Einordnung der unterschiedlichen Heizungssysteme aus ökologischer Sicht. Jedoch kann nicht jedes dieser Systeme überall realisiert werden. Hinderungsgründe können die Verfügbarkeit von Infrastruktur, wie Fernwärme oder Gasnetze sein, wie auch das Potential von Rohstoffen zur Bereitstellung von Energieträgern, wie Abfälle und Reststoffe sowie Holz. Zudem ist es nicht überall möglich Grundwasser-WP zu installieren.

In diesem Zusammenhang wäre die Kombination einer Potentialstudie mit den Ergebnissen dieser Ökobilanz interessant. Damit könnte das Potential für die Zukunft ermittelt werden, welches als Basis für die Energiestrategie dienen kann.

Bei der Modellierung von Biogas aus Gülle sind noch gewisse Fragen offen, welche im Rahmen dieses Projektes nicht geklärt werden konnten. Diese haben auf die Resultate dieses Projektes einen vernachlässigbaren Einfluss, können jedoch bei anderen Fragestellungen relevant sein. Daher wäre eine Klärung wünschbar.

6 Literatur

Dinkel, F., Bunge, R., Kägi, T., Pohl, T., & Stäubli, A. (2018). KuRVe (Kunststoff Recycling und Verwertung) Ökonomisch-ökologische Analyse von Sammel- und Verwertungssystemen von Kunststoffen aus Haushalten in der Schweiz. Bern: BAFU.

ecoinvent. (2018). ecoinvent 2018: Version 3.5. Swiss Centre for Life Cycle Inventories.

European Commission-Joint Research Centre. (2011). International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook - Recommendations for Life Cycle Impact Assessment in the European context. (No. First edition November 2011. EUR 24571 EN.). Luxemburg: Publications Office of the European Union; 2011.

FOEN. (2018, Winter). Switzerland's Greenhouse Gas Inventory; National Inventory report 2018.

Frischknecht R., & Büsser Knöpfel S. (2013). Ökofaktoren Schweiz 2013 gemäss der Methode der Ökologischen Knappheit - Methodische Grundlagen und Anwendung auf die Schweiz (No. 1330) (S. 256). Bern: Bundesamt für Umwelt.

Goedkoop, M., Effting, S., & Collignon, M. (2000). The Eco-indicator 99: A Damage Oriented Method for Lifecycle Impact Assessment: Manual for Designers. PRé Consultants.

Heijungs, R., Guinée, J. B., & voor Milieukunde, C. (1992a). Environmental life cycle assessment of products: backgrounds. Centre of Environmental Science. Abgerufen von http://www.getcited.org/pub/100287768

Heijungs, R., Guinée, J. B., & voor Milieukunde, C. (1992b). Environmental life cycle assessment of products: backgrounds. Centre of Environmental Science. Abgerufen von http://www.getcited.org/pub/100287768

Huppes, G., & van Oers, L. (2011). Evaluation of Weighting Methods for Measuring the EU-27 Overall Environmental Impact. Joint research centre, European Commission.

IPCC. (2013). Climate Change 2013. The Physical Science Basis. Working Group I contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Abgerufen von www.climatechange2013.org

ISO 14040. (2006). Environmental management–Life cycle assessment–Requirements and guidelines. Geneva.

ISO 14044. (2006). Environmental management–Life cycle assessment–Principles and framework. Geneva.

Joint research Centre, European Commission. (2014). JRC Technical Report. Normalisation method and data for environmental footprints. Deliverable 2.

Joint Research Centre. (2012, February). Characterisation factors of the ILCD Recommended Life Cycle Impact Assessment methods. Database and Supporting Information. First edition. EUR 25167. European Commission, , Institute for Environment and Sustainability. Publications Office of the European Union; 2012.

Jolliet, O., Margni, M., Charles, R., Humbert, S., Payet, J., Rebitzer, G., u. a. (2003). IMPACT 2002+: A new life cycle impact assessment methodology. The International Journal of Life Cycle Assessment, 8(6), 324–330.

Kägi, T., Dinkel, F., Frischknecht, R., Humbert, S., Lindberg, J., De Mester, S., u. a. (2016). Session "Midpoint, endpoint or single score for decision-making?"—SETAC Europe 25th Annual Meeting, May 5th, 2015. Conference Session Report. Int J Life Cycle Assess, 21(1), 129–132. http://doi.org/10.1007/s11367-015-0998-0

Kägi, T., Zschokke, M., & Dinkel, F. (2019). Technical Report: Life Cycle Inventories for Biogas and Biomethane Processes. On behalf of VSG.

PRé Consultants. (2017). SimaPro 8 (Version 8.3.0). PRé Consultants.

Anhang

A1 Steckbriefe

Name und Beschrieb	**Öl-Brennwertheizung (rein fossil oder mit 20 % Bio-Öl)**	
Nutzungsgrad	90 % (Raumwärme und Warmwasser)	
Lebensdauer	20 Jahre	
Anpassungen ecoinvent	keine	
Wichtigste Verbrennungsemissionen	rein fossil:	
	In kg / MJ Nutzwärme	
	CO_2:	0.082
	NO_x:	3.05E-5
	SO_2:	5.1E-5
	Hg:	5.5E-10
	N_2O:	7.8E-7
	PM <2.5:	5.5E-7
	Benzen:	2.2E-8
	CO:	10E-6
	Aliphatische Kohlenwasserstoffe:	3.2E-7
	CH_4:	2.2E-7
	NMVOC:	?

Name und Beschrieb	**Erdgas-Brennwertheizung (rein fossil oder mit 30 % oder 100 % Biogas)**	
Nutzungsgrad	95 % (Raumwärme und Warmwasser)	
Lebensdauer	20 Jahre	
Anpassungen ecoinvent	Rein fossil: keine Anpassung 30 % Biogas und 100 % Biogas: Vorkette für Biogas sowie entsprechende Mengen CO2 fossil -> CO2 biogen	
Wichtigste Verbrennungsemissionen	rein fossil:	
	In kg / MJ Nutzwärme	
	CO_2:	0.058
	CH_4:	2.06E-6
	NO_x:	10.2E-6
	SO_2:	5.2E-7
	Benzen:	4.1E-7
	PM < 2.5 µm	10.3E-8
	N_2O:	5.2E-7
	Hg:	3.1E-11
	Benzo(a)pyren:	10.3E-12
	C_3H_8:	2.1E-7

Name und Beschrieb	**Erdgas-Brennwertheizung mit Solarwärme für Warmwasser**
Nutzungsgrad Erdgas	95 % (Raumwärme und Warmwasser)
Fläche Solarkollektoren	5 m² für EFH, 15 m² für MFH
Lebensdauer	20 Jahre
Anpassungen ecoinvent	Neuer Prozess aus ecoinvent-Prozessen

Name und Beschrieb	**Erdgas-Brennwertheizung mit Wärmepumpen-Boiler und Strom aus Photovoltaik**
Nutzungsgrad Erdgas	95 % (Raumwärme und Warmwasser)
Photovoltaik	2 kW_p für EFH, 3.5 kW_p für MFH (Kleinst-Anlagen, um MuKEn Modul F günstig zu erfüllen), 950 kWh/kW_p
Wärmepumpenboiler	0.5 kW elektrische Leistung für EFH, 2 kW für MFH (normale Wärmepumpe für Warmwasser im MFH, weil es dafür keine WP-Boiler gibt)
Lebensdauer	20 Jahre
Anpassungen ecoinvent	Neuer Prozess aus ecoinvent-Prozessen

Name und Beschrieb	**Hybridheizung (Wärmepumpe und Gas)**
EFH Altbau	— Standard: 9 kW, JAZ 2.7, Wirkungsgrad 95 % — Sensitivität: 7.5 kW, JAZ 3.1 — Anteil Gas ca. 35 % (Standardeinstellungen bei Hybridheizungen EFH)
MFH Altbau	— Standard: 28 kW, JAZ 3.0, Wirkungsgrad 95 % — Sensitivität: 21 kW, JAZ 3.7 — Anteil Gas ca. 50 %, da bei grösseren Anlagen keine Hybridheizungen zur Verfügung stehen, sondern zusammengestellt werden und hier davon ausgegangen wird, dass Investitionskosten optimiert werden und damit einer höherer Anteil Gas resultiert als beim EFH.
Lebensdauer	20 Jahre
Anpassungen ecoinvent	WP: JAZ, Kühlmittel und Verluste sowie Elektrizitäts-Mix, bei Gas keine

Name und Beschrieb	**Gaswärmepumpe (nur für MFH, weil derzeit für EFH nicht verfügbar)**
MFH Altbau	— Standard: 28 kW, JAZ 1.4 — Sensitivität: 21 kW, JAZ 1.5
Lebensdauer	20 Jahre
Anpassungen ecoinvent	JAZ bei der Sensitivität

Wichtigste Verbrennungsemissionen	in kg / MJ Nutzwärme	
	CO_2:	0.0424
	NO_x:	7.5E-6
	Benzen:	3.03E-7
	N_2O:	3.79E-7
	CH_4:	1.52E-6
	C_3H_8:	9.09E-7
	PM < 2.5 µm:	7.58E-8
	PAH, Polycyclische aromatische Kohlenwasserstoffe:	7.58E-9
	SO_2:	3.79E-7
	C_4H_{10}:	5.30E-7
	Hg:	2.27E-11

Name und Beschrieb	**Wärmepumpe Luft/Wasser**
EFH Altbau	— Standard: 9 kW, JAZ 2.7 — Sensitivität: 7.5 kW, JAZ 3.1
MFH Altbau	— Standard: 28 kW, JAZ 3.0 — Sensitivität: 21 kW, JAZ 3.7
Lebensdauer	20 Jahre
Anpassungen ecoinvent	JAZ, Kühlmittel und Verluste sowie Elektrizitäts-Mix

Name und Beschrieb	**Wärmepumpe Erdsonde (S/W)**
EFH Altbau	— Standard: 9 kW, JAZ 3.2 — Sensitivität: 7.5 kW, JAZ 3.9
MFH Altbau	— Standard: 28 kW, JAZ 3.4 — Sensitivität: 21 kW, JAZ 4.1
Lebensdauer	20 Jahre für die Heizung, 30 Jahre für die Bohrung
Anpassungen ecoinvent	JAZ, Kühlmittel und Verluste sowie Elektrizitäts-Mix

Name und Beschrieb	**Wärmepumpe Grundwasser (W/W)**
Neubau Areal	Leistung 950 kW, JAZ 5.5 (35/28)
Lebensdauer	20 Jahre für Wärmepumpe, 40 Jahre für das Netz
Anpassungen ecoinvent	JAZ, Kühlmittel und Verluste sowie Elektrizitäts-Mix

Name und Beschrieb	**Holzfeuerung (Pellet)**
Nutzungsgrad	Wirkungsgrad 85 %
Lebensdauer	20 Jahre
Anpassungen ecoinvent	keine

Wichtigste Verbrennungsemissionen	in kg / MJ Nutzwärme	
	PM < 2.5 µm:	4.8E-5
	2,3,7,8-Tetrachlordibenzodioxin:	4.13E-14
	NO_x:	8.0E-5
	Zn:	4.0E-7
	Benzen:	1.21E-6
	Pb:	3.33E-8
	N_2O:	4.0E-6
	NMVOC:	3.54E-5
	Cd:	9.33E-10
	PM > 2.5 µm und < 10 µm:	2.67E-6
	CH_4:	1.52E-5

Name und Beschrieb	**Fernwärme (KVA mit Gas-Spitzendeckung 10 %)**
Wirkungsgrad	99 %
Lebensdauer	20 Jahre (für Anschluss bzw. über Vertrag-Laufzeit)
Anpassungen ecoinvent	Neuer Prozess aus den ecoinvent-Prozessen KVA und Gas

Name und Beschrieb	**Fernwärme (Holzschnitzel ohne Gas-Spitzendeckung)**
Wirkungsgrad	99 %
Lebensdauer	20 Jahre (für Anschluss bzw. über Vertrag-Laufzeit)

Name und Beschrieb	**Blockheizkraftwerk Erdgas**
Wirkungsgrad	Wirkungsgrad Wärme 50 %, Wirkungsgrad elektrisch 30 %
EFH Altbau	Standard: 9 kW_{th}, 3 kW_{el}, Sensitivität 7.5 kW_{th}, 2.5 kW_{el}
MFH Altbau	Standard: 28 kW_{th}, 11 kW_{el}, Sensitivität 21 kW_{th}, 7 kW_{el}
Annahmen Areal Neubau	Leistung: 965 kW_{th}, 366 kW_{el}
Lebensdauer	20 Jahre für Kraftwerk, 40 Jahre für das Netz
Anpassungen ecoinvent	Standard keine Anpassung Sensitivität Allokation angepasst: Substitution Strom-Mix WP CH statt Exergie

Wichtigste Verbrennungsemissionen	in kg / MJ Nutzwärme	
	CO_2:	5.60E-2
	CH_4:	8.00E-5
	NO_x:	7.00E-5
	N_2O:	5.00E-6
	SO_2:	5.50E-7
	NMVOC:	1.00E-5
	PM < 2.5 µm:	1.50E-7
	CO:	1.60E-4

Name und Beschrieb	**Holzfeuerung (Holzschnitzel)**:	
Wirkungsgrad	75 %	
Lebensdauer	20 Jahre für die Feuerung, 40 Jahre für das Netz	
Anpassungen ecoinvent	keine	
Wichtigste Verbrennungsemissionen	in kg / MJ Nutzwärme	
	PM < 2.5 µm:	3.375E-5
	NO_x:	8.75E-5
	2,3,7,8-Tetrachlordibenzodioxin:	3.875E-14
	Zn:	3.75E-7
	Benzen:	1.1375E-6
	Pb:	3.125E-8
	N_2O:	3.125E-6
	Cd:	8.75E-10
	PM > 2.5 µm und < 10 µm:	1.875E-6
	NH_3:	2.1625E-6
	NMVOC:	7.0E-6
	Hg:	3.75E-10

A2 Hintergründe zur Ökobilanzierung

A2.1 Vorgehen bei der Ökobilanzierung

Nach ISO 14'040/44 (ISO 14'040 2006) (ISO 14'044 2006) umfasst eine Ökobilanz die folgenden Schritte :

1. Festlegen der Zielsetzungen und Systemgrenzen (Rahmenbedingungen)
2. Erfassen der relevanten Stoff- und Energieströme sowie den Ressourcenbedarf (Sachbilanz)
3. Bestimmen der Auswirkungen auf die Umwelt (Wirkbilanz)
4. Interpretation der Umweltauswirkungen aufgrund der Zielsetzungen (Bewertung)
5. Erarbeiten von Massnahmen (Optimierung)

Wie Abbildung 31 zeigt, ist dies kein linearer Prozess, sondern ein interaktiver Erkenntnis- und Optimierungsprozess.

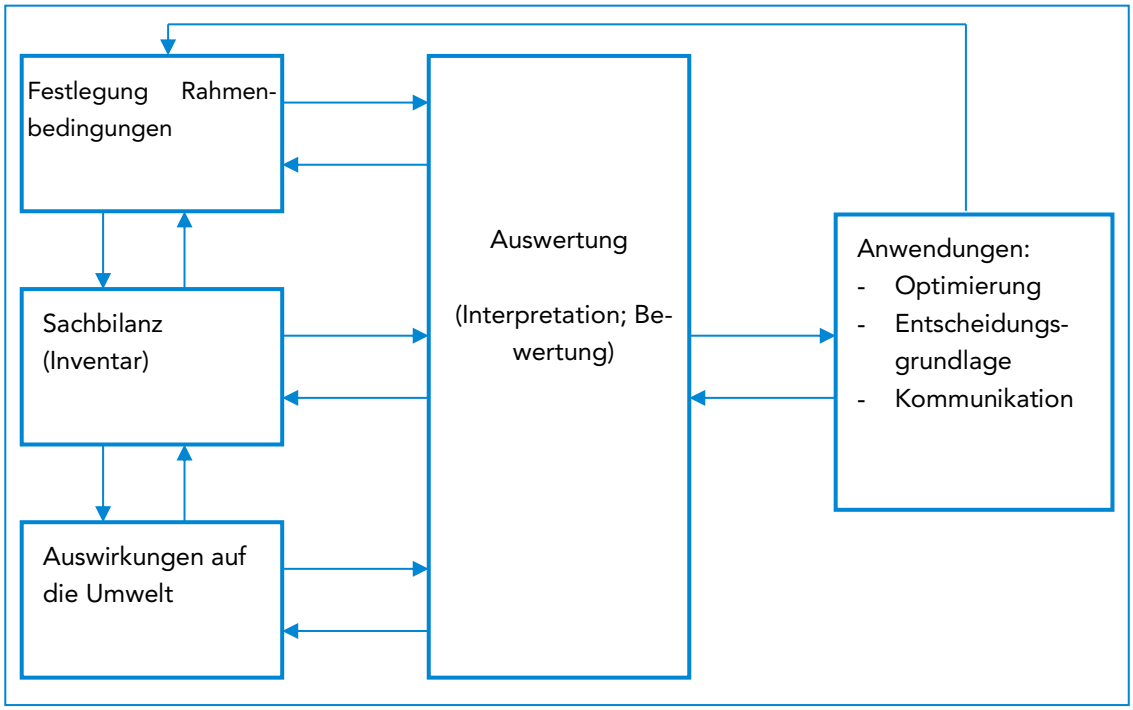

Abbildung 31: Schritte einer Ökobilanz nach ISO 14'040 ff

Die vorliegende Studie richtet sich weitgehend nach der Norm ISO 14'040/44 (ISO 14'040 2006) (ISO 14'044 2006). Das Vorgehen entspricht in den wesentlichen Aspekten deren Anforderungen. Bezüglich der Verwendung von gesamtaggregierenden Bewertungsmethoden, wie dies die Umweltbelastungspunkte (UBP) oder Impact 2002+ sind, ist die Studie nicht in Übereinstimmung mit der Norm.

A2.2 Zielsetzung und Rahmenbedingungen

Die Definition der zu untersuchenden und vergleichenden Systeme hängt von der Zielsetzung bzw. Fragestellung ab. Daraus ergeben sich unterschiedliche Rahmenbedingungen und Systemgrenzen. Die Systemgrenzen definieren, welche Prozesse und vorgelagerten Prozesse berücksichtigt werden. Dabei müssen der zeitliche und geographische Rahmen der verwendeten Daten sowie die zu untersuchenden Umweltauswirkungen festgelegt werden. Dies ist der erste und ein entscheidender Schritt bei der Erstellung einer Ökobilanz. In diesem Schritt werden u.a. Folgendes festgelegt:

Funktionelle Einheit
Damit nicht Äpfel mit Birnen verglichen werden, können verschiedene Produkte oder Prozesse nur dann verglichen werden, wenn diese dieselbe Funktion erfüllen. Entsprechend wird die Vergleichsbasis in Ökobilanzen als funktionelle Einheit bezeichnet. Bei den in dieser Studie untersuchten Wärmeerzeugungssystemen bietet sich als funktionelle Einheit eine Energieeinheit an.

Systemgrenzen
Die Systemgrenzen definieren, welche Prozesse und vorgelagerten Prozesse berücksichtigt werden. Weiter müssen der zeitliche und geographische Rahmen der verwendeten Daten sowie die zu untersuchenden Umweltauswirkungen festgelegt werden.

A2.3 Sachbilanz

In der Sachbilanz wird ein Modell für das zu bilanzierende System entworfen und es werden die Energie- und Stoffflüsse der damit verbundenen Prozesse erfasst. Diese umfassen:

- Die Beziehungen eines Prozesses mit anderen Prozessen der Technosphäre, wie z. B. Menge an benötigten Rohmaterialien, Hilfsstoffen, Energiebedarf, Transporte oder Verwertungs- beziehungsweise Entsorgungssysteme

- Die Beziehungen eines Prozesses mit seiner natürlichen Umwelt der Ökosphäre, wie z. B. Bedarf an Ressourcen (fossile Energieträger, Landressourcen etc.) und Emissionen, wie z. B. CO_2, VOC, Methan, Stickoxide u. a.

Um die Material- und Energieflüsse der vorgelagerten Prozesse, wie z. B. Herstellung von Werkstoffen oder Bereitstellung von Energieträgern, werden die Vordergrunddaten mit Daten aus Ökobilanzdatenbanken verknüpft. Diese Daten werden mit Hintergrunddaten bezeichnet.

Allokation
Die Frage der Allokation stellt sich dann, wenn ein Produktsystem neben dem eigentlichen, über die funktionelle Einheit abgebildeten Nutzen, weitere Zusatznutzen erbringt. Dies ist der Fall, wenn das untersuchte Produktsystem Energie- und Materialflüsse für andere Produktsysteme bereitstellt oder Abfälle verwertet.
In dieser Studie tritt dies z.B. beim BHKW auf, welches neben Wärme ebenfalls Strom bereitstellt. Entsprechend stellt sich die Frage, wie die Umweltauswirkungen des gesamten BHKW Prozesses, also Emissionen, Bereitstellung der Energieträger, Infrastruktur etc. auf die beiden Energieprodukte aufgeteilt werden können. Diese Aufteilung der Umwelteinwirkungen wird als Allokation bezeichnet.

Es gibt verschiedene Möglichkeiten der Allokation:

- Substitutionsprinzip
- Aufteilung der Umweltauswirkungen

Substitutionsprinzip

Es werden die Mengen an Umwelteinwirkungen von denen des Prozesses abgezogen, welche entstehen würden, wenn *die gleiche Menge des entsprechenden Neben- oder Koppelproduktes auf eine andere Art erzeugt* werden müsste.

Diese Allokationsform hat sich bei vielen Anwendungen als geeignet erwiesen. Im Falle eines BHKW sind folgende Substitutionen möglich:

- Falls Wärme das Produkt ist, dessen Umweltauswirkungen bestimmt werden sollen, so werden die Umweltauswirkungen der Menge Elektrizität von den gesamten Umweltauswirkungen des BHKW abgezogen, welche bei der Produktion der gewünschten Wärmemenge entsteht.
- Falls Strom das Produkt ist, dessen Umweltauswirkungen bestimmt werden sollen, so werden die Umweltauswirkungen der Wärmemenge von den gesamten Umweltauswirkungen des BHKW abgezogen, welche bei der Produktion des gewünschten Stromes entsteht.

Die entscheidende Frage dabei ist, welche Art Strom bzw. Wärme wird durch das BHKW substituiert. Dabei erkennt man auch gleich die Problematiken des Substitutionsansatzes:

- Das Ergebnis ist sehr stark davon abhängig, welche Annahme, bezüglich des Substitutionsproduktes getroffen werden. Wenn davon ausgegangen wird, dass Kohlestrom ersetzt wird, so werden sich ganz andere Resultate ergeben, als wenn davon ausgegangen wird, dass z.B. Wasserstrom ersetzt wird. Dies kann zu Zufälligkeiten oder Willkür führen.
- Die Summe der berechneten Umweltauswirkungen für Strom und einer anderen Berechnung für die Wärme, ergibt nicht zwingend die gesamte Umweltauswirkung des BHKW. Je nach Substitutionsannahmen kann die Summe kleiner oder grösser sein.

Aufteilung der Umwelteinwirkungen

Die Umweltauswirkungen des Prozesses können auch nach einem bestimmten Schlüssel auf die verschiedenen Produkte aufgeteilt werden. Diese Aufteilung kann nach den folgenden Kriterien erfolgen:

- Physikalische Eigenschaften, wie z.B. Energieinhalt, Exergie, Masse, Nährwert oder Volumen. Dabei ist die Funktion der Produkte zu beachten. Der Vorteil dieser Aufteilung besteht darin, dass die physikalischen Eigenschaften nicht von einer Einschätzung des Ökobilanzerstellers oder der Marktsituation abhängen und damit auch in einem veränderten Umfeld stabil sind. Problematisch kann diese Allokationsart sein, wenn es nicht möglich ist eine physikalische Einheit für alle unterschiedlichen Produkte zu finden, welche für das zu untersuchende System sinnvoll ist.
- Ökonomischer Wert der Produkte: Der Charme dieser Allokation besteht darin, dass sie etwas aussagt über die Motivation die unterschiedlichen Produkte herzustellen. Demgegenüber steht das Problem, dass diese Allokation sehr volatil sein kann, da sie u.a. von Märkten abhängt, welche nichts mit den Umweltauswirkungen der untersuchten Systeme zu tun haben müssen.

Im Rahmen dieser Studie wurde für den BHKW Prozess als Basis eine Allokation nach Exergie gewählt. Als Sensitivität wurde zudem eine Allokation nach Substitution gemacht.

A2.4 Wirkbilanz

In diesem Schritt wird die Sachbilanz bezüglich der Auswirkungen auf die Umwelt bewertet. Selbst die Beschränkung auf die „wichtigsten“ Stoffe führt sofort zu unübersichtlichen Zahlentabellen, welche nur schwer oder gar nicht zu interpretieren sind. Zudem sind nicht die Stoffemissionen, sondern deren Auswirkungen auf die Umwelt von Bedeutung. Um diese zu bestimmen, wird folgendermassen vorgegangen:

- Klassifizierung (Einteilung der Einflüsse bezüglich ihrer Auswirkungen)
  Die Stoffe werden nach ihren unterschiedlichen Wirkungen auf die Umwelt gruppiert.
- Charakterisierung (Berechnung der Auswirkungen auf die Umwelt)
  Dabei werden die einzelnen Substanzen entsprechend ihres Schädigungspotentials bezüglich einer Leitsubstanz gegeneinander gewichtet. Daraus ergeben sich die Schädigungspotentiale bezüglich einer bestimmten Umweltauswirkung.

Diese Art der Auswertung basiert auf den Arbeiten der Universität von Leiden (CML) (Heijungs u. a., 1992a) und wird oft als CML Methode zitiert. Diese im Jahre 1992 erstmals publizierte Methode wird bis heute immer weiterentwickelt. Das Joint Research Centre (JRC) hat all die verschiedenen Methoden zur Bestimmung der unterschiedlichen Auswirkungen evaluiert und daraus ein Set von 16 Indikatoren zusammengestellt, welches die Umweltauswirkungen ziemlich umfassend charakterisieren. Diese Methode wird oft als ILCD Methode bezeichnet (Joint Research Centre, 2012).
Es wurden alle 16 Wirkungen nach ILCD berechnet, jedoch nur die folgenden Wirkungen bzw. Aspekte im Anhang speziell ausgewiesen:

Treibhauspotential (THP oder GWP)
: Einfluss auf das Klima infolge der Emission von klimawirksamen Stoffen wie Kohlendioxid (CO_2), Lachgas (N_2O) oder Methan (CH_4). Diese Auswirkung wird gemäss IPCC aus dem Jahr 2013 berechnet und in diesem Bericht ausgewiesen (IPCC, 2013).

Die übrigen Wirkungen wurden als Ausgangsbasis für die nachfolgend beschriebene Bewertung der Gesamtumweltbelastung verwendet.
Die einzelnen Indikatoren der Wirkungsbilanz decken jeweils nur einen Teilbereich der gesamten Umweltauswirkungen ab. Erst die Berücksichtigung der verschiedenen Auswirkungen gibt jedoch ein umfassendes Bild der ökologischen Auswirkungen. Die Berechnung dieser Indikatoren basiert auf wissenschaftlichen Modellen, daher haben diese Indikatoren, auch wenn sie nur einen Teil der Wirkungen abbilden, eine hohe Akzeptanz.
Ein Interpretationsproblem besteht dann, wenn die verschiedenen Auswirkungen unterschiedliche Schlüsse zulassen. So kann zum Beispiel ein untersuchtes Produkt wesentlich geringere Auswirkungen auf das Klima haben als ein anderes, jedoch viel grössere Auswirkungen auf die Gewässer und es stellt sich die Frage, was bei den untersuchten Produkten oder Systemen entscheidend ist. Problematisch dabei ist, dass die Ergebnisse der verschiedenen Wirkkategorien nicht direkt miteinander verglichen werden können. Einerseits sind die Einheiten und damit die Dimensionen unterschiedlich und andererseits wird keine Aussage gemacht, wie problematisch die betreffende Wirkung relativ zur anderen ist.

Bewertung der Umweltauswirkungen

In den vergangenen Jahrzehnten wurden verschiedene Methoden entwickelt, um die einzelnen Umweltauswirkungen zu einer einzigen Kenngrösse zusammenzufassen (siehe auch Abbildung 32). Als Entscheidungshilfe für die Beurteilung werden in dieser Arbeit die folgenden Methoden verwendet, welche die Umweltauswirkungen zu einer Kennzahl (Indikator für die Gesamtumweltbelastung) zusammenfassen:

- Methode der ökologischen Knappheit 2013 (Hauptmethode)
- Impact 2002+
- ILCD v1.10 (Zweitmethode zur Plausibilisierung)

Da die Bewertung der verschiedenen Umweltauswirkungen von Wertmassstäben abhängig ist, werden diese gesamtaggregierenden Methoden teilweise abgelehnt, z. B. auch von der ISO Norm 14'044 für vergleichende Bilanzen, welche für die Öffentlichkeit bestimmt sind. Dabei ist zu beachten, dass auch die Auswahl der Umweltauswirkungen subjektiv ist. Falls nur ein Teil der Auswirkungen, z. B. Kumulierter Energieaufwand (KEA) und Treibhauspotential betrachtet werden, kommt dies einer Gewichtung der anderen Auswirkungen mit Null gleich. Die Betrachtung der einzelnen Wirkkategorien kann durchaus hilfreich sein, z. B. zur Ermittlung der Ursachen von spezifischen Auswirkungen und Erarbeitung von möglichen Optimierungspotentialen. Als Entscheidungsgrundlage oder für die Betrachtung der gesamten Umweltauswirkungen sollten jedoch nicht einzelne Umweltaspekte ausgeklammert werden. Eine Begründung, warum gesamtaggregierende Bewertungsmethoden nicht nur hilfreich, sondern oft notwendig sind, ist z. B. in (Kägi u. a., 2016) zu finden. Da die Gewichtungen von gesamtaggregierenden Methoden typischerweise auf sozio-politischen Entscheiden beruhen, sind diese auch subjektiv und nicht als einzig „richtig“ anzusehen. Sie basieren jedoch typischerweise auf einem umweltpolitischen Konsens und sind damit breiter abgestützt als die subjektiven Bewertungen des Erstellers der spezifischen Ökobilanz und unabhängig von dessen Einschätzungen und Werten. Betreffend der Verwendung von gesamtaggregierenden Methoden richtet sich die vorliegende Studie nicht nach der ISO Norm 14'040. Dies wurde mit den Auftraggebern besprochen, als diese die Verwendung der Methode der ökologischen Knappheit gewünscht haben, weil sie auf der Umweltsituation und den umweltpolitischen Zielen der Schweiz beruht. Die Verwendung verschiedener Bewertungsmethoden erlaubt es, die Aussagekraft der Resultate abzusichern.

Methode der ökologischen Knappheit 2013 (Umweltbelastungspunkte – UBP)

Diese Methode wurde mit dem Ziel entwickelt, die verschiedenen Umweltauswirkungen zu einer einzigen Kenngrösse (Umweltbelastungspunkte) zusammenzufassen. Es handelt sich um eine Stoffflussmethode, bei der neben den bereits bestehenden Belastungen die umweltpolitischen Ziele der Schweiz berücksichtigt werden. Je grösser die Umweltbelastung eines Produktes ist, desto mehr Umweltbelastungspunkte erzeugt seine Bewertung. In diesem Projekt wurde die Version 2013 (Frischknecht R. & Büsser Knöpfel S., 2013) als Hauptbewertungsmethode verwendet.

ILCD v1.10

Das ILCD (International Reference Life Cycle Data System) Handbook (European Commission-Joint Research Centre, 2011) basiert auf den ISO Standards 14'040/44 und liefert Empfehlung für Behörden und Unternehmen hinsichtlich Ökobilanzdaten, -methoden- und -bewertungen mit hoher Qualität und Konsistenz. Die Empfehlungen beinhalten eine Auswahl von 16 Wirkkategorien, basierend auf aktuellsten neuesten Erkenntnissen. ILCD v1.10 beinhaltet auch einen Normalisierungs- (Joint research Center, European Comission, 2014) und Gewichtungsschritt. Für die Gewichtung wurde der Vorschlag einer Studie des Joint research Centre der Europäischen Kommission verwendet (Huppes & van Oers, 2011). Die ILCD v1.10 wurde in dieser Studie als Zweitmethode für die Gesamtumweltbelastung angewendet.

Impact 2002+

IMPACT 2002+ ist eine ursprünglich an der Eidgenössischen Technischen Hochschule Lausanne (EPFL) entwickelte Methodik zur Abschätzung und Bewertung der Auswirkungen von Ökoinventaren. Sie basiert auf der wirkungsorientierten Methode CML (Heijungs u. a., 1992b) sowie der Schadensorientierten Methode Eco-indicator 99 (Goedkoop u. a., 2000). In einem ersten Schritt werden 14 Wirkungskategorien berechnet. Daraus werden anschliessend die Schäden an den folgenden vier Schadenskategorien bestimmt:

- Menschliche Gesundheit
- Ökosysteme
- Klima
- Ressourcen

Diese Schäden werden anschliessend Normalisiert und danach gleichgewichtet zu einem gesamtaggregierenden Indikator zusammengefasst. Für Details wird auf die Publikation der Autoren verwiesen (Jolliet u. a., 2003).

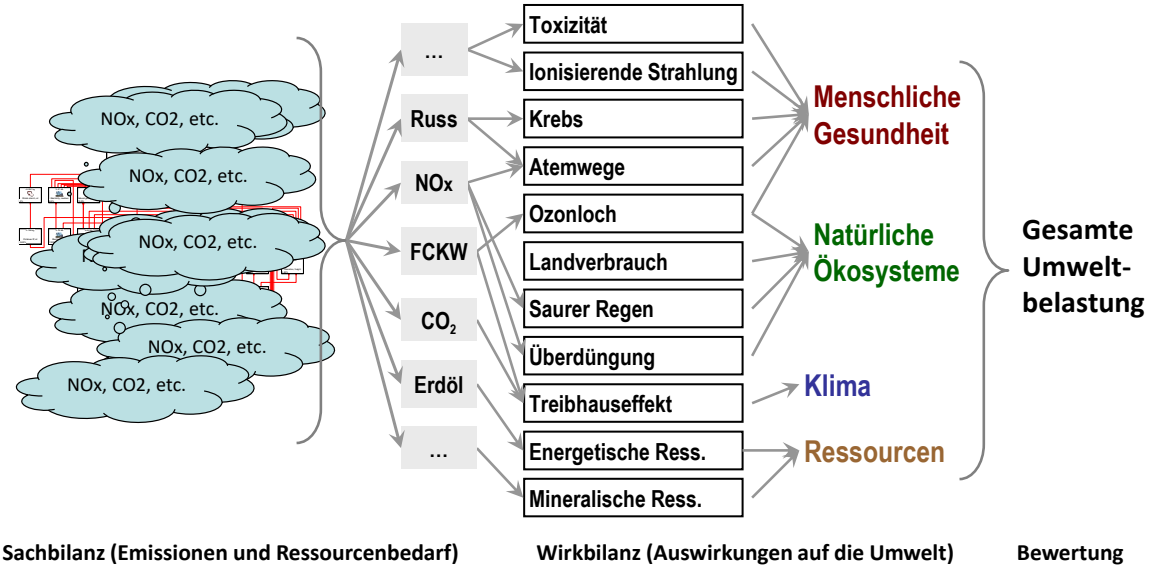

Abbildung 32: Ablauf der Bewertung bei der Ökobilanzierung

A2.5 Unsicherheiten und Signifikanz

Jede Ökobilanz ist mit Unsicherheiten behaftet, welche sich unter anderem aus Unsicherheiten bei der Datenerhebung, wie auch bei der Berechnung der Einwirkungen und Auswirkungen auf die Umwelt ergeben. Diese Unsicherheiten werden soweit möglich erfasst oder zumindest abgeschätzt und ausgewertet. Diese Unsicherheiten werden in den Übersichtsgrafiken als Spannbreiten der Ergebnisse entsprechend ausgewiesen (1 σ Standardabweichung). Bei diesen Spannbreiten handelt es sich um berechnete Werte der Monte Carlo Analyse mit 10‘000 Durchläufen. Diese berücksichtigen jedoch nur die Unsicherheiten der Sachbilanz.

Zudem treten in Ökobilanzen Unsicherheiten aufgrund der gewählten Rahmenbedingungen auf. Diese Art der Unsicherheit wird berücksichtigt, indem die Aussagekraft der Ergebnisse mit Hilfe von Relevanz- und Sensitivitätsanalysen überprüft wird.

A3 Reviewbericht

TRIDEE

Externes Review «Ökologische Bewertung von Heizsystemen»

Prüfbericht erarbeitet 2019 durch Norbert Egli, Tridee GmbH, Andreas Heusler-Strasse 20, 4052 Basel im Auftrag von VSG und Carbotech. Überarbeitete Fassung vom 24. Januar 2020.

Verfasser des geprüften Berichts: Carbotech AG, 4002 Basel.
Geprüfte Fassung des Berichts: v1.31 vom 12. November 2019.
Geprüfte Fassung des zugehörigen «Technical Reports»: v1.1 vom 18. Oktober 2019.

Der Unterzeichnende erhielt von den Auftraggebern am 31. Januar 2019 den Auftrag, als externer Sachverständiger eine kritische Prüfung des ökologischen Teils der Studie «Ökologische Bewertung von Heizsystemen» durchzuführen. der vorliegende Prüfbericht enthält die Ergebnisse der kritischen Prüfung.

1 Allgemeine Bemerkungen

a. Ablauf der Prüfungen

In einem ersten Gespräch mit den Autoren des Berichtes (Mitte Juni 2019) wurden die systematischen Festlegungen (Abgrenzungen, Szenario-Annahmen) besprochen. Eine besondere Herausforderung stellten u.a. die unterschiedliche Aktualität und teilweise Inkonsistenz der Inventardaten zu verschiedenen Energiebereitstellungssystem in den verfügbaren Inventardatenbanken dar. In der Folge wurden die Festlegungen von Carbotech überarbeitet. Mitte August 2019 lag der erste Berichtsentwurf zu Handen der zweiten Begleitgruppensitzung vor. Auf Grund der Ergebnisse dieser Begleitgruppensitzung und eines Beurteilungsgesprächs des Reviewers mit Carbotech am 20. Oktober 2019, wurde der Bericht von den Autoren während eines Monats umfangreich überarbeitet. Am 13. Dezember 2019 fand ein letztes Beurteilungsgespräch des Reviewers mit den Autoren statt. Dabei ging es in erster Linie um die Verifizierung der im Laufe der Überarbeitungen erforderlichen Anpassungen der Berechnungsgrundlagen aus der Biogasvorkette.

b. Allgemeine normative Grundlage

Gemäss Auftrag war die «Ökologische Bewertung von Heizsystemen» im Wesentlichen anhand der Norm ISO 14040/44 zu erstellen, wobei mindestens zwei Bewertungsmethoden angewendet werden sollen. Eine zwingende Übereinstimmung mit ISO 14040/44 war nicht gefordert, Abweichungen von den Normanforderungen waren jedoch zu dokumentieren.

c. Gesamteindruck

Zur Übereinstimmung der Studie mit den Forderungen der Norm ISO 14040/44 – nachstehend zitiert in der Form "(14044; Abschnitt)" – folgen in den nächsten Abschnitten Ausführungen im Detail. Bereits einleitend kann ich hier bestätigen, dass (gemäss 14044; 6.1) die für die Studie angewandten Methoden sowie die verwendeten Daten gemäss meiner Prüfung einen wissenschaftlich und technisch passenden Eindruck vermitteln. Die Auswertungen entsprechen den Zielen der Studie und der

Bericht ist transparent und in sich stimmig. Die Grenzen der Studie sind klar dargestellt und namentlich wird auf deren zwingende Berücksichtigung bei Interpretationen hingewiesen. Insgesamt macht die Studie einen sorgfältigen und vollständigen Eindruck.

2 Kritische Prüfung gegenüber den ISO-Normforderungen

a. Zur Zielsetzung der Studie

Die Ziele der Studie wurden im Verlauf des Projektes verfeinert und sind im Bericht klar dargestellt. Zu berücksichtigen ist dabei, dass die heute verfügbaren Inventardaten zu den in den verschiedenen Heizsystemen verwendeten Energiebereitstellungssystemen unterschiedliche Aktualität aufweisen. Dem wurde Rechnung getragen, in dem für die Ergebnisse dieser Studie relevante Unterschiede ermittelt und entsprechende Inventare partiell angepasst wurden.

Als Zielgruppe wird in erster Line der Auftraggeber adressiert. Als eine weitere Zielgruppe wird die interessierte Öffentlichkeit angesprochen.

b. Zum Umgang mit der normativen Grundlage

Der Bericht benennt in Kap. 3.4.2 «Formale Grenzen» den Grad die Erfüllung der Anforderungen von Norm ISO 14044 in Abhängigkeit von der Art der Veröffentlichung des Berichtes klar und korrekt.

c. Zu Systemabgrenzung und funktioneller Einheit

Die Abgrenzung der betrachteten Prozesssysteme sowie die funktionelle Einheit sind in der Studie normgemäss (14044; 4.2.3.) und sinnvoll definiert.

Dass die Herstellung und der Rückbau der betrachteten Gebäude nicht berücksichtigt wird, ist normenkonform und wird begründet dargelegt.

d. Zur Sachbilanz – Datenqualität und Datenquellen

Nach ISO (14044; 4.2.3.6) sind für eine Studie Datenqualitätskriterien festzulegen. Dies ist hier nicht explizit erfolgt, sondern implizit einerseits durch die Verwendung der Ökoinventare von ecoinvent v3.5, die Aktualisierung wesentlicher Elemente der Biogaskette sowie die Angabe der an einzelnen Datenätzen vorgenommenen Modifikationen.

Die Datenquellen (14044; 4.3.2) sind angegeben und stichwortweise beschrieben. Die Ergebnisse wurden mittels Monte-Carlo-Analyse betr. Unsicherheiten variiert und geprüft. Die Sachbilanzergebnisse werden im Bericht mittels Grafiken ausgewiesen, nicht in Form numerischer Tabellen.

e. Zur Sachbilanz – Allokation

Die gewählten Allokationen gemäss (14044; 4.3.4) werden in der Studie nachvollziehbar dargestellt, behandelt und umgesetzt. Das gilt sowohl für den Teil «Resultate» zu den einzelnen Gebäudetypen wie auch für die in einem separaten Teil behandelten Sensitivitätsanalysen.

f. Zu Wirkungsabschätzung und Gewichtung

Massgebend in der ISO-Norm ist (14044; 4.4). Die Beurteilung mit der Wirkungskategorie Treibhausgase (THG; in CO_2-Äquivalenten) erfüllt die Normforderungen für diesen methodischen Schritt. Darüber hinaus werden in der Studie drei Beurteilungsmethoden angewendet, welche nicht allein auf einzelne Wirkungskategorien aufbauen bzw. darüber hinaus gehen (MöK/UBP, ILCD und Impact2002+) und eine Normierung und Gewichtung (im Sinne von 14044; 4.4.3.1) beinhalten. Hier

werden die Normforderungen von den verwendeten Methoden erfüllt, mit den im Kapitel 3.4.2 der Studie dargelegten Einschränkungen.

g. Zu den Sensitivitätsanalysen

Die Studie enthält Sensitivitätsanalysen (14044; 4.5.3.3) zum Einfluss vieler verschiedener Faktoren auf die Ergebnisse. Als potenziell wesentlich erweisen sich der Sanierungsgrad der Gebäude, die eingesetzten Strommixe, der Anteil aus erneuerbaren Quellen in Brennstoffen und die Allokationsmethode bei BHKW.

Diese Ergebnisse zeigen, dass eine Interpretation der Ergebnisse sehr sorgfältig, vor dem Hintergrund der in der Studie getroffenen Annahmen vorgenommen werden muss, insbesondere auch hinsichtlich der verschiedenen Szenarien auf der Zeitachse.

h. Beurteilung

Der vorliegende Bericht ist eine umfassende und transparente Arbeit zu diesem Thema. Die Schwierigkeit, trotz teilweise veralteter Grundlagen sowie Unsicherheiten bei den Bewertungen und Daten, im Speziellen bezüglich zukünftiger Szenarien, zu aussagekräftigen Resultaten zu gelangen, wurde gut gemeistert. Damit zeigt die vorliegende Studie das heutige Wissen über die heutigen und zukünftigen Umweltauswirkungen der untersuchten Systeme recht umfassend.

Die Prüfung der Studie hat ergeben, dass diese alle relevanten Anforderungen der Norm erfüllt. Die im Rahmen des Reviewprozesses durchgeführten Prüfungen der Rahmenbedingungen und Stichproben bezüglich Relevanz und Plausibilität lassen weiter den Schluss zu, dass die Ergebnisse im Rahmen der angegebenen Unsicherheiten und der genannten Einschränkungen, korrekt und aussagekräftig sind, auch wenn sich in konkreten Einzelfällen oder auf Grund von neuen Entwicklungen zukünftig andere Ergebnisse zeigen können.

3 Ergänzende Bemerkungen

a. Zur Publikation und Interpretation der Resultate

Dieses Review fand unter der Annahme statt, dass die Resultate nicht nur intern kommuniziert, sondern auch einer breiteren Öffentlichkeit zugänglich gemacht werden. Vor dem Hintergrund von (14044; 5.2) enthält der Bericht soweit ersichtlich keine vertraulichen Informationen, die nicht an Dritte weitergegeben werden dürften.

Gemäss Ansicht des Reviewers sind bei der Interpretation der Ergebnisse die Aussagen der Autoren in Kapitel «3.4 Grenzen der Studie» und im Abschnitt «Ausblick» von Kapitel «5 Schlussfolgerungen» gebührend zu beachten. Die Studie vergleicht gemäss Zielsetzung verschiedene technische Heizungssysteme bezüglich der Umweltauswirkungen eines einzelnen installierten Systems. Welchen Beitrag diese einzelnen Systeme zur Wärmeversorgung z.B. einer ganzen Region zu leisten vermögen, hängt entscheidend von der Verfügbarkeit entsprechender Wärmequellen ab. Darauf wird in der Studie an verschiedenen Stellen hingewiesen, die Studie enthält jedoch keine Potenzialanalysen.

b. Zur Verwendung der überarbeiteten Inventardaten

Im Rahmen dieser Studie wurden diejenigen Inventardaten, welche sich zum Studienbeginn als nicht mehr zeitgemäss erwiesen sowie relevant für die Fragestellung und damit die Ergebnisse der Studie sind, neu erhoben und angepasst. Dadurch zeigen die vorliegenden Resultate den aktuellen Stand des Wissens und geben die derzeit bestmögliche Antwort auf die Fragestellung der Studie. Wie die

Autoren dies korrekterweise darlegen, ist dabei zu beachten, dass die Inventare auch von den gewählten Rahmenbedingungen abhängen und es daher möglich ist, dass sie für andere Fragestellungen nicht zwingend geeignet sein müssen.

In diesem Sinne bilden die für diese Studie angepassten Inventare, namentlich für Biogas, eine wertvolle Basis für die umfassende Aktualisierung der Hintergrunddaten in ecoinvent und der «Empfehlung 2009/1 Ökobilanzdaten im Baubereich» der KBOB. Der Reviewer regt an, dass die für diese Datenbestände zuständigen Stellen die in dieser Studie erarbeiteten Daten in die nächste umfassende Aktualisierung der Hintergrunddaten einfliessen lassen.

c. Zur Verwendung dieses Prüfberichts

Dieser Bericht ist in die Studie zu integrieren (14044; 6.2).

Basel, 24. Januar 2020
Norbert Egli

Nachtrag

Am 16. März 2020 wurde die aktualisierte Berichtsversion v2.1 vom 13. März 2020 erneut geprüft.

Diese beinhaltet keine Aussagen oder geänderten Berechnungen, die an der Beurteilung im Reviewbericht vom 24. Januar 2020 zur Berichtsversion v1.31 Anpassungen erfordern würden.

Basel, 16. März 2020
Norbert Egli

Tridee GmbH
Engineering für Mensch, Markt, Umwelt
Andreas Heusler-Strasse 20
4052 Basel

mail@tridee.ch

A4 Stellungnahmen von Mitgliedern der Begleitgruppe

A4.1 Stellungnahme von Energie 360° AG

Manuel Pauli, Energie 360° AG
Energie 360° ist mit den Haupt-Aussagen des Berichtes zur ökologischen Bewertung von Heizsystemen vorbehaltlich folgender Punkte im Grundsatz einverstanden:

1. Allokation bei der Biogas-Ökobilanz:
Energie 360° teilt die Erkenntnis, dass bisherige Informationen zu Ökobilanzen von Biogas sehr unterschiedlich sind und sich teilweise widersprechen. Wir begrüssen die Korrekturen und Konsolidierungen der Datengrundlagen für Biogas.
Allerdings sind wir der Meinung, dass die ökologische Bewertung nach der Methode der «Cut-off» Allokation und nicht nach der «ökonomischen Allokation» hätte vorgenommen werden sollen. Dies Betrifft insbesondere die Systeme KVA-Fernwärme und Biogas. Beide Systeme haben gemeinsam, dass sie primär die Funktion einer Abfallentsorgungsanlage haben. Die Nutzung der freiwerdenden Energie in Form von Wärme und/oder Strom kommt erst sekundär. Dies wird auch durch die Ertragsstruktur verdeutlicht: Beide Systeme finanzieren sich primär durch die Abwasser- bzw. Abfallentsorgungsgebühren und nicht durch den Verkauf der Energie. Ein Vergleich auf Basis der «Cut-off» Allokation wäre besonders wichtig, weil in der heutigen politischen Diskussion die von der KBOB publizierten Zahlen am häufigsten beigezogen werden. KBOB rechnet heute bei der KVA-Fernwärme mit der Cut-off Allokation, beim Biogas mit der ökonomischen Allokation. Dies führt zu einem unfairen Vergleich und ist besonders stossend, zumal beide Systeme einen Entsorgungsauftrag gemäss Abfallverordnung haben.
Würden man beide Systeme mit der Cut-off Allokation berechnen, so würden die die Umweltwirkungen deutlich geringer ausfallen. Beide Systeme würden im Vergleich zu allen anderen deutlich besser dastehen als dies der vorliegende Vergleich suggeriert.

2. Rückbau des bestehenden Heizsystems
Obschon der Fokus der Studie auf den MuKEn Standardlösungen beim Wärmeerzeugungsersatz liegt, wird ein allfälliger Rückbau/Umbau vom bestehenden Heizsystem in den Ökobilanzen ausgeblendet (Kap. 2.3). Fakt ist, dass heute rund 60 % der bestehenden Gebäude der Schweiz über eine Öl- oder Gasheizung verfügen. Ersetzt man die Heizung durch ein neues System, kommen teils aufwendige Rückbauarbeiten und Entsorgungsaufwendungen hinzu. Dies hätte einen grossen Einfluss auf die Ergebnisse. Wechselt man z.B. bei einer Gasheizung von 100 % Erdgas auf 100 % Biogas, so fallen keinerlei Rückbau-Aufwendungen an. Die Lösung mit einem Biogasanteil würde somit gegenüber anderen Systemen, bei de-nen Komponenten der Gasheizung ausgebaut und entsorgt werden müssen, besser abschneiden als in der Studie dargestellt. Der Rückbau müsste aus Sicht von Energie 360° in die Systemgrenze integriert werden, da die Studie ansonsten von einem hypothetischen Fall ausgeht, der bei einer Sanierung in der Realität nie Zutrifft.
Manuel Pauli
Energie 360° AG
Zürich, 21.10.2019

A4.2 Stellungnahme Lufthygieneamt beider Basel

Deborah Sägesser, LHA

Das Lufthygieneamtes beider Basel (LHA) hatte bei der Mitarbeit in der Begleitgruppe den Fokus bei den Heizsystemen, welche während der Betriebsphase lufthygienisch relevant sind. Die Stellungnahme zielt deshalb auch auf diese Systeme ab. Zur Methodik der Ökobilanzierung wird keine Stellung genommen.

Ziel der Studie und Wahl der Heizsysteme

Aus unserer Sicht ist die Studie als Grundlage für politische Diskussionen und Strategien mit hoher Flughöhe geeignet. Wie im Bericht hingewiesen, können Private nicht aufgrund der vorliegenden Ergebnisse das für Sie ökologische sinnvollste Heizsystem wählen, da die regionalen Rahmenbedingungen in der Ökobilanz nicht abgebildet sind.

Die vorliegende Ökobilanzierung bewertet die die Umweltauswirkungen von verschiedenen Heizsystemen. Die Liste der betrachteten Heizsystem ist dabei keinesfalls abschliessend. Es sei darauf hingewiesen, dass in ländlichen Regionen bei Einfamilienhäusern häufig statt Pelletfeuerungen auch Stückholzfeuerungen eingesetzt werden. Bei Mehrfamilienhäusern trifft man oft bereits Hackschnitzelfeuerungen an.

Als Wärmeerzeuger bei Einfamilien- und Mehrfamilienhäusern werden BHKWs aufgeführt. Sogenannte Mini-BHKWs mit einer Leistung kleiner 100 kW kommen bisher in der Praxis sehr selten vor. Vermutlich, weil der Fokus der BHKWs primär bei der Stromerzeugung und nicht bei der Wärmeerzeugung liegt. Zudem ist für Mini-BHKWs der Wartungsaufwand und die damit verbundenen Kosten im Vergleich zu anderen Heizsystemen relativ hoch. Bei bestehenden Mini-BHKWs wurde wiederholt beobachtet, dass die Grenzwerte der Luftreinhalte-Verordnung nicht eingehalten werden können.

Ergänzungen zu den Resultaten

Insbesondere bei den holzbasierten Wärmesystemen werden Unterschiede bei den verschiedenen Methoden wie ökologische Knappheit, ILCD, Impacts 2002+ und Klimaauswirkung gefunden. Bei allen Methoden trägt die Betriebsphase der Holzfeuerung wesentlich zu den Umweltauswirkungen bei. Grenzwerte existieren in der Luftreinhalte-Verordnung für Kohlenmonoxid, Staub und teilweise bei den Stickoxidemissionen. Die Praxis zeigt, dass es zwischen einzelnen Holzfeuerungen grosse Unterschiede bei obengenannten Emissionen gibt. Insbesondere beeinflussen die Anzahl Starts sowie das eingesetzte Brennstoffsortiment die Emissionen wesentlich. Holzfeuerungen können bei Bandlast emissionsarm betrieben werden, bei starken Lastschwankungen ohne genügend Speichervolumen steigen die Emissionen stark an. Immer häufiger trifft man bei Neuanlagen auf integrierte Staubabscheidesysteme, welche die Staubemissionen deutlich mindern, sodass im Optimum Werte weit unter den Grenzwerten erreicht werden können. Je grösser die Anlagen, desto öfter sind solche Emissionsminderungsmassnahmen wirtschaftlich und folglich auch im Einsatz. Bei Altholzfeuerungen oder sonstigen sehr grossen Anlagen werden zudem kontinuierliche Emissionsüberwachungen vorgeschrieben. Eine Überschreitung der Grenzwerte wird so innerhalb weniger Stunden bemerkt und behoben. Bei kleinen Anlagen wird eine nicht gut eingestellte Anlage zeitweise erst nach 2 bis 4 Jahren entdeckt. Die erwähnten Schwierigkeiten führen dazu, dass kleine und mittelgrosse Holzfeuerungen gegenüber von z.B. Öl- oder Gasfeuerungen ein deutlich inhomogeneres Emissionsverhalten in der Betriebsphase aufweisen und die tatsächlichen lufthygienischen Umweltauswirkung von Anlage zu Anlage stark variieren.

Vergleichbar zu den Holzfeuerungen dürften sich in der Praxis auch die Emissionen bei der Fernwärme je nach vorhandenem System deutlich voneinander unterscheiden.
Es wird befürwortet, dass bei den Gasfeuerungen die Umweltauswirkungen in Abhängigkeit vom Anteil erneuerbarer Brennstoffe detailliert betrachtet wurde. Da erneuerbare Gase aus organischen Abfallstoffen produziert werden, sind wir der Ansicht, dass zurzeit das Angebot mit hohem Biogasanteil wie wahrscheinlich auch das Ausbaupotential begrenzt ist.

Bei den Ölfeuerungen sei darauf hingewiesen, dass die Luftreinhalte-Verordnung den Einsatz von Heizöl «Extra leicht Euro» für Anlagen mit einer Feuerungswärmeleistung kleiner 5 MW nur noch bis Ende Mai 2023 erlaubt. Anschliessend darf in solchen Anlagen noch Heizöl «Extra leicht Öko» eingesetzt werden.
Die Resultate betreffend der BHKWs unterliegen einer relativ hohen Bandbreite. Kapitel 4.3.4 zeigt deutlich, wie die Umweltauswirkungen dem Einfluss der gewählten Allokation unterliegen. Bei der Interpretation der Resultate ist dieser Spannbreite aus unserer Sicht deshalb unbedingt Beachtung zu schenken.