

ZÜRCHER HOCHSCHULE FÜR ANGEWANDTE WISSENSCHAFTEN
DEPARTEMENT LIFE SCIENCES UND FACILITY MANAGEMENT,
INSTITUT FÜR UMWELT UND NATÜRLICHE RESSOURCEN

Ökobilanzierung der Produktion von *Trypoxylus dichotomus* auf Holz-Basis



Bachelor Arbeit

von

Savian Aurelio Scanu

Bachelorstudiengang 2017

Fachkorrektoren

Stucki, Matthias

Institut für Umwelt und Natürliche Ressourcen, Grüental, 8820 Wädenswil

Prof. Dr. Jürg Grunder

Institut für Umwelt und Natürliche Ressourcen, Grüental, 8820 Wädenswil

Impressum

Autor

Savian Aurelio Scanu

Bachelorstudiengang Umweltingenieurwesen

Institut

Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften

Department Life Science und Facility Management

Institut für Umwelt und Natürliche Ressourcen

Grüentalstrasse 14

8820 Wädenswil

Zitiervorschlag

Scanu, S. (2021) Ökobilanzierung der Produktion von Trypoxylus dichotomus auf Holz-Basis

Keywords

Speiseinsekten, Trypoxylus dichotomus, Holz, LCA, IPCC 2013, Ecological Scarcity, Product Environmental Footprint

Abstract

Global meat consumption contributes to a significant share of greenhouse gas emissions and land use. Animal agriculture requires one-third of the world's grain production as feed. This has led to a search for alternative protein sources, such as lab-grown meat, algae, legumes and insects. The "Food from Wood" project is investigating the potential of *Trypoxylus dichotomus* as a protein source, the majority of whose feed consists of woody debris. The insects are fattened in a fattening farm from larval stage to pupal stage, at which time they are ready for harvest. This paper investigates the environmental impact of a wood-based *Trypoxylus dichotomus* breeding operation using a Life Cycle Assessment (LCA). Three environmental impact methods were used to evaluate the LCA, namely the Intergovernmental Panel on Climate Change 2013 (IPCC), the Method of Ecological Scarcity (Moek) and the Product Environmental Footprint (PEF). Two Functional Units were determined: 1 kg of frozen pupae and 1 kg of proteins. To determine the footprint of breeding, the research project and two future scenarios representing commercial production were modeled. The two future scenarios differed in production volume and construction, and were designated as large-scale and small-scale. For each scenario, a best-case and a worst-case variant were determined. These differ in transport distance and heating type. The life cycle inventory data are mainly based on measurements and estimates of the "Food from Wood" project team. The evaluation with the 3 impact assessment method showed the large-scale operation Best Case as the variant with the lowest footprint, while the research scenario had the highest emissions. The processes of transporting the raw materials, building the plant and manufacturing the plastic crates turned out to be the main contributors to the total emissions. The results of the impact assessment were compared on the basis of kg CO₂ eq. with those of 3 insect farms. The values of the large farm (best case) approached those of the other insect species, while those of the small farm (worst case) showed significantly higher emissions. The results were also compared with beef, pork and chicken, both organic and conventionally raised. The large farm (best case) showed comparable values with chicken meat and significantly lower emissions than beef and pork. The breeding of *Trypoxylus dichotomus* seems to have a promising potential as a future protein source.

Zusammenfassung

Der globale Fleischkonsum trägt zu einem erheblichen Anteil der Treibhausgasemissionen und zur Landnutzung bei. Die Tierzucht benötigt einen Drittel der weltweiten Getreideproduktion als Futtermittel. Dies hat zu einer Suche nach alternative Proteinquelle wie Labor-Fleisch, Algen, Hülsenfrüchte und Insekten geführt. Das Projekt "Food from Wood" untersucht das Potential des *Trypoxylus dichotomus* als eine Proteinquelle, dessen Futtermittel mehrheitlich aus Holzreste besteht. Die Insekten werden in einem Mastbetrieb vom Larvenstadium bis zum Puppenstadium gemästet, zu welchem Zeitpunkt sie Erntereif sind. Diese Arbeit untersucht die Umweltbelastung einer *Trypoxylus dichotomus* Zucht auf Holzbasis mit einem Life Cycle Assessment (LCA). Zur Auswertung der Sachbilanz wurden drei Umweltauswirkungsmethoden benutzt, nämlich der Intergovernmental Panel on Climate Change 2013 (IPCC), die Methode der Ökologische Knappheit (Moek) und das Product Environmental Footprint (PEF). Es wurden zwei funktionelle Einheiten bestimmt: 1 kg eingefrorene Puppen und 1 kg Proteine. Zur Bestimmung des Fussabdruckes der Zucht wurden das Forschungsprojekt sowie zwei Zukunftsszenarien modelliert, die eine kommerzielle Produktion darstellen. Die zwei Zukunftsszenarien unterscheiden sich im Produktionsvolumen sowie der Bauweise und wurden als Gross- und Kleinbetrieb bezeichnet. Für jedes Szenario wurden eine Best- und eine Worst-Case Variante bestimmt. Diese unterscheiden sich in der Transportdistanz und im Heizungstyp. Die Daten der Sachbilanz stützen sich hauptsächlich auf Mess- und Schätzwerte des Teams des Projektes "Food from Wood". Die Auswertung mit den 3 Wirkungsabschätzungsmethoden bestimmte den Grossbetrieb Best Case als die Variante mit dem geringsten Fussabdruck, während das Forschungsszenario die höchsten Emissionen aufwies. Die Prozesse des Transportes der Rohstoffe, der Bau der Anlage und die Herstellung der Kunststoffkisten stellten sich als die wichtigsten Beiträge der Gesamtemissionen heraus. Die Resultate der Wirkungsabschätzung wurden anhand der kg CO₂ eq. mit denjenigen von 3 Insektenzuchten verglichen. Die Werte des Grossbetriebes (Best Case) näherten sich denjenigen der andern Insektenarten, während die des Kleinbetriebes (Worst Case) deutlich höhere Emissionen nachwies. Die Resultate wurden ebenfalls mit Rind, Schwein und Poulet-fleisch verglichen, jeweils Bio und Konventionell gezüchtet. Der Grossbetrieb (Best Case) zeigte vergleichbare Werte mit dem Poulet-Fleisch und deutlich tiefere Emissionen als Rind und Schweinefleisch. Die Zucht des *Trypoxylus dichotomus* scheint ein vielversprechendes Potential als zukünftige Proteinquelle aufzuweisen.

Inhaltsverzeichnis

| | |
|---|----|
| Impressum | 2 |
| Abstract | 3 |
| Zusammenfassung | 4 |
| Abkürzungen | 7 |
| 1 Einleitung | 8 |
| 2 Ziel und Untersuchungsrahmen..... | 11 |
| 2.1 Ziel der Arbeit..... | 11 |
| 2.2 Funktionelle Einheit..... | 11 |
| 2.3 Wirkungsabschätzungsmethoden..... | 12 |
| 2.4 Untersuchungsrahmen | 13 |
| 2.5 Entwicklung des Trypoxylus dichotomus | 13 |
| 2.6 Modellierung der Szenarien..... | 14 |
| 2.7 Systembild Forschungsszenario..... | 16 |
| 2.8 Systembild Zukunftsszenarien..... | 19 |
| 3 Sachbilanz..... | 22 |
| 3.1 Substrat Rohstoffe..... | 22 |
| 3.1.1 Transport Forschungsszenario..... | 24 |
| 3.1.2 Transport Substratrohstoff Best Case für Klein-und-Grossbetrieb | 24 |
| 3.1.3 Transport Substratrohstoff Worst Case Klein-und-Grossbetrieb | 25 |
| 3.2 Kunststoffkisten..... | 26 |
| 3.3 Maschineneinsatz | 29 |
| 3.3.1 Zerkleinern durch Schneckenhäcksler (Forschungsszenario)..... | 29 |
| 3.3.2 Zerkleinern durch Hammermühle | 31 |
| 3.3.3 Mischmaschine | 32 |
| 3.3.4 Substrat durch Rüttelsieb trennen | 34 |
| 3.3.5 Stapler..... | 36 |
| 3.3.6 Tiefkühlung Forschungsszenario..... | 38 |
| 3.3.7 Tiefkühlung Zukunftsszenarien..... | 39 |
| 3.4 Heizung..... | 43 |
| 3.4.1 Heizung Zukunftsszenarien | 43 |
| 3.4.2 Heizungsbedarf Forschungsszenario | 45 |
| 3.5 Bauaufwand | 47 |
| 3.6 Direkte Emissionen | 48 |
| 3.7 Zucht in den Zukunftsszenarien..... | 49 |
| 4 Wirkungsabschätzung | 51 |

| | | |
|-----|--|----|
| 4.1 | Treibhauspotential..... | 51 |
| 4.2 | Ökologische Knappheit | 54 |
| 4.3 | Product environmental Footprint..... | 56 |
| 4.4 | Sensitivitätsanalyse..... | 59 |
| 5 | Diskussion..... | 61 |
| 5.1 | Resultate..... | 61 |
| 5.2 | Vergleich mit weiteren Insektenzuchten | 62 |
| 5.3 | Vergleich mit Fleisch | 64 |
| 5.4 | Limitationen..... | 66 |
| 5.5 | Ausblick und Empfehlungen | 66 |
| 6 | Fazit | 68 |
| 7 | Literaturverzeichnis | 69 |
| 8 | Abbildungsverzeichnis..... | 73 |
| 9 | Tabellenverzeichnis..... | 75 |
| | Anhang 1..... | 78 |
| | Anhang 2..... | 82 |
| | Poster..... | 85 |

Abkürzungen

IPCC 2013: Intergovernmental Panel on Climate Change

Moek: Methode der Ökologischen Knappheit

PEF: Product environmental footprint

FU-F: Funktionelle Einheit für ein kg Frischprodukt

FU-P: Funktionelle Einheit für ein kg Proteine

GBC: Grossbetrieb Best Case

GWC: Grossbetrieb Worst Case

KBC: Kleinbetrieb Best Case

KWC: Kleinbetrieb Worst Case

FS: Forschungsszenario

1 Einleitung

Fleisch stellt einen wichtigen Bestandteil der Ernährungssicherheit dar, da es als Quelle von Kalorien, Proteinen und lebenswichtigen Mikronährstoffen dient (Rojas-Downing, Nejadhashemi, Harrigan & Woznicki, 2017). Die im Fleisch enthaltenen Proteine weisen zusätzlich alle lebenswichtigen Aminosäuren auf und nehmen somit in einer ausgewogenen Ernährung einen hohen Stellenwert ein (Churchward-Venne, Pinckaers, van Loon & van Loon, 2017; Shockley & Dossey, 2014).

Der weltweite Fleischkonsum bringt jedoch signifikante Herausforderungen mit sich. Die vom Fleischkonsum induzierte Tierzucht benötigt einen Drittel der weltweiten Getreideproduktion als Futtermittel und kommt demzufolge in Konkurrenz mit der Lebensmittelproduktion (Rojas-Downing et al., 2017).

14% der weltweiten Treibhausgasemissionen werden alleine von der Viehzucht verursacht, hauptsächlich in Form von Methan (Rojas-Downing et al., 2017). Dieser bereits umweltbelastende Sektor ist zusätzlich von einem merkbaren Wachstum betroffen, die Nachfrage nach Fleisch soll in der Zeitspanne von 2005 bis 2050 um 76% wachsen (Huis, 2016; Oonincx & de Boer, 2012). In der Schweiz bleibt die Nachfrage nach tierischen Produkten seit den 2000er Jahren relativ unverändert. Der Fleischkonsum liegt bei etwa 50 kg pro Jahr pro Person (BAFU, 2011), was doch 7 Kilo über dem weltweiten Durchschnitt liegt (Ritchie & Roser, 2017).

Das Bedürfnis, die Welt mit genügend Proteinen zu versorgen, und die gleichzeitige Bemühung einer Reduktion der Umweltbelastung, führen zur Suche nach umweltfreundlicheren Proteinquellen. (Churchward-Venne et al., 2017; Huis, 2016). Van der Weele et al. (2019) ermittelt fünf der wichtigsten Alternativen: Labor Fleisch, Algen, pflanzenbasiertes Fleisch, Hülsenfrüchte und Insekten.

In tropischen und süd tropischen Ländern trägt der Verzehr von Insekten zu Ernährungssicherheit bei (Shockley & Dossey, 2014). Weltweit werden über 2000 Arten von Insekten konsumiert (Shockley & Dossey, 2014). Der Konsum von Insekten wurde, mehrheitlich aus kulturellen Gründen, noch nicht genügend untersucht (Huis, 2016; Shockley & Dossey, 2014). In westlichen Ländern, wie Europa und Nordamerika, werden Insekten immer noch als ungenießbar und ekelig wahrgenommen. In den letzten Jahren wurde jedoch, aufgrund der vielversprechenden ernährungs- und umweltschonenden Eigenschaften, der Zucht und dem Verzehr von Insekten eine erhöhte Aufmerksamkeit gewidmet. (Shockley & Dossey, 2014).

Aus der Ernährungsperspektive weisen Insekten Nährwerte auf, die mit Produkten wie Fleisch, Eier oder Milch vergleichbar sind (de Castro, Ohara, Aguilar & Domingues, 2018). Diese

können je nach Art und Entwicklungsstadium deutlich variieren, mit einem Proteinanteil, der zwischen 50 und 80 % liegt (de Castro et al., 2018). Die zweitwichtigste Nährgruppe ist Fett, dessen Anteil im Larvenstadium besonders hoch ist. Dieser Anteil besteht mehrheitlich aus ungesättigten Fettsäuren. Ebenso sind Insekten reich an Mineralien (Eisen, Zink, Calcium, Magnesium usw.) und fettlöslichen Vitaminen (de Castro et al., 2018).

Für die Ordnung Coleoptera, zu denen auch der *Trypoxylus dichotomus* gehört, der in dieser Arbeit untersucht wird, wird ein Aminosäure-Wert angegeben, der die IAA Standards überschreitet (Churchward-Venne et al., 2017).

Aus der Umweltperspektive betrachtet, weisen Insekten vielversprechende Eigenschaften auf. Mit der Viehzucht verglichen, benötigen Insekten eine geringere Fläche Land, emittieren weniger Treibhausgase und Ammoniak, besitzen eine effizientere Futtermittelverwertung, haben einen geringeren Wasserbedarf und können organische Abfallprodukte als Futtermittel verzehren (Halloran, Roos, Eilenberg, Cerutti & Bruun, 2016; Halloran, Vantomme, Hanboonsong & Ekesi, 2015; Huis, 2016; van Huis, 2015). Der Hauptgrund der effizienteren Futtermittelverwertung und des geringeren Wasserbedarfs ist auf den Metabolismus zurückzuführen: Insekten sind poikilotherm, das bedeutet, dass sie keine Energie verwenden müssen um ihre Körpertemperatur zu regulieren (Halloran et al., 2016)

Das Forschungsprojekt «Food from Wood», erforscht seit 2014 ein Verfahren, um Insekten in der Schweiz nachhaltig zu züchten. Der Kernpunkt des Projekts besteht aus der Entwicklung eines Zuchtverfahrens, welches Holz als Futtermittel einsetzt, einen geringen energetischen Input, einen minimalen Personaleinsatz benötigt und keine Abfallprodukte generiert. Die ausgewählten Insektenarten ernähren sich fast exklusiv aus Holzprodukten wie Sägespäne oder Pilzsubstraten. Dies hat einerseits einen positiven Effekt auf die Produktionskosten und sollte gleichzeitig zu einer Reduktion der Umweltbelastung führen.

Die Holzwirtschaft stellt einen wichtigen Sektor in der Schweiz dar, mit einem erhöhten Einsatz in der Bauindustrie. Die Mehrheit des Holzes wird importiert, jedoch steigt die Nachfrage nach Schweizer Holz (Schmidt, 2016). Somit wird auch der Anteil an Abfallprodukten steigen und konsequent der Bedarf diese zu entsorgen oder zu verwerten. Dadurch eignet sich das Projekt «Food from Wood» als eine Verwertungsmöglichkeit für diese Abfallprodukte.

Von den untersuchten vier Insektenarten, wurde der *Trypoxylus dichotomus* als die erfolgversprechendste Art ausgewählt. Die Vorteile liegen hauptsächlich beim geringen Rohstoff- und Energiebedarf. Dazu ist der personelle Einsatz nur sporadisch notwendig.

Food from Wood verspricht somit eine Produktion, die Abfallprodukte zur Lebensmittelproduktion einsetzt und als Nebenprodukt wertvollen Kompost produziert. Um das Ergebnis dieser Produktion zu quantifizieren und mit anderen Produktionsmethoden (Insekten,

sowie Säugetieren und Geflügel) zu vergleichen, wurde im Rahmen des Projektes entschieden, eine Ökobilanzierung durchzuführen. Diese wird nach ISO EN14040 durchgeführt, und mit der Sima-Pro Software ausgewertet. Die Daten des Zuchtverfahrens, also Temperatur, Substratmenge, Energiebedarf, benötigte Räumlichkeiten und Maschinen, werden vom Leiter des Projects «Food from Wood» zur Verfügung gestellt. Die Hintergrunddaten, wie den Strommix, den Transport usw. werden aus der Ecoinvent Datenbank bezogen.

Das Anwenden von Nebenprodukte als Mittel zur Reduktion der Umweltbelastung von Insektenzuchten wurde bereits von diverse Autoren untersucht (Smetana, Schmitt & Mathys, 2019) (Smetana, Palanisamy, Mathys & Heinz, 2016) (Mertenat, Diener & Zurbrügg, 2019)

Zum Zeitpunkt des Verfassens der Arbeit sind dem Autor keine Studien bekannt, die eine Holz-basierte Zucht mit LCA Methode untersucht haben. In dieser Arbeit wird der Fussabdruck einer Zucht von *Trypoxylus dichotomus* auf Holzbasis untersucht. Daher die Fragenstellung:

Eignet sich das Zuchtverfahren des *Trypoxylus dichotomus* auf Holzbasis als eine nachhaltige Proteinquelle?

2 Ziel und Untersuchungsrahmen

Im folgenden Kapitel werden die Ziele, der Untersuchungsrahmen, das Systembild und das Allokationsverfahren der Arbeit erläutert.

2.1 Ziel der Arbeit

Das Hauptziel der Arbeit ist die Bestimmung der Umweltauswirkungen einer *Trypoxylus dichotomus*-Zucht auf Holzbasis für drei Szenarien. Diese wird durch drei Methoden bestimmt, und zwar durch die Methode der Ökologische Knappheit (Moek) (Frischknecht, Büsser Knöpfel, Flury, Stucki & Ahmadi, 2013), das Intergovernmental Panel for Climate Change 2013 (IPCC 2013) (Stocker et al., 2013) und das Product Environmental Footprint (PEF) (Manfredi, Allacker, Pelletier, Chomkhamtri & de Souza, 2012). Dadurch können die ökologischen Hotspots definiert werden, um den Produktionsprozess zu optimieren. Die Resultate sollen dann mit der Umweltauswirkung von drei Insektenzuchten verglichen werden. Bei diesen handelt es sich um die Zuchtverfahren von *Tenebrio molitor* / *Zophobas morio*, *Acheta domesticus*/*Gryllus bimaculatus* und *Hermetia illucens*. Ebenfalls werden die Resultate mit dem Fussabdruck Rind, Schweine und Geflügelfleisch verglichen.

2.2 Funktionelle Einheit

In dieser Ökobilanz werden zwei Funktionelle Einheiten, nach Empfehlung von Halloran et al. (2016), angewendet. Dies soll den Vergleich mit weitere Studien in diesem Fachbereich vereinfachen. Die ausgewählten Funktionellen Einheiten sind

- 1 kg eingefrorenen Puppen, bereit für Verarbeitung/Verkauf
- 1 kg essbare Proteinen

Die Funktionellen Einheiten werden in dieser Arbeit oft mit der Abkürzung FU-F (Funktionelle Einheit für Frischprodukt, 1 kg Puppen) und FU-P (Funktionelle Einheit für 1 kg Proteine erwähnt. Zur Berechnung des Proteinanteils wurden die Werte der Larven des *Oryctes boas* angewendet. Ein Insekt, das in der selbe Familie klassifiziert wird (Banjo, Lawal & Songonuga, 2006; BioLib, 2021). Banjo et al. (2006) berichtet in seiner Studie einen Proteinanteil von 26%. Mit dieser Annahme, enthält 1 kg Puppen 0.26 kg Proteine. Es wurde die Menge an Puppen berechnet, die für das Erhalten von 1 kg Proteinen benötigt werden. Die Berechnung wird in der Tabelle 1 aufgezeigt.

Tabelle 1: Berechnung der nötige Menge an Puppen für 1 kg Proteinen

| Input | Menge | Einheit | Berechnung |
|------------------------|-------|---------|------------------------------------|
| Proteine pro kg Puppen | 0.26 | kg | 1 kg Puppen*1 kg Proteine/Proteine |
| Puppen pro kg Protein | 3.85 | kg | pro kg Puppe |

2.3 Wirkungsabschätzungsmethoden

Um eine umfassende Analyse der Umweltauswirkungen des *T. dichotomus* durchzuführen, wurden drei Wirkungsabschätzungsmethoden angewendet. Dabei handelt es sich um die IPCC 2013 Methode, die Methode der Ökologische Knappheit, und das Product Environmental Footprint.

Das Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) befasst sich mit der Messung und Voraussagung der Klimaveränderungen. Basierend auf den Messdaten von CO₂ Konzentrationen, Temperaturen und der Steigung des Meeresspiegels wird ein Modell gebildet, welches die zukünftige Klimaveränderung versucht vorauszusagen. Das Modell wird ständig angepasst, mittels präziseren Datenmessungen und neuen Klimaforschungen. Das in der Arbeit benutzte Modell wurde im Jahr 2013 revidiert. Das Global Warming Potential (GWP) bestimmt den Einfluss von Klimagasen auf den Klimawandel in einem bestimmten Zeitraum. Für diese Arbeit wird mit einem GWP von 100 Jahren gerechnet. Die verschiedenen Gase werden in der Einheit kg CO₂ eq. normiert. 1 kg CO₂ gleicht 1 kg CO₂ eq., 1 kg Methan hat dagegen einen GWP von 25 kg CO₂ eq. (Stocker et al., 2013)

Die Methode der Ökologischen Knappheit basiert auf nationalen und internationalen Zielen des Umweltschutzes, die von zuständigen Behörden von einer legitimen Instanz formuliert werden müssen. Diese Ziele sollten ausserdem auf Nachhaltigkeit ausgerichtet sein. Mit dieser Methode werden hauptsächlich die Ziele der Schweizer Umweltpolitik angewendet, mit Einzelfällen von internationalen Zielen. Die Methode eignet sich zur Beurteilung von Produkten und einzelnen Prozessen, sowie Umwelleistungen von Organisationen im Bereich des Umweltmanagements. Die untersuchten Umwelteinwirkungen werden in Punkten ausgedrückt, die sogenannten Umweltbelastungspunkte (UBP). Dadurch können die Werte untereinander zusammengezählt und verglichen werden. (Frischknecht et al., 2013)

Das Product Environmental Footprint (PEF) ist eine multi-kriterien Methode zur Auswertung des Fussabdrucks von Produkten und Dienstleistungen während dem gesamten Lebenszyklus. Diese Methode wurde im Rahmen der Europäischen Strategie 2020 zur Optimierung des Energie-und-Ressourcenverbrauchs der Europäischen Union entwickelt. Diese Methode soll somit für Unternehmen und Institutionen der EU einen gemeinsamen methodologischen Ansatz zur Bewertung, zum Vergleich und zur Darstellung von Produkten und Dienstleistungen darstellen. Die PEF Methode wurde mit Rücksicht von weiteren anerkannten Wirkungsabschätzungsmethoden, wie die ISO Standards, Ecological Footprint und das Greenhouse Protocol entwickelt.

2.4 Untersuchungsrahmen

Der Untersuchungsrahmen der Arbeit liegt innerhalb der Schweiz, in der Zeitperiode Juli 2020 bis Ende 2020. Die zwei hypothetischen Zuchtszenarien wurden, basierend auf dem aktuellsten Stand des Wissens des «Projekt Food from Wood, bestimmt.

2.5 Entwicklung des *Trypoxylus dichotomus*

Die Entwicklung des *T. dichotomus* ist in fünf Phasen unterteilt. Diese sind in der Tabelle 2 dargestellt. Ein Weibchen legt im Schnitt 65 Eier, welche eine Schlupfrate von 80% haben. Nachdem die Larven aus den Eiern geschlüpft sind, befinden sie sich im L2 Stadion. Nach 4 Wochen erreichen sie das L3 Stadion, und sind dadurch mastbereit. Die Mast-Phase dauert 32 Wochen, nachdem beginnen die Larven mit der Verpuppung, die eine Woche dauert. Wenn die Verpuppung beendet ist, sind die Insekten erntebereit. Zu diesem Zeitpunkt wiegen die Puppen im Schnitt 15 g (Anhang 2). Während der Mastphase verbraucht eine Larve im Schnitt 1 Liter Substrat. Die optimale Temperatur für die Entwicklung der Larven liegt bei 26 °C, während für die Eierablage 32°C benötigt werden.

Tabelle 2:Entwicklungsphase des *Trypoxylus dichotomus*. Quelle. Siehe Anhang

| Ei-L2 | Mast (L3) | Pre-Puppe | Puppe | Adult |
|----------|-----------|-----------|----------|------------|
| 4 Wochen | 32 Wochen | 1 Woche | 3 Wochen | 8.5 Wochen |

2.6 Modellierung der Szenarien

Um das Zuchtverfahren des *Trypoxylus dichotomus* zu bewerten, werden in dieser Arbeit drei Szenarien untersucht. Das erste ist das Forschungsszenario. Dabei wird das Zuchtverfahren in der Forschungsanlage des Projektes «Food from Wood» analysiert. Die dabei angewandten Daten stammen aus Messwerten, die im Laufe der Experimente erhoben wurden. Die Forschungsanlage befindet sich im Linthal (GL) und wird mit Wasserkraftstrom versorgt (siehe Tabelle 3). Da das Zuchtverfahren in dieser Anlage noch nicht optimiert ist, wurde mit den korrigierenden Dozenten besprochen, zwei Zukunftsszenarien zu modellieren, um die Werte mit diejenige von Fleisch und anderen Insektenzuchtverfahren vergleichen zu können. Es wurden ein Kleinbetrieb und ein Grossbetrieb modelliert, die sich durch Produktionsvolumen, Standort und Bauweise unterscheiden. Für den Kleinbetrieb wurde ein Produktionsvolumen von 1'600 kg/Jahr (Tabelle 3), mit einem Holzgebäude, festgelegt. Als Standort wurde ebenfalls das Linthal ausgewählt. Beim Grossbetrieb handelt es sich um eine Industriehalle, die aus Beton gebaut ist, und befindet sich in der Stadt Zürich. Das Produktionsvolumen liegt bei 14'000 kg/Jahr (Tabelle 3). Für jedes Szenario wurde eine Best und eine Worst-Case Variante modelliert. Dabei bleiben die Produktionsverfahren und die Produktionsvolumen gleich. Es wurde jedoch die Transportdistanz der Rohstoffe, der Strommix und der Heizungstyp geändert. Diese Variablen wurden aufgrund des erheblichen Einflusses, die sie auf das Endresultat haben, ausgewählt. Für den Best Case wurden in beiden Betrieben einen Standardstrommix für die Wärme-Pumpen Heizung und einen Solarstrommix für die restlichen Prozesse angewendet. Die Lieferdistanz der Rohstoffe liegt bei 10 km. In der Worst Case Variante wurde der Standard Schweizer Strommix, eine Ölheizung für den Kleinbetrieb und eine Gasheizung für den Grossbetrieb ausgewählt. Die Lieferdistanz der Rohstoffe wurde auf 150 km festgelegt.

Tabelle 3: Darstellung der untersuchten Varianten. Der Produktionsvolumen wurde anhand folgender Formel berechnet: (Fläche Mastraum / %von Kisten gedeckte Fläche / Fläche Kiste)*n. gestapelten Boxen*Anzahl Puppen pro Kiste* Gewicht Puppe *Zuchtzyklen. Die Variablen der Formel sind ebenfalls in der Tabelle dargestellt. Der Kisten-Füllungsgrad der Masträume liegt 80%. Um den Anteil der Puppen pro Kiste zu berechnen wurde der Füllvolumen der Kisten durch 0.001 m3 geteilt, das den Substratbedarf pro Larve darstellt, korrigiert mit dem Faktor 0.95, der die Mortalität von 5% der Larven mitberücksichtigt.

| | Forschungsszenario | | Grossbetrieb | | Kleinbetrieb | |
|---------------------------|--------------------|--|------------------------|--------------------|------------------------|--------------------|
| | FS | | GBC | GWC | KBC | KWC |
| Standort | Linthal | | Zürich | | Linthal | |
| Strommix | Wasserkraft | | Wasserkraft/Solarstrom | Schweizer Strommix | Wasserkraft/Solarstrom | Schweizer Strommix |
| Bauweise | Beton | | Beton | | Holz | |
| Produktionsvolumen | N.A. | | 13947.19 | | 1603.13 | kg/Jahr |
| Anzahl produzierte Puppen | N.A. | | 929812.50 | | 106875.00 | |
| Anzahl produzierte FU | N.A. | | 13947.19 | | 1603.13 | Anzahl/Jahr |
| Anzahl Zuchtzyklen | N.A. | | 1.8 | | 1.8 | Anzahl/Jahr |
| Fläche Anlage | 150 | | 1000 | | 150 | m2 |
| Fläche Mastraum | 14.55 | | 400 | | 50 | m2 |
| Höhe Räume | 2.5 | | 4 | | 3 | m |
| Fläche Kisten | 0.21 | | 0.8 | | 0.21 | m2 |
| Anzahl gestapelte Kisten | 4 | | 4 | | 4 | |
| Volumen Kisten | 0.09 | | 0.34 | | 0.09 | m3 |
| Füllvolumen Kisten | 0.05 | | 0.29 | | 0.05 | m3 |
| Puppen pro Kiste | 49.88 | | 275.50 | | 49.88 | Anzahl |
| Gewicht Puppe | 0.015 | | 0.015 | | 0.015 | kg |

2.7 Systembild Forschungsszenario

Wie in der Abbildung 1: Systembild Forschungsszenario. Das Systembild kann in vier Bereiche unterteilt werden, die von einem gestrichelten Rahmen umgeben werden. Die Systemgrenze umfasst alle in der Ökobilanzierung berücksichtigten Prozesse. Der zweite Bereich ist von den Hintergrunddaten dargestellt. Des Weiteren werden die Bereiche markiert, in dem die Mast- und-Zuchtprozesse stattfinden. Das Kästchen der Funktionelle Einheit wird rot markiert. Das Systembild wurde mit der Software draw.io hergestellt. Abbildung 1 zu sehen ist, beginnt das System mit der Ernte des Holzes. Da für das Projekt Food from Wood Holzerste angewendet werden, wurde der erste Prozess in der Bilanzierung nicht berücksichtigt und befindet sich deshalb ausserhalb der Systemgrenze. In der Pilotphase konnte zum grössten Teil den Transport vermeiden werden, da das Holz aus der nebenbeistehenden Sägerei abgeholt werden konnte. Die Weizenkleie stammt aus der Mühle Kleeb in Rüegsbach, die etwa 166 km von Linthal entfernt ist. Das zugelieferte Holz muss so zerkleinert werden, dass es optimal fermentiert werden kann. Je nach Holzart wird ein unterschiedliches Zerkleinerungsverfahren angewendet, welches im Systembild als Zerkleinern I und II dargestellt wird. Beim Zerkleinern I handelt es sich um die Verarbeitung von gröberem Ästen (*Fagus sylvatica*, *Quercus robur*, *Pinus sylvestris*) durch einen Schneckenhäcksler. Weicheres Material wie Abfallsubstrat aus der Shiitake Produktion oder Sägemehl wird durch eine Hammermühle verarbeitet.

Im Prozess «Substrat mischen» werden alle Rohstoffe dem Substrat zugegeben und somit der Fermentierungsprozess vorbereitet. Das zerkleinertes Holz, das 30% der Endmischung ausmacht, wird mit 5% Weizenkleie und 65% Wasser homogen gemischt. Die Rohstoffe werden durch eine Mischmaschine verarbeitet. Demnach wird das Substrat zwei Wochen lang in einer Kunststoffkiste bei einer Temperatur von 26°C fermentiert. Für diesen Prozess ist jedoch keine externe Heizungsquelle nötig. In diesem Prozess werden Wasserdampf und CO₂ emittiert. Diese Emissionen wurden bei der Modellierung nicht berücksichtigt, da keine Messungen erhoben wurden. Bevor das Substrat verwendet werden kann, wird es noch mit dem Wasser angereicht, das während dem Fermentierungsprozess verdunstet ist, sowie mit dem Substrat, das beim vorheriger Zuchtgang nicht umgesetzt wurde. Im Forschungsszenario finden Zucht und Mast in zwei separaten Räumen statt, um den optimalen Wachstum der Larven und Schlupfrate der Eier zu gewährleisten. Im Systembild sind die zwei Räume durch gestrichelte Rahmen umgeben. Beide Räume werden auf einer Temperatur von 26°C gehalten.

Ein Lüftungsgerät sorgt für eine optimale Luftqualität der Räumlichkeiten. Die Beleuchtung ist nur im Paarungsprozess notwendig. Aufgrund des limitierten Einsatzes wird deshalb der Stromverbrauch der Beleuchtung nicht berücksichtigt. Nur für das Schlupfen der Eier ist eine

höhere Temperatur von 32°C notwendig. Eine Messung der Emissionen der Larven wurde in der Pilotphase von «Food from Wood» noch nicht durchgeführt, deshalb richten sich die Werte nach den Messungen von Oonincx et al. (2010).

Wenn der Zuchtzyklus abgeschlossen ist, werden die Puppen durch ein Rüttelsieb vom Restsubstrat und Kotpellets getrennt. Das Substrat, das noch nicht verdaut wurde, kann ohne weitere Verarbeitung für den nächsten Zuchtgang eingesetzt werden. Die Kotpellets verlassen die Systemgrenze, da dessen Weiterverwendung als Dünger in dieser Arbeit nicht erörtert wird. Nach der Trennung vom Substrat werden die Puppen eingefroren und für eine Zeit von ca. sechs Monate in dem Gefrierregal gelagert.

Im Forschungsszenario wird ein Wasserkraft Strommix eingesetzt.

Die für die Arbeit ausgewählten Funktionellen Einheiten sind 1 kg eingefrorene Puppen und 1 kg Proteine. Diese Funktionelle Einheiten wurden so ausgewählt, um den Vergleich mit weiteren Insektenzuchten-LCA zu erleichtern (Halloran, Hanboonsong, Roos & Bruun, 2017; Halloran et al., 2016; Smetana et al., 2016).

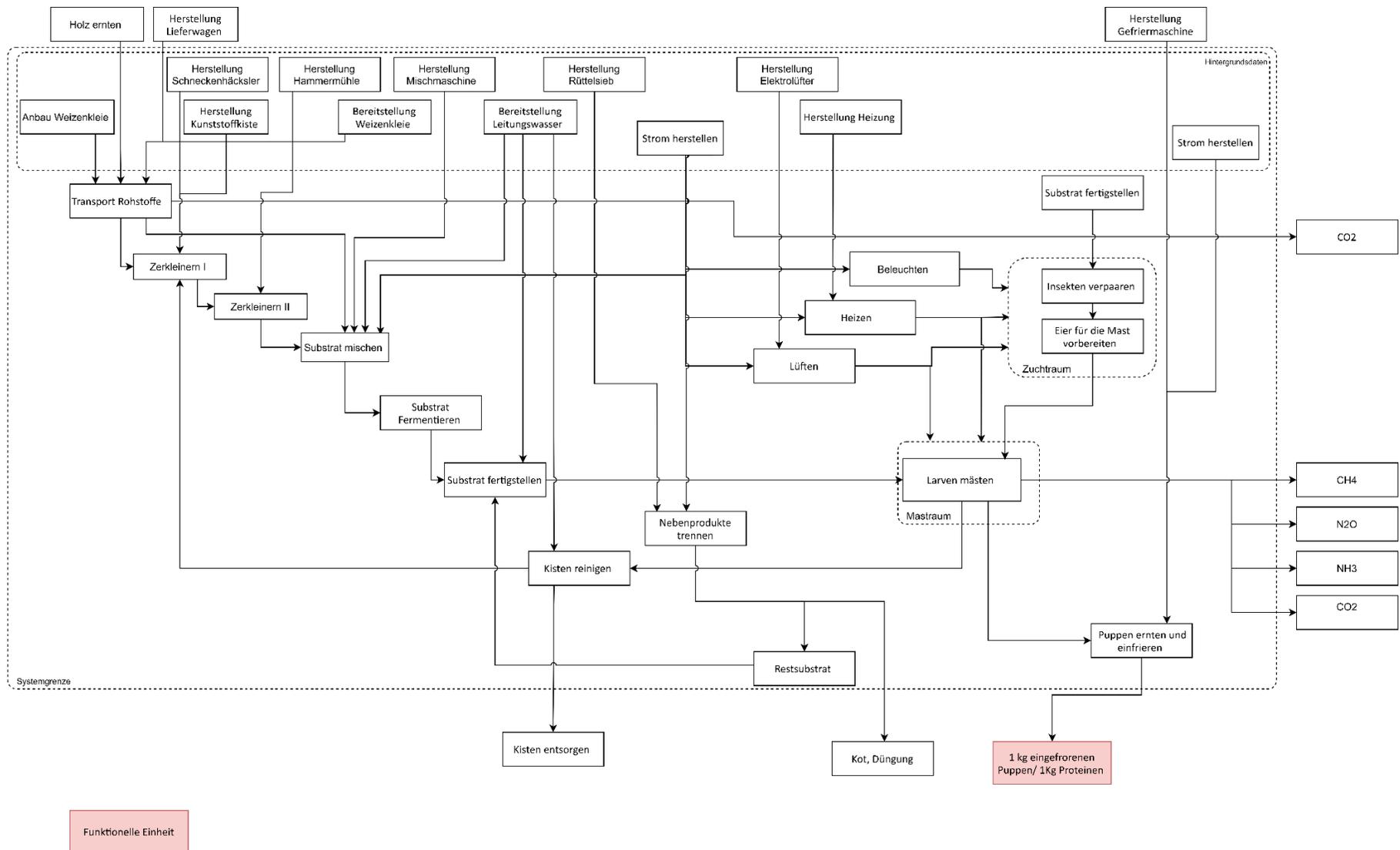


Abbildung 1: Systembild Forschungsszenario. Das Systembild kann in vier Bereiche unterteilt werden, die von einem gestrichelten Rahmen umgeben werden. Die Systemgrenze umfasst alle in der Ökobilanzierung berücksichtigten Prozesse. Der zweite Bereich ist von den Hintergrunddaten dargestellt. Des Weiteren werden die Bereiche markiert, in dem die Mast-und-Zuchtprozesse stattfinden. Das Kästchen der Funktionelle Einheit wird rot markiert. Das Systembild wurde mit der Software draw.io hergestellt.

2.8 Systembild Zukunftsszenarien

In der Abbildung 2 wird das Systembild der Zukunftsszenarien dargestellt. Die Ernte des Holzes wird hier ebenfalls nicht berücksichtigt. In den Zukunftsszenarien wird das Holz von externen Betrieben geliefert. Das eingekaufte Holz ist bereits so verarbeitet, dass die Zerkleinerung durch den Schneckenhäcksler im Betrieb überflüssig ist. Das Zerkleinern durch die Hammermühle ist jedoch immer noch notwendig, um ein homogenes Substrat zu erhalten. Die Lieferdistanz von Holz und Weizenkleie variiert zwischen Best und Worst Case. Im ersten Fall wurden für beide Rohstoffe eine Lieferdistanz von 10 km angenommen, während in der Worst Case Variante die Distanz auf 150 km festgelegt wurde.

Die gelb markierten Prozesse stellen den Nutzen und die Herstellung eines Elektro-Staplers dar. Dieses Gerät wird nur in der Grossbetrieb-Variante modelliert, da die eingesetzten Kunststoffkisten nicht von Hand getragen werden können, im Gegensatz zur Kleinbetrieb-Variante. Auf der Dimensionierung der Kiste wird im Sachbilanz-Kapitel detaillierter eingegangen.

Nach der Rüttelsieb-Trennung werden die Puppen verpackt und eingefroren. Diese werden in einem Gefrierlager für eine Durchschnittszeit von ca. sechs Wochen gelagert.

In den Zukunftsszenarien wird vorgesehen, dass die Zucht und die Mast in separaten Betrieben durchgeführt werden. Der Zuchtbetrieb erhält einen Anteil von Puppen aus dem Mastbetrieb, damit sie dort grossgezogen werden können. Haben die Puppe das Adult-stadion erreicht, denn sind sie für die Eierablage bereit. Nachdem die Eier geschlüpft sind, werden die geschlüpften Larven vier Wochen lang im Zuchtbetrieb behalten, bis sie das Stadion L2 erreicht haben. Zu diesem Zeitpunkt können sie dem Mastbetrieb zugestellt werden. Der Transport erfolgt mit einem Van. Dieser Prozess wurde in der Abbildung 3 dargestellt.

Der Ablauf des Zuchtbetriebes wird in dieser Arbeit in vereinfachter Form dargestellt. Zum Zeitpunkt des Verfassens dieser Arbeit, war aufgrund des noch laufenden Forschungsprojekt der detaillierter Prozessablauf noch nicht abschliessend definiert.

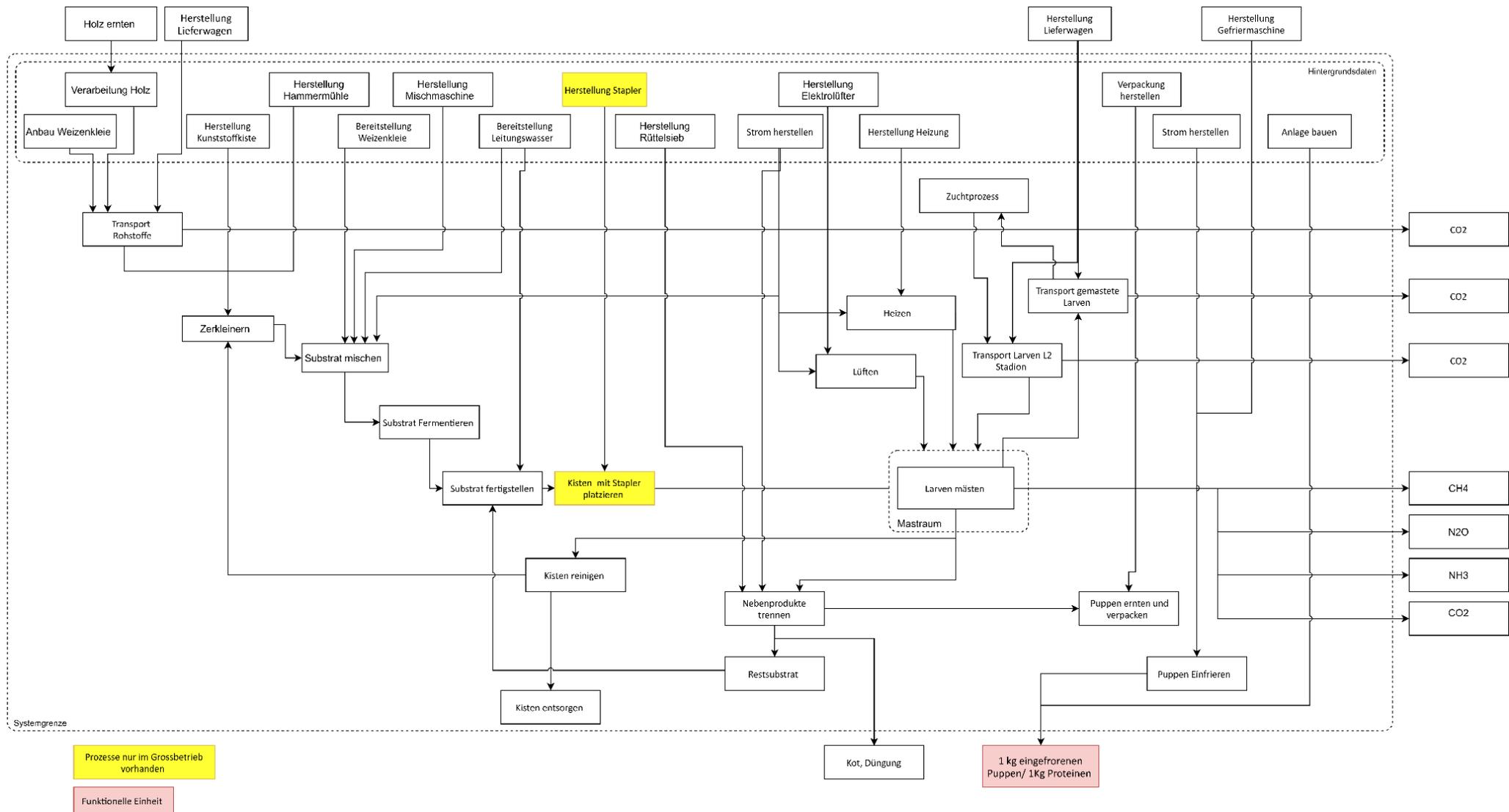


Abbildung 2: Systembild der Zukunftsszenarien. Die zwei Szenarien unterscheiden sich nur an den gelb markierten Kästchen. Diese Prozesse finden nur im Grossbetrieb statt. Das Systembild wurde mit der Software draw.io hergestellt.

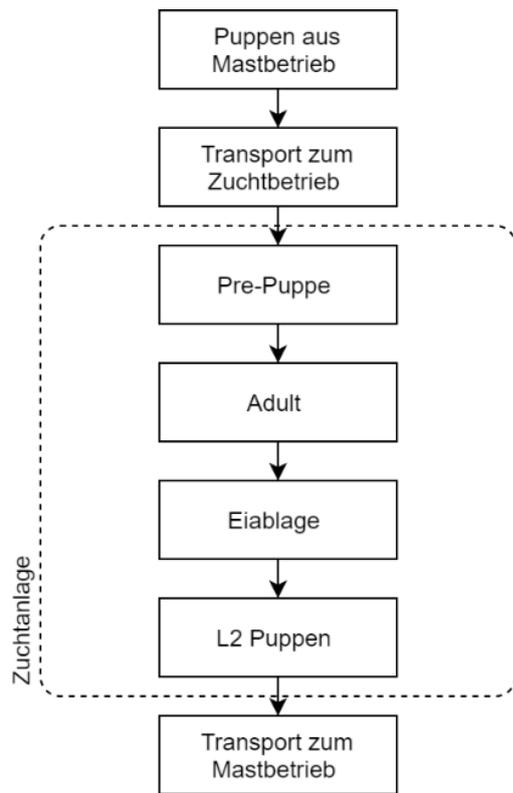


Abbildung 3: Ablauf der Zucht in den Zukunftsszenarien.

3 Sachbilanz

In diesem Kapitel wird die Sachbilanz der untersuchten Szenarien durchgeführt. Die Ecoinvent Datensätze wurden mit einer Cut-off Allokationsmethode modelliert (Ecoinvent, 2021). Die Sachbilanz wurde anhand der Funktionelle Einheit von 1 kg Frischprodukt (FU-F) berechnet. Die in der Sachbilanz benutzten Daten stammen, wenn nicht anders spezifiziert, aus der Messungen des Projektes «Food from Wood». Die Daten sind im Anhang zu finden.

3.1 Substrat Rohstoffe

Die Substratzusammensetzung wurde im Laufe des Projekts mehrmals geändert. Die in der Arbeit benutzte Zusammensetzung stellt für die Entwicklung der Insekten die aktuell optimalen Bedingungen dar. Es handelt sich um nur 3 Zutaten: Wasser, das 65% der Mischung ausmacht, Holz, das 30 % des Substrats darstellt, und Weizenkleie, mit 5% der Masse des Substrats (siehe Tabelle 4). Im Forschungsszenario wurde mit unterschiedlichen Holzarten gearbeitet, davon wird jedoch die Buche¹ bevorzugt. Im Forschungsszenario stammt das Holz zu einem bedeutenden Anteil aus Produktionsresten der Sägerei, die sich neben der Produktionsanlage im Linthal befindet. Ebenfalls wurden Abfallprodukte der Pilzzucht und weitere Holzarten angewendet². In den Zukunftsszenarien wird voraussichtlich auch mit Abfallprodukten gearbeitet. Für die Modellierung des Holzes wurde ein gemeinsamer Datensatz für alle Szenarien angewendet, der in der Tabelle 5 aufgezeigt wird. Der Datensatz berücksichtigt die Verarbeitung von Hartholz-Späne in der Schweiz. Es wurde der Datensatz für Hartholz ausgewählt, da die Buche zu dieser Kategorie zugeteilt werden kann (Holzvomfach, 2021). Für die Weizenkleie wurde 5% des Gewichtes, 0.05 kg, für die Berechnung in Sima Pro eingegeben. In Sima Pro ist nur ein Datensatz über Weizen vorhanden. 5% entspricht der Allokationswert von Weizenkleie, der in der Studie von Salim et al. (2019) angegeben wird.

[1],[2] Mitteilung des Projektleiters

Tabelle 4: Berechnung des Substratverbrauch anhand eines kg Puppen. Die Zusammensetzung des Substrates wird in Massenprozent angegeben. Eine Larve in der Mastphase verbraucht bis zur Verpuppung 1 Liter Substrat, das 0.3 kg Masse entsprechen.

| Input | Menge | Einheit | Anteil Pro FU-F | |
|---------------------------------|-------|---------|-----------------|---------|
| | | | (1kg Puppen) | Einheit |
| Anteil Weizenkleie | 5 | % | 1 | kg |
| Anteil Wasser | 65 | % | 13 | kg |
| Anteil Holz | 30 | % | 6 | kg |
| Verbrauchtes Substrat pro Puppe | 0.001 | | | |
| | | m3 | 20 | kg |
| Gewicht Substrat pro Liter | 0.3 | kg | | |

Tabelle 5: Datensatz Substratmaterial Forschungsszenario

| Menge | Einheit | Berechnung | Ecoinvent Datensatz |
|-------|---------|---|--|
| 0.05 | kg | Substratverbrauch pro FU-F*Anteil Weizenkleie | Wheat grain, organic {CH} wheat production, organic |
| 13 | kg | Substratverbrauch pro FU-F*Anteil Wasser | Tap water {CH} market for |
| 6 | kg | Substratverbrauch pro FU-F*Anteil Holz | Shavings, hardwood, loose, measured as dry mass {CH} planing, beam, hardwood, u=10% |

3.1.1 Transport Forschungsszenario

Im Forschungsszenario wird ein erheblicher Anteil des Holzes aus dem nebenbeistehenden Sägereibetrieb beschafft. Es wird somit angenommen, dass 50%³ des Holzes mit einem Lieferwagen geliefert wird. Die Lieferdistanz liegt im Schnitt bei 50 km. Für die Modellierung in Sima Pro wird ein Transport-Datensatz für ein leichtes Nutzfahrzeug (siehe Tabelle 6) verwendet. Die gelieferte Holzmenge entspricht der Hälfte des benötigten Holz pro Funktionelle Einheit à 3 kg.

Tabelle 6: Datensatz Holzlieferung Forschungsszenario.

| Menge | Einheit | Berechnung | Ecoinvent Datensatz |
|-------|---------|---|--|
| 150 | kg/km | Menge Holz pro $FU-F \cdot 0.5 \cdot \text{Lieferdistanz}$ | Transport, freight, light commercial vehicle {CH} market for transport, freight, light commercial vehicle |

Die Weizenkleie kommt aus der Mühle Kleeb, in Rüegsbach, die 166 km von der Forschungsanlage in Linthal entfernt ist. Die pro Funktionelle Einheit gelieferte Menge liegt bei 1 kg Weizenkleie. In der Tabelle 7 wird ein Wert von 166 kg/km angegeben, resultierend aus dem Multiplikationsprodukt der Distanz und der Transportmenge von 0.05 kg. Für den Transport der Weizenkleie wurde derselbe Datensatz wie für die Holzlieferung angewendet.

Tabelle 7: Datensatz Weizenkleie-Lieferung im Forschungsszenario

| Menge | Einheit | Berechnung | Ecoinvent Datensatz |
|-------|---------|--|--|
| 166 | kg/km | Menge Weizenkleie pro $FU-F \cdot \text{Lieferdistanz}$ | Transport, freight, light commercial vehicle {CH} market for transport, freight, light commercial vehicle |

3.1.2 Transport Substratrohstoff Best Case für Klein-und-Grossbetrieb

Für die Best-Case Variante wird eine Lieferdistanz von 10 km für beide Betriebe angenommen. Der benutzte Transportdatensatz gleicht der der Forschungsvariante. In der Tabelle 8 wird der Datensatz des Holztransportes dargestellt. Der Wert von 60 kg/km wurde aus der Multiplikation der Menge Holz pro FU-F, 6 kg und der Lieferdistanz berechnet. In der Tabelle 9 wird der Datensatz des Transportes der Weizenkleie dargestellt. Hier liegt der Wert bei 10 kg/km, da die gelieferte Menge bei 1 kg liegt.

[3]Annahme des Autors

Tabelle 8: Datensatz Holztransport

| Menge | Einheit | Berechnung | Ecoinvent Datensatz |
|-------|---------|-----------------------------------|---|
| 60 | kg/km | Menge Holz pro FU-F*Lieferdistanz | Transport, freight, light commercial vehicle {CH} market for transport, freight, light commercial vehicle |

Tabelle 9: Datensatz Transport Weizenkleie

| Menge | Einheit | Berechnung | Ecoinvent Datensatz |
|-------|---------|--|---|
| 10 | kg/km | Menge Weizenkleie pro FU-F * Lieferdistanz | Transport, freight, light commercial vehicle {CH} market for transport, freight, light commercial vehicle |

3.1.3 Transport Substratrohstoff Worst Case Klein-und-Grossbetrieb

Im Worst Case wurden für die Rohstoffe Holz und Weizenkleie eine Lieferdistanz von 150 km festgelegt. Um den Wert für den SimaPro Datensatz zu berechnen, der in kg/km ausgedrückt wird, wurde die pro FU-F gelieferte Holzmenge, 6 kg, mit der Lieferdistanz multipliziert, wie in der Tabelle 10 aufgezeigt wird. Für die Weizenkleie wurde dieselbe Berechnung durchgeführt, wie in der Tabelle 11 dargestellt wird. Der Unterschied liegt ausschliesslich in der Liefermenge, die bei der Weizenkleie bei 1 kg liegt.

Tabelle 10: Datensatz Holztransport

| Menge | Einheit | Berechnung | Ecoinvent Datensatz |
|-------|---------|-----------------------------------|---|
| 900 | kg/km | Menge Holz pro FU-F*Lieferdistanz | Transport, freight, light commercial vehicle {CH} market for transport, freight, light commercial vehicle |

Tabelle 11: Datensatz Weizenkleie-Transport

| Menge | Einheit | Berechnung | Ecoinvent Datensatz |
|-------|---------|--|---|
| 150 | kg/km | Menge Weizenkleie pro FU-F * Lieferdistanz | Transport, freight, light commercial vehicle {CH} market for transport, freight, light commercial vehicle |

3.2 Kunststoffkisten

Die Kunststoffkisten werden für den Fermentierungsprozess und den gesamten Mast-Prozess angewendet. Die Kisten für den Kleinbetrieb und das Forschungsszenario wiegen 2.7 kg, die im Grossbetrieb 21 kg (siehe Tabelle 12). Die Kisten unterscheiden sich nur im Gewicht, während das Material in allen Szenarien gleich bleibt, dadurch wurde mit demselben Datensatz modelliert. Es wird angenommen, dass das Material in einer Kehrichtverbrennung entsorgt wird. Nach jedem Zuchtzyklus werden die Kisten mit Wasser gereinigt. Der Wasserverbrauch wurde für die 2.7 kg Kisten von den Mitarbeitern von «Food from Wood» gemessen. Für die 21 kg Kisten wurde der Wasserverbrauch hochgerechnet, wie in der Tabelle 13 zu lesen ist. Der Datensatz für den Kleinbetrieb und das Forschungsszenario wird in der Tabelle 14 aufgezeigt, der für den Grossbetrieb in der Tabelle 15.

Tabelle 12: Berechnung des Anteil an benutzte Kunststoffkiste pro FU-F. Die angegebenen Lebensdauer bezieht sich auf einem Schätzwert des Projektleiters von «Food from Wood». Der Volumen der Kisten wird für die Berechnung des Wasserverbrauches in der Tabelle 13 angewendet. Die Anzahl an Zuchtzyklen wird in Tabelle 3 aufgezeigt und liegt bei 1.8 pro Jahr.

| | Kleinbetrieb/ Forschungsszenario | Grossbetrieb | Einheit | Berechnung |
|---|---|---------------------|----------------|---|
| Gewicht Kisten | 2.70 | 21.00 | kg | |
| Volumen Kisten | 0.09 | 0.34 | m ³ | |
| Anzahl Larven pro Kiste | 50 | 275 | | |
| Gewicht Kisten für das Zuchten von 1 kg Puppen | 3.61 | 5.08 | kg | Gewicht Kisten* Larven pro FU-F/ Anzahl Larven pro Kiste |
| Lebensdauer | 8.00 | 8.00 | Jahre | |
| Gewicht Kunststoffkiste pro FU-F und Zuchtzyklus | 0.25 | 0.35 | kg | Gewicht Kisten pro FU-F /Zuchtzyklen*Lebensdauer |

Tabelle 13: Berechnung für den Wasserverbrauch für das Reinigen der Kisten. Für diese Berechnung wird den Volumen von 0.09m³ für den Kleinbetrieb/Forschungsszenario und 0.34m³ für den Grossbetrieb angewendet. Der Wasserverbrauch pro FU-F ist im Kleinbetrieb grösser als für das Reinigen einer Kiste, da mehr als eine benötigt ist für das Mästen von 1 kg Puppen. Andererseits können in den Kisten des Grossbetriebes mehr als ein kg Puppen produziert werden, daher ist der Wasserverbrauch pro FU-F geringer als das Reinigen der ganze 0.34m³ Kiste.

| | Kleinbetrieb/ Forschungsszenario | Grossbetrieb | Einheit | Berechnung |
|---|-------------------------------------|--------------|---------|--|
| Anteil Kunststoffkiste für die Zucht von 1 kg Puppen | 1.34 | 0.24 | | 1Kiste*Anzahl Puppen pro FU-F/Anzahl Puppen pro Kiste |
| Wasserverbrauch für die Reinigung einer 0.09 m ³ Kiste | 2.50 | | kg | |
| Wasserverbrauch für die Reinigung einer 0.34 m ³ Kiste | | 9.44 | kg | Wasserverbrauch für 0.9m ³ Kiste*Volumen Grosse Kisten /Volumen kleine Kisten |
| Wasserverbrauch pro FU-F | 3.34 | 2.29 | kg | Wasserverbrauch Pro FU-F: Wasserverbrauch für 0.09/0.34 ¹ m ³ Kiste*Anzahl kisten pro FU |

Tabelle 14: Datensatz Kunststoffkisten kleinbetrieb/Forschungsszenario

| Menge | Einheit | Berechnung | Ecoinvent Datensatz |
|-------|---------|--|---|
| 0.25 | kg | Gewicht Kiste pro FU-F /Zuchtzyklen*Lebensdauer | Extrusion of plastic sheets and thermoforming, inline {GLO} market for |
| 3.34 | kg | Wasserverbrauch für 1 Kiste*Anzahl Kisten pro FU-F | Tap water {CH} market for |
| 0.25 | kg | | Waste plastic, mixture {CH} market for waste plastic, mixture |

Tabelle 15: Datensatz Kunststoffkisten Grossbetrieb

| Menge | Einheit | Berechnung | Ecoinvent Datensatz |
|-------|---------|--|--|
| 0.35 | kg | Gewicht Kiste pro FU-F /Zuchtzyklen*Lebensdauer | Extrusion of plastic sheets and thermoforming, inline {RoW} processing |
| 2.29 | kg | Wasserverbrauch für 1 Kiste*Anzahl Kisten pro FU-F | Tap water {CH} market for |
| 0.35 | kg | | Waste plastic, mixture {CH} market for waste plastic, mixture |

3.3 Maschineneinsatz

In diesem Unterkapitel werden die maschinellen Prozesse, die zur Mast und Zucht, sowie der Ernte des *Trypoxylus dichotomus* dienen, aufgezeigt. Für jede Maschine wurde die Einsatzdauer sowie die Zuteilung der Maschine pro FU-F berechnet. Diese Faktoren werden für alle Szenarien gleich berechnet. Somit unterscheiden sich die Best und Worst Case Varianten anhand des Strommixes. Im Grossbetrieb wird zusätzlich ein Stapler modelliert, weil die Kisten in diesem Szenario, aufgrund der Dimensionierung, nicht wie im Kleinbetrieb und im Forschungsszenario von Hand getragen werden können. Der Schneckenhäcksler dagegen wird ausschliesslich im Forschungsszenario eingesetzt.

3.3.1 Zerkleinern durch Schneckenhäcksler (Forschungsszenario)

Dies stellt den ersten Schritt der Verarbeitung des Substrats dar. Der Einsatz des Schneckenhäckslers ist von der Dicke des Holzmaterials abhängig. Dieser wird nur für 50% des Rohstoffes eingesetzt. Der restliche Anteil kommt aus der nebenstehenden Sägerei in Form von Sägespane, die keine Verarbeitung mit dem Schneckenhäcksler benötigt. In der Tabelle 16 werden die technischen Daten und die Berechnungen für die Modellierung in Sima Pro aufgezeigt. In der Tabelle 17 ist der Datensatz für Sima Pro ersichtlich.

Tabelle 16: Technische Daten Schneckenhäcksler. Aus dem Einsatzdauer für 1000 kg Holz wird der Einsatzdauer pro FU-F berechnet. Das Gewicht des Holz pro FU-F, das in der Berechnung benutzt wird, liegt bei 6 kg. Da der Schneckenhäcksler für 50% des Holzes eingesetzt wird, werden bei der Berechnungen der Zuteilung der Maschine pro FU-F sowie des Dieselverbrauches pro FU-F mit dem Faktor 0.5 korrigiert. Die Daten der Leistung, des Wirkungsgrad, der Lebensdauer, des Gewichtes und des Einsatzdauer für 1000 kg stammen aus der Arbeit von Abplanalp (2019).

| Input | Menge | Einheit | Berechnungen |
|-------------------------------|----------|---------|--|
| Leistung | 14.71 | kW | |
| Wirkungsgrad | 40.00 | % | |
| Einsatzdauer für 1000 kg Holz | 1.50 | std. | |
| Einsatzdauer für 1 FU-F | 0.01 | std. | 1.5 std. * kg Holz pro FU-F /1000 kg |
| Lebensdauer | 10000.00 | std. | |
| Gewicht | 200.00 | kg | |
| Zuteilung Maschine pro FU-F | 3.00E-06 | kg | Einsatzdauer für 1 FU-F / Lebensdauer*Gewicht*0.5 |
| Energiedichte Diesel | 11.90 | kWh/kg | |
| Verbrauch Diesel pro FU-F | 1.39E-04 | kg | Leistung*Einsatzdauer pro FU-F / (Energiedichte*Wirkungsgrad) *0.5 |

Tabelle 17: Datensatz Schneckenhäcksler. Die Herstellung sowie das Verbrennen des Diesels wurden mitberücksichtigt. Für den Verbrennungsdatsatz musste die Verbrauchte Menge mit der Energiedichte ausmultiplizieren, da der Datensatz in kWh ausgedruckt wird.

| Menge | Einheit | Berechnung | Ecoinvent Datensatz |
|----------|---------|--|---|
| 1.39E-04 | kg | Leistung*Zeit pro FU-F / (Energiedichte*Wirkungsgrad) *0.5 | Diesel, low-sulfur {CH} production |
| 3.00E-6 | kg | Einsatzdauer FU/Lebensdauer*Gewicht*0.5 | Industrial machine, heavy, unspecified {GLO} market for |
| 1.65E-03 | kWh | Verbrauch Diesel pro FU-F * Energiedichte Diesel | Diesel, burned in building machine {GLO} market for |

3.3.2 Zerkleinern durch Hammermühle

Die Hammermühle wird in allen Szenarien für die Zerkleinerung des Holzes eingesetzt. Durch diese Maschine wird das Holz auf 1 bis 3 mm gemahlen. In den Zukunftsszenarien erfolgt dieser Prozess bereits nach dem Erhalt des Holzmaterials, während im Forschungsszenario das Holz zuerst durch den Schneckenhäcksler vorgemahlen wurde. Die Datensätze unterscheiden sich im Strommix, während das Gewicht pro FU-F unverändert bleibt. In der Tabelle 18 werden die technische Daten der Hammermühle dargestellt. Die Datensätze der drei Szenarien werden in der Tabelle 19, Tabelle 20 und Tabelle 21 dargestellt.

Tabelle 18: Technische Daten Hammermühle. Die Lebensdauer der Hammermühle ist auf einen Schätzwert basiert. Der Einsatzdauer pro FU-F wurde aus dem Einsatzdauer pro 1000 kg gerechnet. Die Daten der Leistung, Lebensdauer, Einsatzdauer für 1000 kg und die Leistung stammen aus der Arbeit von Abplanalp (2019).

| Input | Menge | Einheit | Berechnung |
|--------------------------|----------|---------|-------------------------------|
| Leistung | 7.5 | kW | |
| Gewicht | 150.00 | kg | |
| Einsatzdauer für 1000 kg | 1.5 | std. | |
| Einsatzdauer für 1 FU-F | 0.009 | std. | 1.5 std*kg Holz pro FU/1000kg |
| Lebensdauer | 10000.00 | std. | |

Tabelle 19: Datensatz Hammermühle (Forschungsszenario)

| Menge | Einheit | Berechnung | Ecoinvent Datensatz |
|----------|---------|-------------------------------------|--|
| 0.068 | kW | Leistung*Einsatzdauer pro FU | Electricity, low voltage {CH} production, hydro power mix Alloc Rec, U Green Hospital |
| 0.000135 | Kg | Einsatzdauer FU/Lebensdauer*Gewicht | Industrial machine, heavy, unspecified {GLO} market for |

Tabelle 20: Datensatz für Hammermühle (Best Case, Klein und Grossbetrieb)

| Menge | Einheit | Berechnung | Ecoinvent Datensatz |
|----------|---------|-------------------------------------|--|
| 0.068 | kW | Leistung*Einsatzdauer pro FU | Electricity, low voltage {CH} electricity production, photovoltaic, 3kWp slanted-roof installation, single-Si, panel, mounted |
| 0.000135 | Kg | Einsatzdauer FU/Lebensdauer*Gewicht | Industrial machine, heavy, unspecified {GLO} market for |

Tabelle 21: Datensatz für Hammermühle (Worst Case, Klein und Grossbetrieb)

| Menge | Einheit | Berechnung | Ecoinvent Datensatz |
|----------|---------|--|---|
| 0.068 | kW | Leistung*Einsatzdauer pro FU | Electricity, low voltage {CH} market for |
| 0.000135 | Kg | Einsatzdauer FU/Lebensdauer*Gewicht | Industrial machine, heavy, unspecified {GLO} market for |

3.3.3 Mischmaschine

In der Mischmaschine wird das zerkleinerte Holz, das Wasser und die Weizenkleie zugegeben, in der Zusammensetzung, die in der Tabelle 5 beschrieben wird. Bei einer vollständigen Ladung, 110 kg, dauert der Mischprozess 12 Minuten. Die Berechnung, um die Einsatzdauer pro FU-F herauszufinden, ist in der Tabelle 22 dargestellt. Der Stromverbrauch pro funktionelle Einheit Frischprodukt liegt bei $7.3 \cdot 10^{-2}$ kW. Auch für die Mischmaschine unterscheiden sich die drei Szenarien nur aufgrund des Strommixes. In der Tabelle 23 wird das Forschungsszenario dargestellt. Die Tabelle 24 stellt die Best Case Variante für Gross-und-Kleinbetrieb dar. In der Tabelle 25 wird der Datensatz der Worst Case Variante dargestellt, ebenfalls für Gross-und-Kleinbetrieb, die einen Standard-Strommix anwenden.

Tabelle 22: technische Daten Mischmaschine. Die Daten von Leistung, Einsatzdauer für 110 kg, Lebensdauer und Gewicht wurden aus der Arbeit von Abplanalp (2019) bezogen.

| Input | Menge | Einheit | Berechnung |
|-------------------------|----------|---------|------------------------------------|
| Leistung | 2.00 | kWh | |
| Einsatzdauer für 110 kg | 0.20 | std. | |
| Einsatzdauer für 1 FU | 0.04 | std. | 0.2 std.*kg Substrat pro FU/110 kg |
| Lebensdauer | 10000.00 | std. | |
| Gewicht | 120.00 | kg | |

Tabelle 23: Datensatz Mischmaschine Forschungsszenario

| Menge | Einheit | Berechnung | Ecoinvent Datensatz |
|---------|---------|--|---|
| 7.3E-02 | kW | Leistung*Einsatzdauer pro FU | Electricity, low voltage {CH} production, hydro power mix Alloc Rec, U Green Hospital |
| 4E-04 | Kg | Einsatzdauer FU/Lebensdauer*Gewicht | Industrial machine, heavy, unspecified {GLO} market for |

Table 24: Datensatz Mischmaschine (Best Case)

| Menge | Einheit | Berechnung | Ecoinvent Datensatz |
|---------|---------|--|--|
| 7.3E-02 | kW | Leistung*Einsatzdauer pro FU | Electricity, low voltage {CH} electricity production, photovoltaic, 3kWp slanted-roof installation, single-Si, panel, mounted |
| 4E-04 | Kg | Einsatzdauer FU/Lebensdauer*Gewicht | Industrial machine, heavy, unspecified {GLO} market for |

Table 25: Datensatz Mischmaschine (Worst Case)

| Menge | Einheit | Berechnung | Ecoinvent Datensatz |
|---------|---------|--|--|
| 7.3E-02 | kW | Leistung*Einsatzdauer pro FU | Electricity, low voltage {CH} market for |
| 4E-04 | Kg | Einsatzdauer FU/Lebensdauer*Gewicht | Industrial machine, heavy, unspecified {GLO} market for |

3.3.4 Substrat durch Rüttelsieb trennen

Am Ende des Zuchtzyklus müssen die Puppen von dem nicht umgesetzten Substrat und Kotpellets getrennt werden. Dieser Prozess erfolgt mit dem Einsatz eines Rüttelsiebs. In einer Stunde können bis zu 774 kg Substrat trennen werden. Für eine Funktionelle Einheit sind 1.8 Minuten notwendig, wie in der Tabelle 26 zu sehen ist. In der Tabelle 27 wird das Forschungsszenario dargestellt, das einen Wasserkraft Strommix anwendet. Der Datensatz, der in der Tabelle 28 dargestellt ist, umfasst die Best Case Variante für beide Zukunftsszenarien. Die Tabelle 29 stellt den Datensatz für die Gross-und-Kleinbetrieb im Worst Case dar.

Tabelle 26: Technische Daten Rüttelsieb. Die Lebensdauer ist basiert auf einen Schätzwert basiert. Das Gewicht des Substrates pro FU-F wird in der Tabelle 5 dargestellt und liegt bei 20 kg. Die Daten von Leistung, Gewicht, Einsatzdauer für 774 kg und Lebensdauer wurden aus der Arbeit von Abplanalp (2019) bezogen.

| Input | Menge | Einheit | Berechnung |
|-------------------------|-----------|---------|--------------------------------------|
| Leistung | 0.80 | kWh | |
| Gewicht | 150.00 | kg | |
| Einsatzdauer für 774 kg | 1.00 | std. | |
| Einsatzdauer für 1 FU-F | 0.03 | std. | 1 std.*kg Substrat pro FU-F / 774 kg |
| Lebensdauer | 10'000.00 | std. | |

Tabelle 27: Datensatz Rüttelsieb (Forschungsszenario)

| Menge | Einheit | Berechnung | Ecoinvent Datensatz |
|--------------------------|---------|--|--|
| 0.02 | kW | Leistung*Einsatzdauer pro FU | Electricity, low voltage {CH} production, hydro power mix Alloc Rec, U Green Hospital |
| 4.4* 10 ⁻⁴ | Kg | Einsatzdauer FU/Lebensdauer*Gewicht | Industrial machine, heavy, unspecified {GLO} market for |

Tabelle 28: Datensatz Rüttelsieb (Best Case)

| Menge | Einheit | Berechnung | Ecoinvent Datensatz |
|----------|---------|--|--|
| 0.02 | kW | Leistung*Einsatzdauer pro FU-F | Electricity, low voltage {CH} electricity production, photovoltaic, 3kWp slanted-roof installation, single-Si, panel, mounted |
| 4.4E -04 | Kg | Einsatzdauer FU-F /Lebensdauer*Gewicht | Industrial machine, heavy, unspecified {GLO} market for |

Tabelle 29: Datensatz Rüttelsieb (Worst Case)

| Menge | Einheit | Berechnung | Ecoinvent Datensatz |
|----------|---------|---|--|
| 0.02 | kW | Leistung*Einsatzdauer pro FU-F | Electricity, low voltage {CH} market for |
| 4.4E -04 | Kg | Einsatzdauer FU-F / Lebensdauer*Gewicht | Industrial machine, heavy, unspecified {GLO} market for |

3.3.5 Stapler

Im Grossbetrieb werden Kunststoffkisten angewendet, dessen Gewicht zu hoch ist, um von Hand getragen zu werden. Dementsprechend wird für dieses Szenario ein Elektrostapler modelliert. Die technischen Daten, die in der Tabelle 30 dargestellt werden, beziehen sich auf das «SolidHub Elektrostapler HE1200/3» Modell (Topregal, 2020). Die Lebensdauer wurde auf 10'000 Stunden geschätzt, dieselbe Annahme, die für alle angewendeten Geräte getroffen wurde. In der Tabelle 31 wird der Datensatz für die Best Case Variante dargestellt, in der Tabelle 32 die Worst Case Variante.

Tabelle 30: Technische Daten Elektrostapler (Topregal, 2020). Der Einsatzdauer wurde auf 5 min pro Kiste geschätzt. Basierend auf diese Annahme wurde den Einsatzdauer pro FU-F gerechnet.

| Input | Menge | Einheit | Berechnung |
|-----------------------------|-------|---------|--|
| Leistung | 0.75 | kW | |
| Gewicht | 465 | kg | |
| Lebensdauer | 1000 | std. | |
| Einsatzdauer pro Kiste | 0.08 | std. | |
| Kisten pro FU-F | 0.24 | | 1 FU-F/Puppen pro Kiste |
| Einsatzdauer für 1 FU-F | 0.02 | | Einsatzdauer pro Kiste*Kisten pro FU-F |
| Energieverbrauch | 0.01 | kWh | Leistung*Einsatzdauer für 1 FU-F |
| Zuteilung Maschine pro FU-F | 0.01 | kg | Einsatzdauer FU/Lebensdauer*Gewicht FU-F |

Tabelle 31: Datensatz Elektrostapler (Best Case)

| Menge | Einheit | Berechnung | Ecoinvent Datensatz |
|-------|---------|---------------------------------------|--|
| 0.01 | kWh | Leistung*Einsatzdauer pro FU-F | Electricity, low voltage {CH} electricity production, photovoltaic, 3kWp slanted-roof installation, single-Si, panel, mounted |
| 0.01 | Kg | Einsatzdauer FU-F/Lebensdauer*Gewicht | Building machine {GLO} market for |

Tabelle 32: Datensatz Elektrostapler (Worst Case)

| Menge | Einheit | Berechnung | Ecoinvent Datensatz |
|-------|---------|--|---|
| 0.01 | kWh | Leistung*Einsatzdauer pro FU | Electricity, low voltage {CH} market for |
| 0.01 | Kg | Einsatzdauer FU/Lebensdauer*Gewicht | Building machine {GLO} market for |

3.3.6 Tiefkühlung Forschungsszenario

Nachdem die Puppen mit dem Rüttelsieb aus dem Restsubstrat und den Kotpellets getrennt werden, werden diese durch Tiefkühlung getötet. Im Forschungsszenario wird dafür eine Tiefkühltruhe benutzt. Die technischen Daten, die in der Tabelle 33 dargestellt sind, wurden aus der Webseite des Verkäufers erhoben (Nettoshop, 2020). Das Gewicht und die Lagerzeit der eingefrorenen Puppen basieren auf den Schätzungen des Leiters des Projektes «Food from Wood». Im Sima Pro Datensatz, der in der Tabelle 34 dargestellt wird, wird nur der Energieverbrauch angegeben. Die Herstellung der Tiefkühltruhe wurde nicht mitberücksichtigt.

Tabelle 33: Berechnungen Energiebedarf Tiefkühlung für Forschungsszenario. Der Energieverbrauch für 5 kg Puppen wurde durch 5 geteilt, um den Wert pro FU-F zu bestimmen. Der Volumen der Puppen wurde benutzt, um das Verhältnis zum Energieverbrauch bei Volllast zu berechnen.

| Input | Menge | Einheit | Berechnung |
|--|-------|---------|---|
| Energieverbrauch bei Volllast (24 Stunden) | 0.37 | kWh | |
| Fassungsvolumen | 65 | l | |
| Gewicht Eingefrorene Puppen | 5 | kg | |
| Volumen Eingefrorene Puppen (5kg) | 4.15 | l | 1 Puppe=12.45ml (Durchschnittswert, W=11.4ml, M=13.5 ml) 1Puppe= 15 g Volumen=Volumen 1 Puppe*5kg/0.015kg |
| Durchschnittliche Einfrierzeit | 180 | Tage | |
| Energieverbrauch für 5 kg Puppen | 4.25 | kWh | Energieverbrauch bei Volllast*Volumen 5 kg Puppen/Fassungsvolumen *durchschnittliche Einfrierzeit |
| Energieverbrauch pro FU-F | 0.85 | kWh | Energieverbrauch/5 kg |

Tabelle 34: Datensatz Tiefkühlung Forschungsszenario

| Menge | Einheit | Berechnung | Ecoinvent Datensatz |
|-------|---------|-----------------------|--|
| 0.85 | kWh | Energieverbrauch/5 kg | Electricity, low voltage {CH} production, hydro power mix Alloc Rec, U Green Hospital |

3.3.7 Tiefkühlung Zukunftsszenarien

In den Zukunftsszenarien wird vorgesehen, dass die Puppen im Schnitt sechs Wochen lang gelagert werden, bevor sie den Lebensmittelbetrieben geliefert werden. Der Energieverbrauch für den Einfrierprozess der Zukunftsvarianten wurde basierend auf den Daten der Arbeit von Scanu (2019), berechnet. Spezifisch beschreiben die Daten den Prozess eines Tiefkühlagers für Fleisch. Davon sind die Leistung, der Lagerbestand und die Kühlflüssigkeit bekannt. Für einen Lagerbestand von 2500 kg wird eine Leistung von 2,8 kWh erwartet. Um den Energiebedarf zu berechnen wurde zuerst die Leistung für die gelagerte Menge proportionell zum Referenzwert von 2500kg berechnet. Da 1.8 Zuchtzyklen pro Jahr erfolgen, wurde das Produktionsvolumen durch 1.8 geteilt. Somit erhält man die pro Zuchtzyklus gelagerte Menge. Der Stromverbrauch für einen Zuchtzyklus entspricht der Leistung, ausmultipliziert mit 12 Stunden und 42 Tagen (6Wochen). Die Leistung wird zuerst mal 12 Stunden ausmultipliziert, da dies der effektiven Einsatzzeit des Kühlgerätes entspricht. Die Berechnungen für den Kleinbetrieb werden in der Tabelle 35 dargestellt, die für den Grossbetrieb in der Tabelle 36. Der Energiebedarf pro FU liegt in beide Szenarien bei 0.56 kW.

Die von der Kühlanlage benötigte Kühlflüssigkeit ist R404A. Davon werden während dem Lebensablauf (15 Jahre) der Anlage 5 kg benötigt. Um den Bedarf pro FU zu berechnen, wurde die Menge an Kühlmittel durch die Lebensdauer der Anlage geteilt und durch die in der Lebensdauer erwartete Produktion, in FU-F angegeben. Die Berechnungen für den Kleinbetrieb werden in der Tabelle 37 dargestellt, die für den Grossbetrieb in der Tabelle 38. Für das Kleinbetriebsszenario fällt eine höhere Menge an Kühlmittel pro FU an; dies ist auf das geringeren Produktionsvolumen zurückzuführen. Für die Modellierung wurde einen Datensatz für den r134a Kühlmittel angewendet, das eine vergleichbare Leistung mit dem R404A aufweist (Shin, Kim & Cho, 2014). Grund dafür ist die Abwesenheit des Kühlmittels R404A im Ecoinvent. Der Datensatz «Used refrigerant R134a» stellt die Entsorgung des Kühlmittels dar.

Tabelle 35: Strombedarf für Tiefkühlung (Kleinbetrieb)

| Tiefkühlung Kleinbetrieb | | | |
|---------------------------------|--------------|----------------|---|
| Input | Menge | Einheit | Berechnung |
| Leistung bei Volllast | 2.80 | kWh | |
| Nutzlast | 2500.00 | kg | |
| Eingefrorene Puppen | 550.78 | kg | Produktionsvolumen/1.8 Zuchtzyklen pro Jahr |
| Leistung | 0.62 | kWh | Leistung*Gewicht eingefrorene Puppen/Nutzlast |
| Energieverbrauch | 310.91 | kW | 0.56kwh *12h * 42Tage |
| Energieverbrauch pro FU-F | 0.56 | kW | Energieverbrauch/(kg Eingefrorene Puppen/FU) |

Tabelle 36: Strombedarf für Tiefkühlung (Grossbetrieb)

| Tiefkühlung Grossbetrieb | | | |
|---------------------------------|--------------|----------------|--|
| Input | Menge | Einheit | Berechnung |
| Leistung bei Volllast | 2.80 | kWh | |
| Nutzlast | 2500.00 | kg | |
| Eingefrorene Puppen | 4406.25 | kg | |
| Leistung für 495.7 kg | 4.94 | kWh | Leistung*Gewicht eingefrorene Puppen/Nutzlast |
| Energieverbrauch | 2487.24 | kW | 0.56kwh *12h * 42Tage |
| Energieverbrauch pro FU-F | 0.56 | kW | Energieverbrauch / (kg Eingefrorene Puppen/FU) |

Tabelle 37: Berechnung Kühlmittel für Kleinbetrieb

Kühlflüssigkeitsbedarf

Kleinbetrieb

| Input | Menge | Einheit | Berechnung |
|-----------------------------|----------|---------|------------------------------------|
| Gesamtmenge | 5.00 | kg | |
| | | | Gesamtmenge/Lebensdauer |
| Menge pro FU-F | 2.24E-05 | kg | Anlage/Produzierte FU für 15 Jahre |
| Lebensdauer Anlage | 15.00 | Jahre | |
| Produzierte FU für 15 Jahre | 14871.09 | | FU pro Jahr * 15 |

Tabelle 38 Berechnung Kühlmittel für Grossbetrieb

Kühlflüssigkeitsbedarf

Grossbetrieb

| Input | Menge | Einheit | Berechnung |
|-----------------------------|-----------|---------|------------------------------------|
| Gesamtmenge | 5.00 | kg | |
| | | | Gesamtmenge/Lebensdauer |
| Menge pro FU-F | 2.80E-06 | kg | Anlage/Produzierte FU für 15 Jahre |
| Lebensdauer Anlage | 15.00 | Jahre | |
| Produzierte FU für 15 Jahre | 118968.75 | | FU pro Jahr * 15 |

Die Datensätze des Prozesses Tiefkühlung unterscheiden sich zwischen Best und Worst Case im Strommix. Der Unterschied zwischen Gross und Kleinbetrieb liegt in der pro FU-F benutzten Menge an Kühlmittel. Der Datensatz des Kleinbetriebes (Best Case) befindet sich in der Tabelle 39, während die Worst Case Variante in der Tabelle 40 dargestellt wird. In der Tabelle 41 und in der Tabelle 42 werden die Datensätze des Grossbetriebes dargestellt, für Best und Worst Case Variante.

Tabelle 39: Datensatz Tiefkühlung Best Case (Kleinbetrieb)

| Menge | Einheit | Ecoinvent Datensatz |
|---------|---------|--|
| 2.24E-5 | kg | Refrigerant R134a {GLO} market for |
| 0.56 | kWh | Electricity, low voltage {CH} electricity production, photovoltaic, 3kWp slanted-roof installation, single-Si, panel, mounted |
| 2.24E-5 | kg | Used refrigerant R134a {GLO} market for |

Tabelle 40: Datensatz Tiefkühlung Worst Case (Kleinbetrieb)

| Menge | Einheit | Ecoinvent Datensatz |
|---------|---------|---|
| 2.24E-5 | kg | Refrigerant R134a {GLO} market for |
| 0.56 | kWh | Electricity, low voltage {CH} market for |
| 2.24E-5 | kg | Used refrigerant R134a {GLO} market for |

Tabelle 41: Datensatz Tiefkühlung Best Case (Grossbetrieb)

| Menge | Einheit | Ecoinvent Datensatz |
|---------|---------|--|
| 2.80E-6 | kg | Refrigerant R134a {GLO} market for |
| 0.56 | kWh | Electricity, low voltage {CH} electricity production, photovoltaic, 3kWp slanted-roof installation, single-Si, panel, mounted |
| 2.80E-6 | kg | Used refrigerant R134a {GLO} market for |

Tabelle 42: Datensatz Tiefkühlung Worst Case (Grossbetrieb)

| Menge | Einheit | Ecoinvent Datensatz |
|---------|---------|---|
| 2.80E-6 | kg | Refrigerant R134a {GLO} market for |
| 0.56 | kWh | Electricity, low voltage {CH} market for |
| 2.80E-6 | kg | Used refrigerant R134a {GLO} market for |

3.4 Heizung

Um den Heizungsbedarf zu berechnen wurden für Forschung-und-Zukunftsszenarien zwei unterschiedliche Methoden angewendet. Für das Forschungsszenario erhielt der Autor die Messdaten über den Stromverbrauch der Heizung. Diese wurden dann Anhand des Produktionsvolumen und der Zuchtdauer auf die Funktionelle Einheit zugeteilt. Für die Zukunftsszenarien wurde der Heizungsbedarf mithilfe der Software Ubakus (2020) bestimmt. Die Berechnung wurde mit der Unterstützung des Dozenten Christoph Koller (ZHAW LSFM) durchgeführt.

3.4.1 Heizung Zukunftsszenarien

Die Simulation des Heizungsbedarfs berücksichtigt die externe Durchschnittstemperatur; Linthal für den Kleinbetrieb und Zürich für den Grossbetrieb, die Bauweise (Holz für Kleinbetrieb und Beton für Grossbetrieb) und die Innentemperatur. Diese sollte bei 26°C für den Mastraum und 20°C für die verbleibende Räumlichkeiten liegen. Die Abwärme, die durch die Fermentierung des Substrates entsteht, wurde in dieser Arbeit nicht berücksichtigt, da im Rahmen des Projektes keine Messdaten erhoben wurden. Die Best und Worst Case Variante unterscheiden sich am Heizungstyp. Der Best Case wurde für Klein-und-Grossbetrieb mit einer Wärme-Pumpe Heizung modelliert. Im Worst Case wurde für den Kleinbetrieb eine Ölheizung ausgewählt, für den Grossbetrieb eine Gasheizung.

Die Konstruktion wurde mit einer Innen-und-Aussenwand modelliert. Die Innenwände trennen den Mastraum von den weiteren Räumlichkeiten. Diese sind 11cm dick, aus Fichte und weiteren Materialien gebaut, mit einem U Wert von 0.5 W/(m2K) (siehe Anhang 1). Die Innenwände wurden für beide Gebäude gleich konzipiert. Im Kleinbetrieb wird die Aussenwand aus Fichte gebaut, mit einer Strohisolation und einer Dicke von 33.1 cm. Der U-Wert dieser Wand liegt bei 0.21 W/(m2K). Die Aussenwände des Beton-Gebäudes weisen einen vergleichbaren U-Wert auf, mit 0.19 W/(m2K). Diese sind aus 4 Schichten gebaut (siehe Anhang 1), mit einer Tiefe von 31.5 cm.

Der Heizungsbedarf des Kleinbetriebes liegt bei 2850 kWh pro Jahr⁴, für eine Fläche von 150m² und einer Höhe von 3m. Der Grossbetrieb benötigt dagegen 19'000 kWh⁵ pro Jahr, dies aufgrund der grösseren Fläche, 1000m², und der Raumhöhe von 4m.

Um den Heizungsbedarf pro FU-F zu berechnen, wurde der jährliche Energieverbrauch durch die jährlich produzierten FU-F geteilt. In der Tabelle 43 werden die Berechnungen für Klein-und-Grossbetrieb ausgeführt.

[4],[5] Mail des Dozenten Christoph Koller (ZHAW LSFM)

Tabelle 43: Berechnung Heizungsbedarf pro FU-F für Gross-und-Kleinbetrieb

| Input | Menge | Einheit | Berechnung |
|--|--------|---------|---|
| Energieverbrauch Kleinbetrieb (pro Jahr) | 2850 | kWh | |
| Energieverbrauch pro FU-F (Kleinbetrieb) | 1.78 | kWh | Energieverbrauch / jährlich produzierte FU-F (1603) |
| Energieverbrauch Grossbetrieb (pro Jahr) | 19'000 | kWh | |
| Energieverbrauch pro FU-F (Grossbetrieb) | 1.36 | kWh | Energieverbrauch/jährlich produzierte FU-F (13'947) |

Folgend werden die Tabelle der Sima Pro Datensätze aufgezeigt. Der Heizungsbedarf wurde in kWh ausgedrückt. Der Bau der Heizungsanlage wurde dabei nicht berücksichtigt. Es kann beobachtet werden, dass der Heizungsbedarf pro Funktionelle Einheit im Grossbetrieb (Tabelle 45 und Tabelle 47) kleiner als der im Kleinbetrieb (Tabelle 44 und Tabelle 46) ist. Dies ist auf das grössere Produktionsvolumen zurückzuführen.

Tabelle 44: Datensatz Kleinbetrieb Best Case

| Menge | Einheit | Berechnung | Ecoinvent Datensatz |
|-------|---------|---|--|
| 1.78 | kWh | Heizungsbedarf Total/ Produzierte FU-F | Heat, air-water heat pump 10kW {CH} market for floor heating from air-water heat pump |

Tabelle 45: Datensatz Grossbetrieb Best Case

| Menge | Einheit | Berechnung | Ecoinvent Datensatz |
|-------|---------|---|--|
| 1.36 | kWh | Heizungsbedarf Total/ Produzierte FU-F | Heat, air-water heat pump 10kW {CH} market for floor heating from air-water heat pump |

Tabelle 46: Datensatz Kleinbetrieb Worst Case

| Menge | Einheit | Berechnung | Ecoinvent Datensatz |
|-------|---------|---|---|
| 1.78 | kWh | Heizungsbedarf Total/ Produzierte FU | Heat, central or small-scale, other than natural gas {CH} heat production, light fuel oil, at boiler 10kW, non-modulating |

Tabelle 47: Datensatz Grossbetrieb Worst Case

| Menge | Einheit | Berechnung | Ecoinvent Datensatz |
|-------|---------|---|---|
| 1.36 | kWh | Heizungsbedarf Total/ Produzierte FU | Heat, central or small-scale, natural gas {CH} market for heat, central or small-scale, natural gas |

3.4.2 Heizungsbedarf Forschungsszenario

Im Forschungsszenario wurde der Heizungsbedarf der Mast-und-Zuchträume berechnet. Der Stromverbrauch der Heizung für 385 Stunden liegt bei 159 kWh (Abplanalp, 2019). Aus diesen Daten wurde der Heizungsbedarf für die gesamte Lebensphase der Insekten berechnet. Die Lebensphase des *Trypoxylus dichotomus* ist in der Tabelle 1 dargestellt. Insgesamt sind es 48.5 Wochen (339.5 Tage). Der gesamte Zucht-und-Mastprozess wurde in Stunden berechnet, was ein total von 8'148 Std. ergibt. Mit der Anzahl an Stunden und Leistung wurde der Energieverbrauch für die vollständige Entwicklung eines Insekten berechnet. Um den Energieverbrauch pro Funktionelle Einheit zu berechnen, wurde der Gesamtenergieverbrauch durch die Menge an Insekten in kg geteilt. Die Berechnungen sind in der Tabelle 48 dargestellt.

Tabelle 48: Berechnungen Heizungsbedarf Forschungsszenario

| Input | Menge | Einheit | Berechnung |
|---|---------|---------|---|
| Fläche Mastraum | 14.55 | m2 | |
| Fläche zuchtraum | 9.44 | m2 | |
| Total Fläche | 23.99 | m2 | |
| | | | Benutzte Fläche*Fläche Kisten*Anzahl gestapelten Kisten*Anzahl Puppen pro Kiste |
| Anzahl Puppen pro Zuchtdurchgang | 804.05 | | |
| Gewicht Puppen pro Zuchtdurchgang | 12.06 | kg | Anzahl Puppen* Gewicht Puppe |
| Anzahl Gestapelten Kisten | 4 | | |
| Benutze Fläche Zucht und Mastraum | 19.19 | m2 | Total Fläche* %Benutze Fläche (0.8) |
| Energieverbrauch Heizung für 385 Stunden | 159 | kwh | |
| | | | Energieverbrauch(385std)* kompletter Zuchtdurchgang/385 std |
| Energieverbrauch total kompletter Zuchtdurchgang | 3365.02 | kWh | |
| | 8148 | stunden | |
| | | | Energieverbrauch total/Gewicht Puppen pro Zuchtdurchgang |
| Energieverbrauch pro FU | 279.01 | kWh | |

In der Tabelle 49 wird der Sima Pro Datensatz dargestellt. Der Energieverbrauch pro Funktionelle Einheit ist beim Forschungsszenario mit 279 kWh deutlich höher im Vergleich zu den Zukunftsszenarien, mit 1.78 und 1.36 kWh. Dies kann auf die geringere Isolation der Forschungsanlage sowie auf eine nicht optimierte Produktion zurückgeführt werden.

Tabelle 49: Datensatz Heizungsbedarf Forschungsszenario

| Menge | Einheit | Berechnung | Ecoinvent Datensatz |
|--------|---------|---|--|
| 279.01 | kWh | Energieverbrauch total/Gewicht Puppen pro Zuchtdurchgang | Electricity, low voltage {CH} production, hydro power mix |

3.5 Bauaufwand

Es wurde entschieden, zwei verschiedene Bauweisen für die zwei Szenarien anzuwenden. Das Kleinbetrieb-Szenario wird voraussichtlich in einem Bauernhof ausgeführt, deshalb die Entscheidung, einen Datensatz für Holzgebäude anzuwenden. Der Grossbetrieb wird voraussichtlich in einer Industriezone stattfinden, und es wird sich dabei um eine konventionelle Stahl/Beton Konstruktion handeln. Für beide Betriebe wird eine Lebensdauer von 50 Jahren angenommen. Um den Bauaufwand der Funktionellen Einheit zuzuteilen, wird die Fläche der Anlage durch die Lebensdauer und das jährliche Produktionsvolumen geteilt, wie in der Tabelle 50 und Tabelle 51 zu sehen ist. Für die Forschungsvariante wurde der Bau nicht berücksichtigt, da das jährliche Produktionsvolumen nicht bekannt ist, was die Berechnung für eine Funktionelle Einheit somit nicht möglich macht.

Tabelle 50: Bau Datensatz für Kleinbetrieb

| Menge | Einheit | Berechnung | Ecoinvent Datensatz |
|--------|---------|--|---|
| 0.0028 | m2 | Fläche Anlage/50Jahre / produzierte FU pro Jahr | Building, hall, wood construction {CH} building construction, hall, wood construction |

Tabelle 51: Bau Datensatz für Grossbetrieb (Best Case)

| Menge | Einheit | Berechnung | Ecoinvent Datensatz |
|--------|---------|--|---|
| 0.0009 | m2 | Fläche Anlage/50Jahre / produzierte FU pro Jahr | Building, hall, steel construction {CH} building construction, hall, steel construction |

3.6 Direkte Emissionen

In diesem Unterkapitel werden die Emissionen analysiert, welche von den Larven verursacht werden: N₂O, CO₂ eq., NH₃, CH₄. Im Projekt Food from Wood wurden die Emissionen von *Trypoxylus dichotomus* noch nicht untersucht. Dies hat zur Folge, dass in dieser Arbeit Literaturwerte angewendet wurden. Der *Tenebrio molitor* wurde ausgewählt, da dieser in derselben Ordnung, *Coleoptera*, klassifiziert wird. Zusätzlich benötigen beide Arten für die Entwicklung eine ähnliche Temperatur (25°C für den *T. molitor* und 26°C für den *T. dichotomus*) und kein Licht (Oonincx et al., 2010). Die Emissionen werden für alle Szenarien/Varianten gleich berechnet und in Sima Pro, wie in der Tabelle 52 zu lesen ist, eingetragen.

Tabelle 52: Emissionen der Larven

| Menge | Einheit | Berechnung | Ecoinvent Datensatz | Sub-compartment |
|-------|---------|---|--------------------------|-----------------|
| 25.5 | mg | | Dinitrogen monoxide | Indoor |
| 7.58 | g | | Carbon dioxide, biogenic | Indoor |
| 224 | mg | L3 Stadion=32 Wochen= 224 Tage 224 Tage*1mg/kg/Tag | Ammonia | Indoor |
| 0.1 | g | | Methane | Indoor |

3.7 Zucht in den Zukunftsszenarien

Es wurde angegeben, dass der Ressourcen-und-Energieaufwand des Zuchtbetriebes 30% des Grossbetriebes entspricht. In Sima Pro wurde daher 30% des Datensatzes des Grossbetriebes (Best Case) zum Endresultat jedes Szenarios zugerechnet. Der Datensatz des Grossbetriebes wird modifiziert, indem die Modellierung des Gabelstaplers entfernt wird, da diese Maschine im Zuchtbetrieb nicht eingesetzt wird. Der Datensatz der Kisten wird ebenfalls modifiziert, indem die Kisten des Kleinbetriebes ausgewählt werden.

Ein Weibchen legt 60 Eier, und davon erreichen 52 das L2 Stadion, womit sie für die Mast bereit sind und ausgeliefert werden können. Für das Legen von 67 Eiern (Funktionelle Einheit) sind 1.3 Weibchen nötig.

Es wird für beide Szenarien vorgesehen, dass die Vermehrung der Insekten und das Züchten bis zum Larven Stadion L2, in einem separaten Betrieb stattfindet. Die Larven werden demnach dem Mastbetrieb zugeliefert. Um die Liefermenge zu berechnen, wurde das Gewicht von 67 Larven im Stadion L2 ausgerechnet, die in diesem Stadium 5g wiegen. Wie in der Tabelle 53 dargestellt wird, entspricht die Liefermenge 335 g pro Funktionelle Einheit.

Da im Zuchtbetrieb kein Mastbetrieb durchgeführt wird, werden die Larven im Stadion L3 aus den Mastbetrieben geliefert. Pro Funktionelle Einheit (Frischprodukt) werden 1.3 Weibchen-Puppen ausgeliefert, was ein Gewicht von 19.33 g entspricht.

Die Lieferdistanz wurde für die beiden Szenarien auf 50 km gleichgesetzt, damit dieser Faktor keinen ungleichen Einfluss auf die zwei Szenarien ausübt.

Tabelle 53: Berechnungen für Transportmenge. Das Gewicht der L2 Larven ist auf eine Annahme des Autors basiert.

| Input | Menge | Einheit | Berechnung |
|--------------------------------|-------|---------|--|
| Anzahl L2 Larven pro FU-F | 67 | | |
| Gewicht L2 Larven pro FU-F | 335 | g | 1 L2 Larve =5g 1g*Anzahl Eiern pro Fu |
| Weibchen pro FU | 1.29 | | 1 Weibchen legt 52 Eiern 1*Anzahl Insekten pro FU/gelegte Eiern |
| Gewicht Weibchen Puppen pro FU | 19.33 | g | Weibchen pro Fu * Gewicht Puppe (15g) |
| Lieferdistanz | 50 | km | |

In der Tabelle 54 wird der Datensatz des Transportes dargestellt. Die Gewichte der zwei Lieferungen werden in einem Datensatz aufsummiert und mit der Lieferdistanz ausmultipliziert.

Tabelle 54: Datensatz Transport Puppen und Larven für Zuchtbetrieb

| Menge | Einheit | Berechnung | Ecoinvent Datensatz |
|-------|---------|--|--|
| 17.72 | kg/km | (Gewicht L2 Larven + Gewicht Weibchen Puppen pro FU)*Lieferdistanz | Transport, freight, light commercial vehicle {CH} market for transport, freight, light commercial vehicle |

4 Wirkungsabschätzung

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der Auswertung mit den drei Umweltauswirkungsmethoden dargestellt und untereinander verglichen. Der Beitrag der einzelnen Prozesse wurde ebenfalls untersucht. Die Ergebnisse wurden mit einer Sensitivitätsanalyse ergänzt. In der Diskussion werden die Resultate denjenigen von drei weiteren Insektenzuchten und von Rind, Schwein und Poulet-Fleisch gegenübergestellt. Die vollständige Ergebnisse werden in den angehängte Excel Files dargestellt.

4.1 Treibhauspotential

Die Untersuchung des Treibhauspotential erfolgte mit der IPCC 2013 Methode. Die Resultate wurden auf einer Endpoint Ebene verglichen und in kg CO₂ eq. ausgedrückt. Die Resultate werden in der Abbildung 4 dargestellt.

Für jedes Szenario wurden die Werte der einzelnen Prozesse absteigend sortiert. Die vier ersten Prozesse wurden im Diagramm dargestellt, die restlichen Prozesse wurden aufsummiert und als «restliche Prozesse» bezeichnet. Eine detaillierte Übersicht aller Prozesse ist im Anhang zu finden. Das Forschungsszenario weist den grössten Anteil an Emissionen auf, mit 4.92 kg CO₂ eq. Von den Zukunftsvarianten schneidet der Kleinbetrieb (Worst Case) am schlechtesten ab, mit 4.66 kg CO₂ eq. pro FU-F, gefolgt vom Grossbetrieb (Worst Case), mit 4.19 kg CO₂ eq. Die Szenarien mit den kleineren Werten sind die Best Case Varianten, davon weist der Grossbetrieb 2.57 kg CO₂ eq., einen vergleichbaren Wert mit dem Kleinbetrieb, der 2.79 kg CO₂ eq. pro FU-F produziert.

Der Haupttreiber der Emissionen im Forschungsszenario stellt der Heizungsprozess dar. In den Zukunftsszenarien stellt die Heizung nur einen Bruchteil des Endergebnisses dar, einerseits aufgrund der höheren Produktionsdichte, andererseits verfügen diese Anlagen über bessere Isolationswerte. Die Auswahl einer Wärmepumpe erspart dem Grossbetrieb (Best Case) gegenüber dem Worst Case des Grossbetriebes 0.23 kg CO₂ eq. pro Funktionelle Einheit Frischprodukt. Im Kleinbetrieb dagegen, reduziert die Wärmepumpe Heizung die Emissionen gegenüber der Ölheizung um 0.47 kg CO₂ eq.

In den Zukunftsszenarien scheint die Verlängerung der Lieferdistanz des Holzmaterials einen erheblichen Einfluss auf das Endergebnis zu haben. Der Fussabdruck dieses Prozesses für die Worst Case Varianten ist, mit 1.29 kg CO₂ eq., 1500% grösser als der, der Best Case Varianten.

Der Bauaufwand wurde nur für die Zukunftsszenarien berechnet. Für den Grossbetrieb wurde ein Betongebäude modelliert, das eine Energieintensivere Herstellung als das Holzgebäude

des Kleinbetriebs aufweist. Das höhere Produktionsvolumen des Grossbetriebes führt jedoch zu einem Fussabdruck, der um 62% geringer ist als der des Kleinbetriebs. Die Emissionen der Zucht, 0.55 kg CO₂ eq, sind für alle Varianten gleich, basierend auf der Annahme, dass in der Schweiz der Zuchtaufwand von einem einzelnen Betrieb übernommen wird.

Die Herstellung und Entsorgung der Kunststoffkisten stellten sich als ein energieintensiver Prozess dar. Im Grossbetrieb (Best Case) sorgt dieser Prozess, mit 1.21 kg CO₂ eq. zu einem Drittel der Gesamtemissionen. Im Kleinbetrieb und Forschungsszenario werden kleinere Kisten eingesetzt, daher sinken die Emissionen pro FU auf 0.86 kg CO₂ eq.

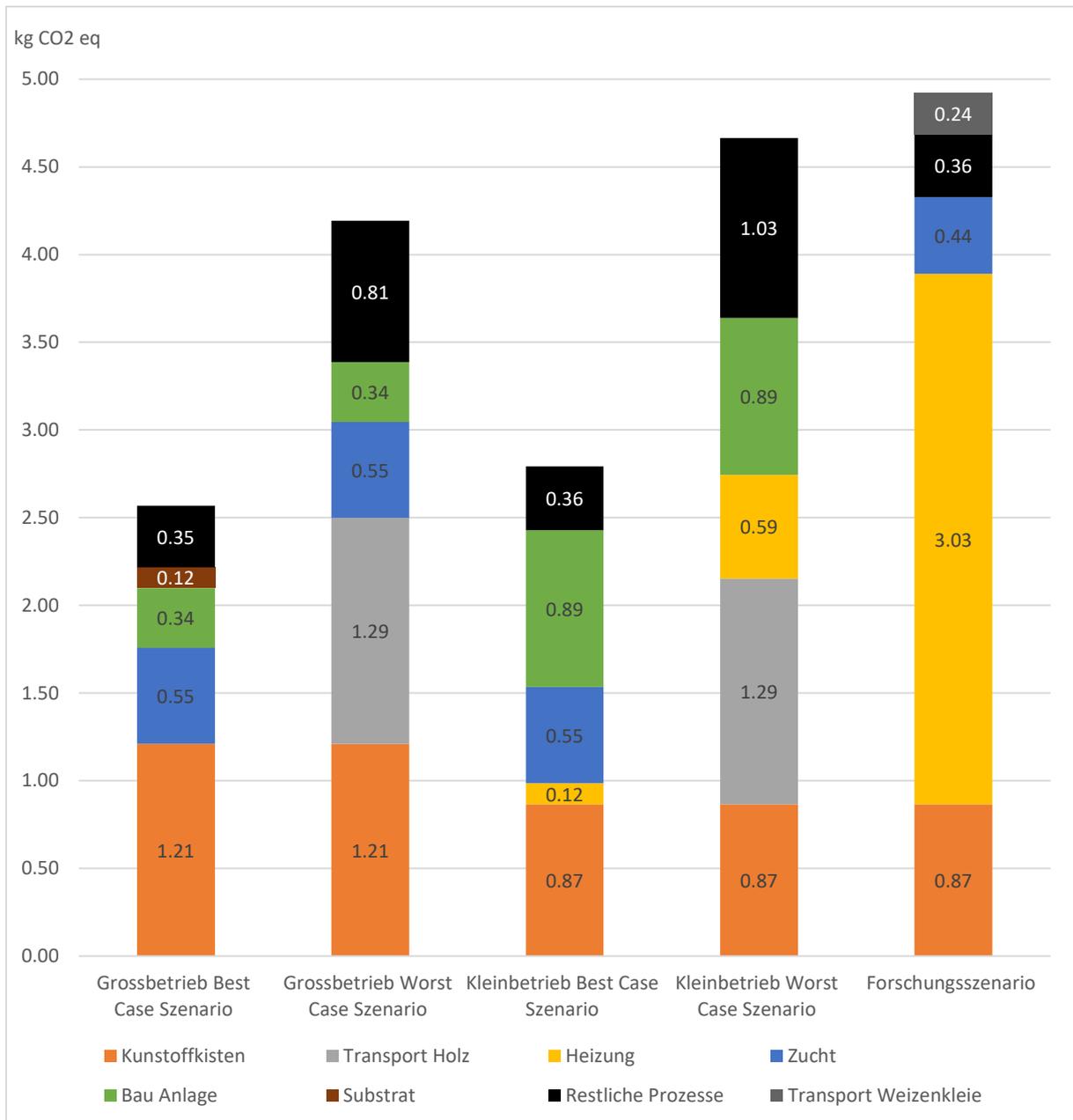


Abbildung 4: Vergleichende Graphik der untersuchten Szenarien mit der IPCC 2013 Methode. Die Werte sind in kg CO₂ eq. ausgedrückt. Die Gesamtemissionen pro Variante sind, von links nach rechts: 2.57 kg CO₂ eq., 4.19 kg CO₂ eq., 2.79 kg CO₂ eq., 4.66 kg CO₂ eq. und 4.92 kg CO₂ eq. Im Kleinbetrieb Worst Case führt der Fussabdruck der Heizung dazu, dass der Zuchtprozess in die «restliche Prozesse» fliesst. Dies geschieht, weil für jede Variante die 4 Prozesse mit dem grössten Beitrag zur Gesamtemissionen führen. Der Zuchtprozess wurde für alle Zukunftsszenarien gleich modelliert, da es angenommen wird, dass die Betreiber die Mastbereite Larven aus derselben Zuchtbetrieb stammen. Im Forschungsszenario wird die Zucht im gleichen Gebäude der Mast. Somit fällt der Transport aus, was zu einer Reduktion des Fussabdruckes führt. Im Grossbetrieb Worst Case fällt die Heizung unten die «restliche Prozesse», ist jedoch mit 0.31 kg CO₂ eq. mit dem Bau der Anlage vergleichbar. Im Forschungsszenario weist der Transport der Weizenkleie einen grösseren Fussabdruckes als das Transport des Holzes. Grund dafür ist die längere Lieferdistanz der Weizenkleie. Der Bau der Anlage erscheint im Forschungsszenario nicht, da bei diesem Szenario dieser Prozess nicht modelliert wurde.

4.2 Ökologische Knappheit

Die Resultate der Analyse mit der Methode der Ökologische Knappheit wurden mit dem Endpoint-score analysiert. Die Werte wurden in Tausend UBP (Umweltbelastungspunkte) dargestellt, dadurch erscheint die Darstellung übersichtlicher zu sein. In der Abbildung 5 werden die Tausend UBP als kPt beschriftet.

Der Unterschied zwischen Forschungs-und-Zukunftsszenarien erscheint mit dieser Methode relevanter zu sein als mit der IPCC Methode. Die vom Forschungsszenario generierten Emissionen sind um 53 % grösser als die des Kleinbetriebs (Worst Case). Der Kleinbetrieb (Best Case) weist 5.26 kPt auf, ein Resultat das mit den 5.55 kPt des Grossbetriebs (Worst Case) vergleichbar ist. Der Grossbetrieb (Best Case), ergab auch mit der Ecological Scarcity Methode den kleinsten Wert aller untersuchten Varianten, mit 31 % weniger Emissionen als der Grossbetrieb (Worst Case), und 400% weniger als das Forschungsszenario.

Der Haupttreiber der Umweltbelastung im Forschungsszenario ist, wie bei der IPCC Methode, der Heizungsaufwand. Dieser verursacht 84% der gesamten kPt, wobei mit der IPCC Methode das Heizen nur 61% der gesamten Belastung ausmacht. Eine mögliche Erklärung liegt in der grösseren Gewichtung des Aufbaus des Stromnetzes mit der Ecological Scarcity Methode. Die Heizung hat im Kleinbetrieb (Worst Case) einen merkbaren Einfluss auf das Endresultat, da es sich um eine Ölheizung handelt. In den verbleibenden Szenarien fällt der Heizungsaufwand unter die «restlichen Prozesse».

Der Bauaufwand führt im Kleinbetrieb zu 49% (Best Case) und 36% (Worst Case) der Emissionen, und ist somit bei beiden Szenarien der Haupttreiber der Emissionen. Im Grossbetrieb führt das höhere Produktionsvolumen zu geringere Emissionen pro FU, mit 313% geringeren Emissionen als die des Kleinbetriebes.

Die längere Lieferdistanz des Holzes führt in den Worst Case Varianten zu 1500% mehr Umweltbelastungspunkte als in den Best Case Varianten und bestätigt den Unterschied der IPCC Auswertung im vorheriger Unterkapitel.

Die Herstellung und Entsorgung der Kunststoffkisten verursachen im Grossbetrieb 30% mehr Emissionen als im Klein-und-Forschungsbetrieb. Beim Grossbetrieb (Best Case) macht dieser Prozess einen Viertel der Gesamtemissionen aus. Es scheint somit weniger relevant zu sein, wenn mit der IPCC Methode verglichen wird, in der die Kunststoffkisten zu fast der Hälfte der Emissionen beitragen.

Die Prozesse der Zucht und der Rohstoffe bleiben für alle Varianten gleich, mit respektiv 0.78 kPt für die Zukunftsszenarien und 0.54 kPt für das Forschungsszenario.

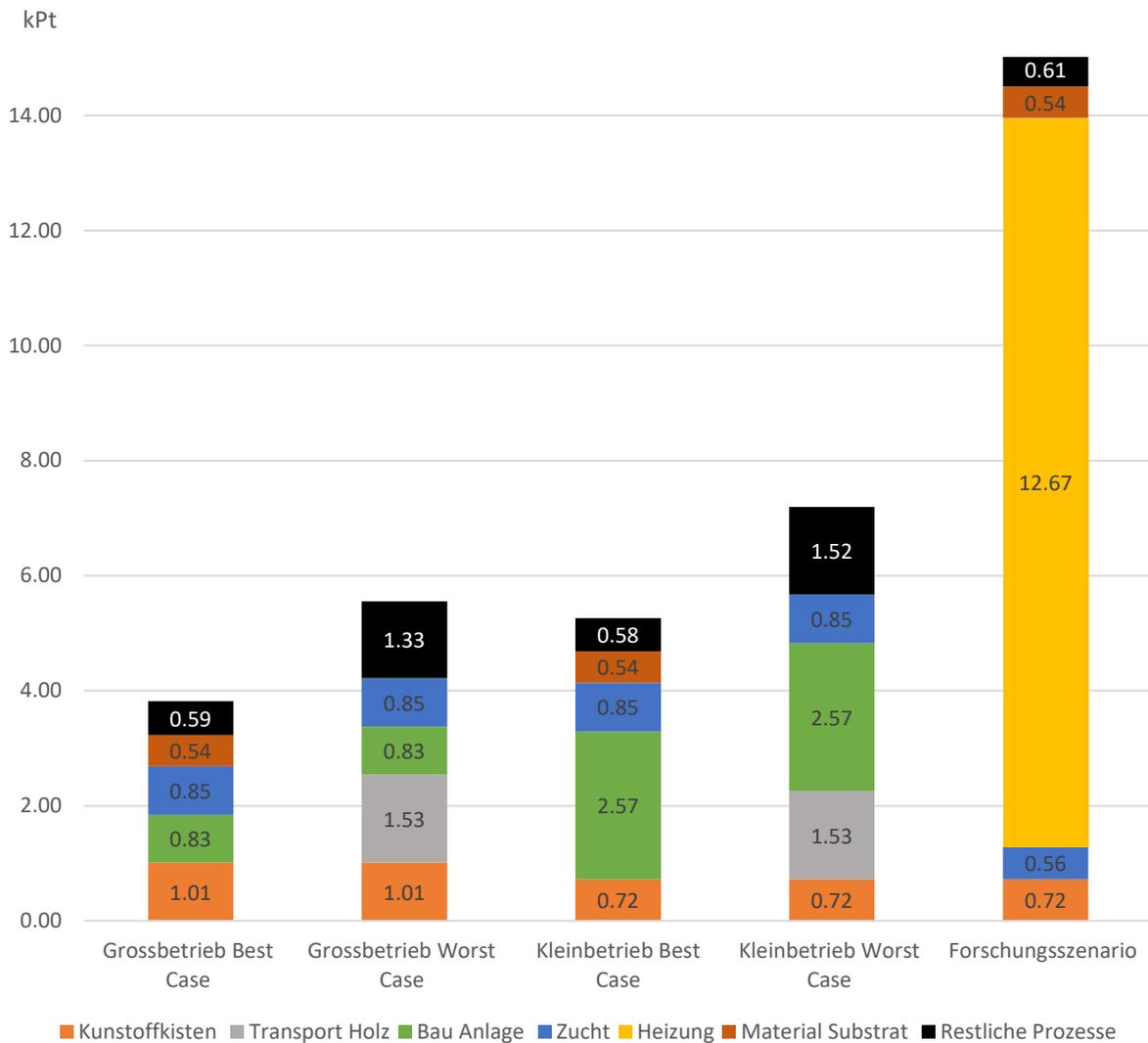


Abbildung 5: Vergleichende Graphik des Fussabdruckes der untersuchten Szenarien, mit der Methode der Ökologische Knappheit. Die Werte sind in kPt angegeben (Tausend UBP) Von links nach rechts weisen die folgende Gesamtemissionen: 3.82 kPt, 5.55 kPt, 5.26 kPt, 7.19 kPt und 15.1 kPt. Für den Vergleich der Szenarien wurden die 4 Prozesse mit dem grössten Einfluss auf die Gesamtbelastung ausgewählt, die andere werden unten «restliche Prozesse» eingeteilt. Der Zuchtprozess weist in den Zukunftsszenarien denselben Wert, während im Forschungsszenario dieser um 35% geringer ist, da der Transport von Mastbereite Larven ausfällt. Der Holztransport erscheint nur in den Worst-Case Varianten, aufgrund der deutlich höhere Emissionen. Der Fussabdruckes der Substratmaterial ist für alle untersuchten Szenarien gleich, fällt aber in den Worst Case Varianten unten den restlichen Prozesse. Die Resultate werden im Anhang vollständig dargestellt.

4.3 Product environmental Footprint

In diesem Unterkapitel werden die fünf Varianten auf der Midpoint Ebene der PEF Methode untersucht. Die Resultate wurden in μPt ausgedrückt. Der Beitrag jeder Variante zu den einzelnen Midpoint-Kategorien wurde prozentuell verglichen. Die Variante mit dem grössten Fussabdruck wurde gleich 100% gesetzt, um herauszufinden, wie tiefer die weitere Varianten zum höchsten Wert sind.

In der Abbildung 6 wurde der Beitrag der Szenarien zu den einzelne Mid-point Kategorien dargestellt. Der gesamter Fussabdruck des GBC ist um 30% geringer als der GWC. Der KBC hat einen vergleichbaren Wert als der GWC wobei er um 1.5 μPt höher ist. Der KWC weist dagegen, 25 % mehr Emissionen als der KBC. Das Forschungsszenario weist auch mit dieser Wirkungsabschätzungsmethode den grössten Fussabdruck, der um 406% grösser als der GBC ist.

Es wurde erwartet, dass das Forschungsszenario in den meisten Kategorien den grössten Wert aufweist. Dies wurde von der Auswertung in den meisten Fälle bestätigt. Der Unterschied mit den Zukunftsszenarien ist besonders für die Kategorien «Water scarcity» und «Cancer human health effects». In der Kategorie «Water Scarity» stellt der KWC nur 10% der Emissionen des FS, während in der Kategorie «Cancer human health effects» der KWC, der in beide Fälle den höchsten Wert der Zukunftsvarianten darstellt, nur 8% des Fussabdruckes der Forschungsvariante aufweist.

In diverse Kategorien stellte sich der KWC als die Variante mit dem grössten Fussabdruck. In der Kategorie «Resource use, energy carriers» stellte sich der KWC als die umweltbelastende Variante, gefolgt von GWC. Der erhöhte Fussabdruck kann durch den erhöhten Treibstoffverbrauch, der durch die Verlängerung der Lieferdistanz verursacht wird, sowie den Verbrauch an Erdgas und Heizöl für den Heizungsprozess, erklärt werden. Dies bestätigt sich in den Kategorien «Ionisin radiation HH», mit dem KWC und GWC die jeweils 100% und 90% der Emissionen darstellen, und «Ozone Depletion», in dem der KWC und GWC jeweils 100% und 80% der Emissionen ausmachen.

In der Kategorie «Land use» stellt ebenfalls der KWC die 100% Variante, gefolgt von der KBC mit 98% der Emissionen der KWC. «Land use» beschreibt die vom Prozess benutzte Landfläche. Da im Kleinbetrieb die Anlage aus Holz gebaut wird, scheint dieses Material der Hauptverursacher des Bodenverbrauchs zu sein.

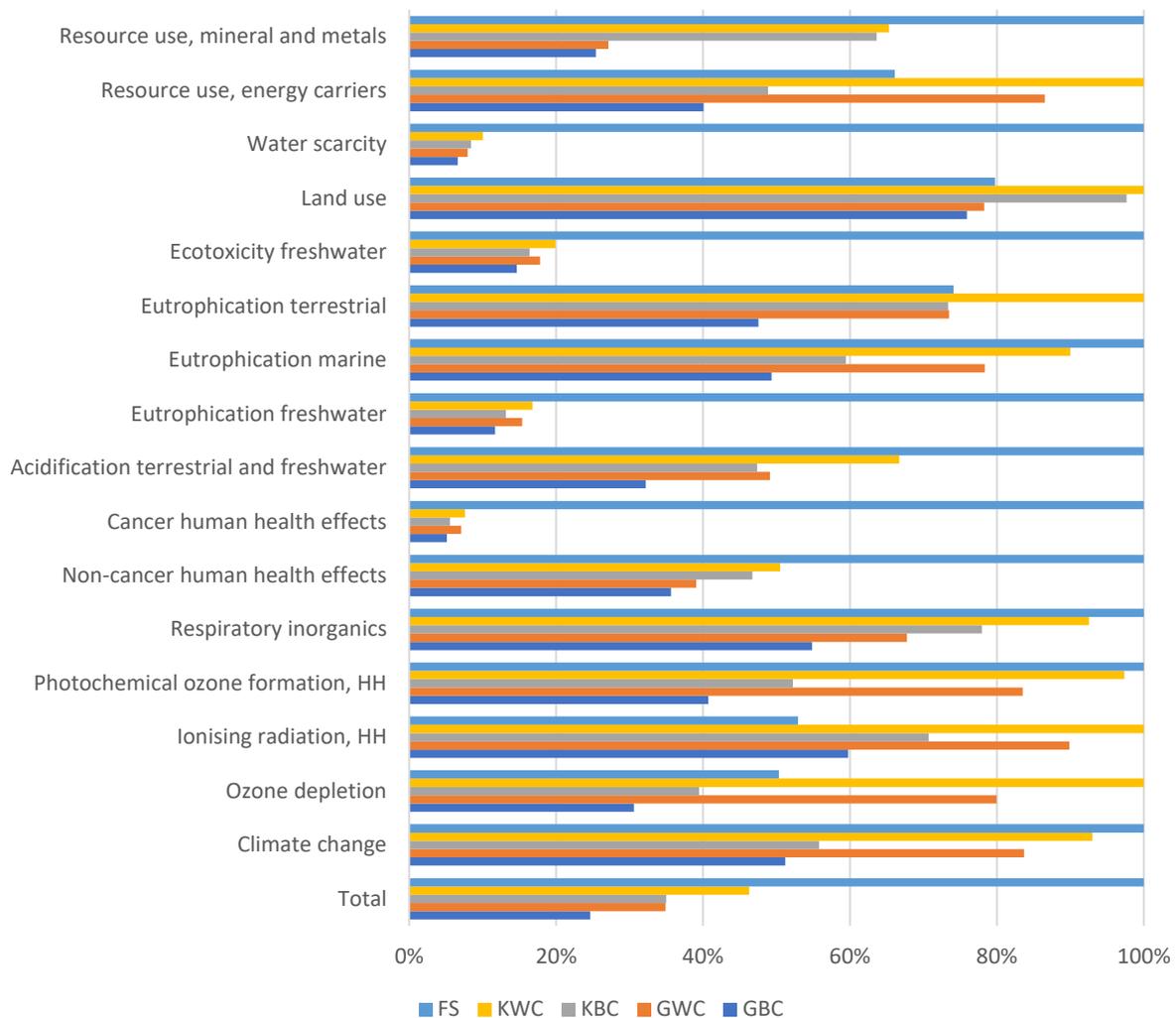


Abbildung 6: Vergleichende Graphik der 5 untersuchten Varianten. Auf der Vertikalachse befinden sich die PEF Midpoint-Kategorien, auf der Horizontalachse werden die Prozentanteile aufgezeigt. Für jede Kategorie wurde die Variante mit dem Grössten Fussabdruck gleich 100% gesetzt, sodass der prozentuellen Unterschied zwischen den unterschieden Varianten ersichtlich wird. Der Gesamten Fussabdruck liegt bei 1336.92 μ Pt für das FS, 619 μ Pt für das KWC, 468 μ Pt für den KBC, 466.5 μ Pt für den GWC und 329.34 μ Pt für den GBC.

Für die Grossbetrieb Best Case Variante wurde den Beitrag der einzelne Prozesse detailliert dargestellt. Um die Visualisierung zu vereinfachen wurden die einzelne Prozesse in Kategorien unterteilt, die in der Beschriftung der Abbildung 7 vollständig erläutert werden. Die Heizung und der Bau der Anlagen wurden dagegen einzeln betrachtet. Wie in der Abbildung zu sehen ist, scheint der Prozess «Material» in der Mehrheit der Midpoint Kategorien der Haupttreiber zu sein. Der Prozess Material fasst der Substratmaterial und die Kunststoffkisten um. In der Kategorie «Land use», «Non-cancer human health effects» und «Ecotoxicity freshwater» hat der Prozess «Material» den wichtigsten Beitrag, mit 75%, 55% und 53% der Totalemissionen der respektive Kategorie. Die Heizung hat ein merkbarer Einfluss in der Kategorie «Ionising radiation», wobei sie zu 40% der Emissionen der Kategorie ausmacht. Der Beitrag des Transportes zur Umweltbelastung bleibt für diese Best Case Variante zwischen 0.33% für die

«Land use» Kategorie und 16% für die «Ozone depletion» Kategorie. Der Bau der Anlage ist besonders für die Kategorie «Resource use, mineral and metals» relevant, wobei sie zu 62% der Emissionen beiträgt. Dies ist der Beton und Stahl Konstruktion der Anlage zurückzuführen. Der Beitrag zur Totalemissionen ist für den Prozess Verarbeitung, der die maschinellen Prozesse sowie die Tiefkühlung umfasst, hat einen vergleichbaren Fussabdruck mit dem Transportprozess, der zwischen 18.77% für die Kategorie «Cancer human health effects» und 0.12% für «Land use» liegt.

Der Fussabdruck des «Weiteres» Prozess, der die Emissionen der Insekten und der Zucht inkludiert, bleibt für alle Umweltkategorien durchgehend in einem Umfang von 20 bis 30% der Totalemissionen pro Kategorie. Die Emissionen der Insekten haben hier ein limitierter Einfluss auf das Resultat. Der Grund für die geringe Schwankung der Werte liegt in der Modellierung des Zuchtprozesses. Diese wurde auf die Modellierung des Grossbetriebes herunterskaliert, und inkludiert somit alle Prozesse.

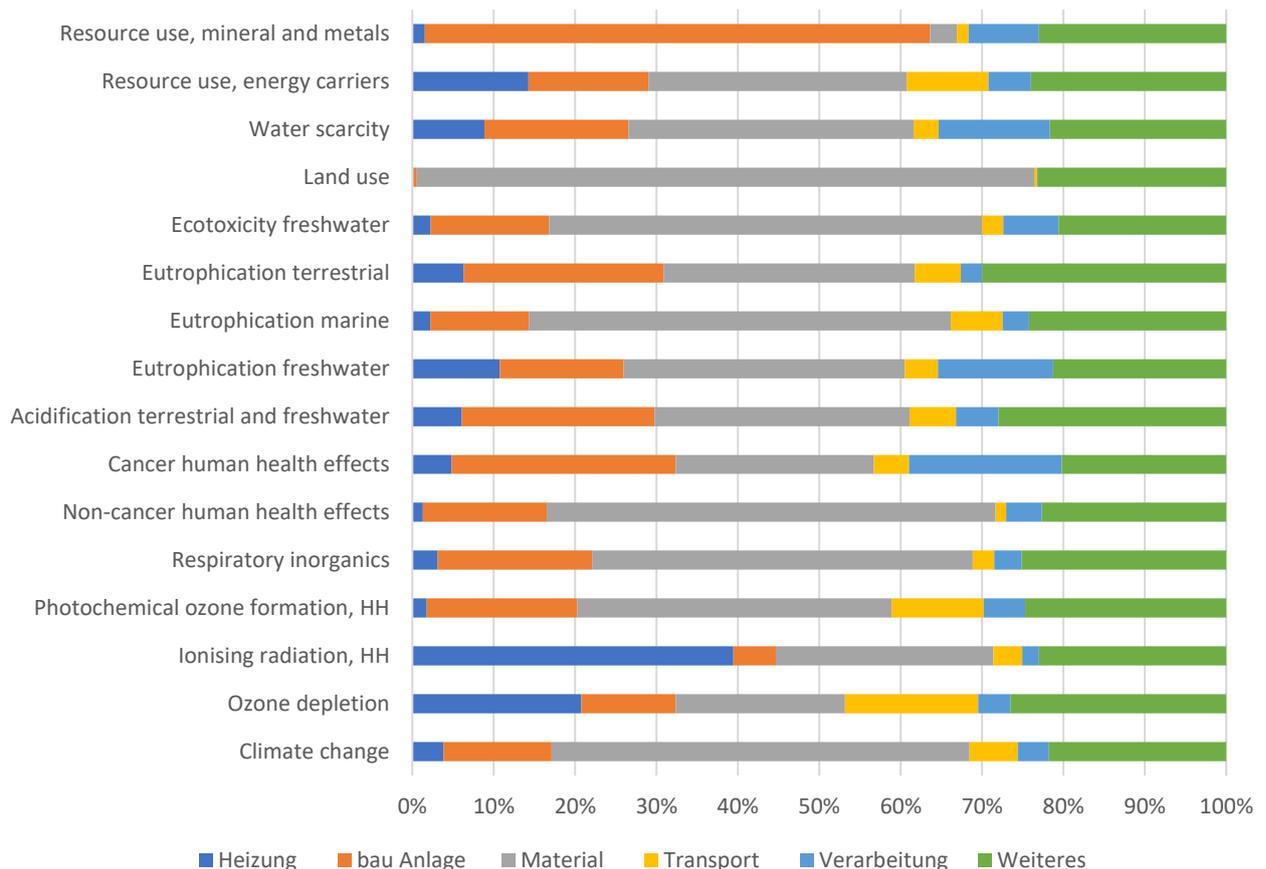


Abbildung 7: Prozessbeitrag pro Midpoint Kategorie der PEF Methode. Auf der Vertikalachse werden die Kategorie, und auf der Horizontalachse die prozentuellen Anteile dargestellt. Die Prozesse wurden in Kategorien eingeordnet, ausser die Prozesse Heizung und Bau Anlage. Material: Kunststoffkisten und Substrat; Transport: Transportprozesse von Holz, Weizenkleie und Puppen; Verarbeitung: Maschinelle Prozesse (Hammermühle, Mischmaschine, Rüttelsieb) Tiefkühlung der Puppen; Weiteres: Zucht und Emissionen der Insekten.

4.4 Sensitivitätsanalyse

Für die Sensitivitätsanalyse wurden zwei Modellierungen durchgeführt. Die angepassten Datensätze wurden mit der IPCC 2013 Methode analysiert. In der Abbildung 8 wurden die Gesamtemissionen des Grossbetriebes (Best Case) und des Kleinbetriebes (Best Case). Der blaue Balken stellt das Standard Szenario dar. Der orange Balken stellt die Gesamtemissionen dar, wenn für die Herstellung der Kunststoffkisten Recycling PET eingesetzt wird, aber die Entsorgung, wie im Standard Szenario, in einer Kehrichtverbrennungsanlage stattfindet. Die Emissionen sinken somit um 7 % für den GBC und um 5 % für den KBC. Für die zweite Modellierung, die vom grauen Balken dargestellt wird, wurde die Entsorgung nicht berücksichtigt, basierend auf der Annahme, dass die Kisten weiter rezykliert werden. Da in dieser Arbeit eine Cut-Off Allokation verwendet wird, fällt beim Recycling die Entsorgung komplett aus. Dadurch sinken die Emissionen um 39 % für den GBC und um 26 % für den KBC. Die Datensätze beider Modellierungen werden in der Tabelle 55 und in der Tabelle 56 aufgezeigt.

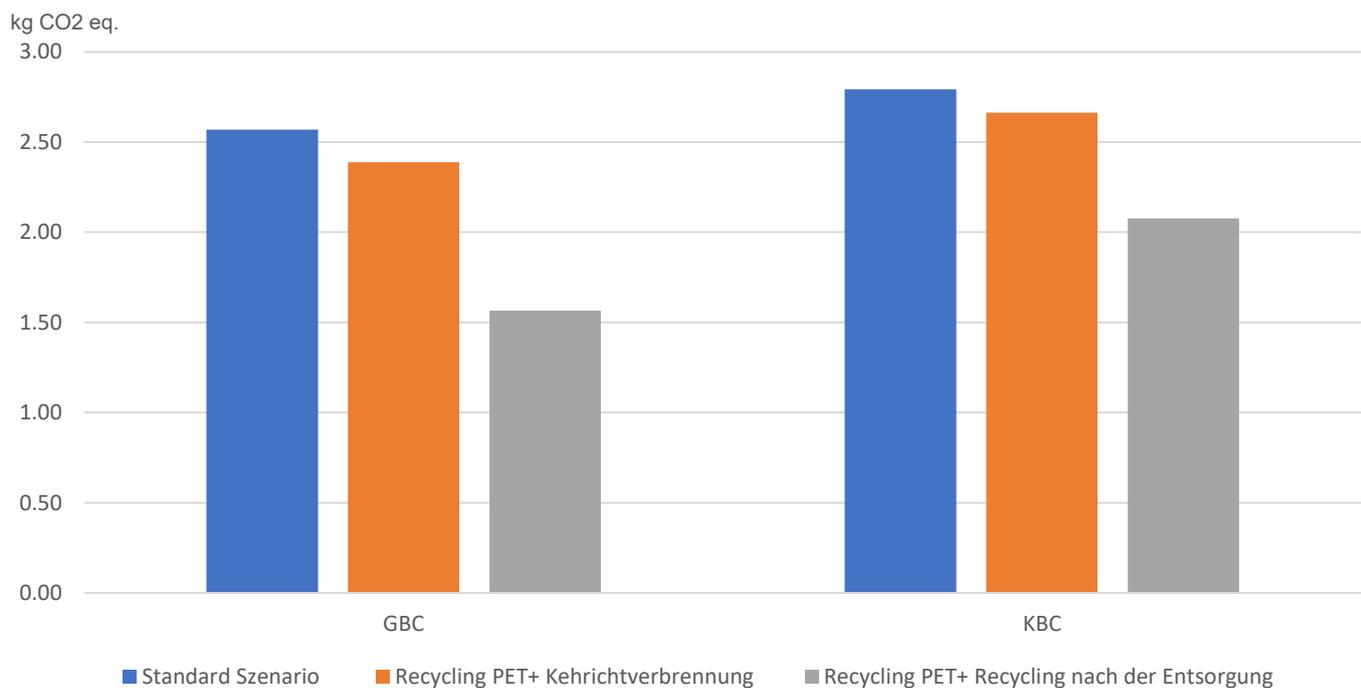


Abbildung 8: Sensitivitätsanalyse der Umweltauswirkungsabschätzung mit der IPCC Methode. Die Daten auf der Vertikalachse werden in kg CO2 eq. aufgezeigt. Wenn Recycling PET verwendet wird und die Entsorgung in der Kehrichtverbrennungsanlage stattfindet, sinken die Fussabdruck auf 2.39 kg CO2 eq. im GBC und 2.66 kg CO2 eq. im KBC. Wenn die Kisten nach dem Verbrauch rezykliert werden, sinken die CO2 Emissionen auf 1.57 kg pro FU-F für den GBC und 2.08 kg pro FU-F.

Tabelle 55: Datensatz für die erste Sensitivitätsanalyse des GBC und KBC. Der ersten Datensatz stellt das rezyklierten PET dar, und der «Waste Plastic» Datensatz die Entsorgung in der Kehrichverbrennung.

| Menge KBC | Menge GBC | Einheit | Ecoinvent Datensatz |
|-----------|-----------|---------|--|
| 0.25 | 0.35 | kg | Polyethylene, high density, granulate, recycled {CH} polyethylene production, high density, granulate, recycled |
| 0.25 | 0.35 | kg | Waste plastic, mixture {CH} market for waste plastic, mixture |

Tabelle 56: Datensatz für die zweite Sensitivitätsanalyse des GBC und KBC. Die Entsorgung wird hier nicht berücksichtigt, da es angenommen wird, dass die Kisten zur Ende der Lebensdauer rezykliert werden.

| Menge KBC | Menge GBC | Einheit | Ecoinvent Datensatz |
|-----------|-----------|---------|--|
| 0.25 | 0.35 | kg | Polyethylene, high density, granulate, recycled {CH} polyethylene production, high density, granulate, recycled |

5 Diskussion

Diese Arbeit hatte als Ziel, den Fussabdruck des Zuchtverfahrens des *Trypoxylus dichotomus* zu bestimmen. Die Arbeit wurde vom Leiter des Projektes "Food from Wood" beauftragt. Zum Zeitpunkt des Verfassens der Arbeit, befindet sich das Projekt noch in der Forschungsphase. Demzufolge wurden zwei Zukunftsszenarien modelliert. Das erste ist ein Kleinbetrieb, mit einem Produktionsvolumen von 1'600 kg pro Jahr, gedacht als Nebenerwerbsmöglichkeit für einen Bauernhofbetrieb. Das zweite Szenario ist ein Grossbetrieb, mit einem Produktionsvolumen von 14'000 kg Puppen pro Jahr. Für jedes Szenario wurde eine Best und eine Worst Case Variante modelliert, die sich in der Lieferdistanz der Rohstoffen, Strommix und Heizungstyp unterscheiden. Es wurde erwartet, dass die Best Case Varianten einen geringeren Fussabdruck als die Worst Case Varianten aufweisen. Dies konnte mit der Durchführung der Wirkungsabschätzung bestätigt werden, wobei bei allen drei angewendeten Methoden in jedem Szenario die Worst Case Variante immer einen höheren Wert als die Best Case Variante ergab.

5.1 Resultate

Die Verlängerung des Transportweges von Holz und Weizenkleie, sofern mit der IPCC Methode bewertet, hatte einen erheblichen Einfluss auf die Ökobilanz, wobei es 32 % und 28% der kg CO₂ eq. ausmachte, respektiv für Gross- und Kleinbetrieb (Worst Case). Mit der Methode der Ökologischen Knappheit und dem Product Environmental Footprint erhielt dieser Prozess eine geringere Gewichtung, wobei die Worst Case Varianten immer zu den vier wichtigsten Prozessen gehörte. In den Worst Case Varianten sind die Emissionen der Rohstoffe geringer als diejenigen des Transportes. Bei einem zukünftigen Aufbau eines Zuchtbetriebes sollte dementsprechend bei der Auswahl der Lieferanten eine möglichst kurze Lieferdistanz priorisiert werden.

Der Fussabdruck, bezüglich der Herstellung und Entsorgung der Kunststoffkisten, weist mit der IPCC Methode einen unerwartet hohen Fussabdruck auf, wobei sie im Grossbetrieb (Best Case) fast die Hälfte der Emissionen ausmacht, mit 1.21 kg CO₂ eq. Dieser ist hauptsächlich auf die Entsorgung in der Kehrichtverbrennungsanlage zurückzuführen. Im Kleinbetrieb und Forschungsszenario werden kleinere Kisten eingesetzt, die pro Funktionelle Einheit 0.86 kg CO₂ eq. emittieren. Dies scheint darauf hinzuweisen, dass die grossen Kisten ein ungünstiges Kistengewicht-Puppen-Verhältnis aufweisen. Die Anzahl an Puppen pro Kiste könnte diesbezüglich im Grossbetrieb optimiert werden.

Der Einfluss des Anlagebaus auf das Endergebnis war ebenfalls unerwartet. Der Fussabdruck pro Funktionelle Einheit Frischprodukt war im Kleinbetrieb, mit der Methode der Ökologischen Knappheit, um das Dreifache grösser als im Grossbetrieb. Dies, obwohl der Kleinbetrieb aus einer Holzkonstruktion besteht, die in der Realisierung weniger energie-und-

ressourcenintensiv als ein Massivbau ist. Der geringere Wert des Grossbetriebes ist somit auf die höhere Produktivität pro Fläche zurückzuführen, die im Grossbetrieb bei 13.94 kg pro m² und im Kleinbetrieb bei 10.68 kg pro m² liegt.

Die Auswahl des Strommix scheint in den Zukunftsszenarien kaum einen Einfluss zu haben. Die maschinellen Prozesse variieren nicht auffallend zwischen Best und Worst Case (Anhang). Eine Inkongruenz wurde in den Resultaten gefunden. Der Prozess der Hammermühle weist im Kleinbetrieb (Best Case) mit der IPCC Methode, 0.02 kg CO₂ eq. mehr als in der Worst Case Variante auf, wobei das Rüttelsieb in der Best Case Variante 0.89 kg CO₂ eq. weniger als beim Worst Case aufweist. In beiden Fällen unterscheiden die zwei Prozesse nur der benutzte Strommix.

5.2 Vergleich mit weiteren Insektenzuchten

Die Resultate der Wirkungsabschätzung wurden mit den Werten von weiteren Insektenzuchten verglichen. Als Vergleich wurde den Fussabdruck in kg CO₂ ausgedrückt, da dieser Wert in allen Paper benutzt wurde. In den Studien wurde das Zuchtsystem, wie bei dieser Arbeit, mit Cradle to Gate analysiert. Die benutzten Funktionellen Einheiten gleichen sich ebenfalls in allen Studien. Der Vergleich des Fussabdruckes der *Trypoxylus dichotomus* mit weiteren Insektenzuchten bestätigte, dass die erhaltenen Resultate realistisch sind.

Der erste verglichene Wert ist der eines niederländisches Insektenzuchtbetriebes, der *Tenebrio molitor* und *Zophobas morio* produziert (Oonincx & de Boer, 2012). Der Fussabdruck für 1 kg Frischprodukt ist mit 2.65 kg CO₂ eq. mit dem Grossbetriebs (Best Case), 2.57 kg CO₂ eq. vergleichbar. Wenn 1 kg Proteine verglichen werden, produziert der Grossbetrieb (Best Case) 30% weniger Emissionen als die niederländische Zucht (siehe Abbildung 9) Das Kleinbetriebs-Szenario (Worst Case), weist dagegen einen Fussabdruck auf, das um 44% grösser ist als der von *T. molitor* / *Z. morio*.

Die zweite untersuchte Zucht befindet sich in Nord-Thailand und produziert *Acheta domesticus* und *Gryllus bimaculatus* in gleicher Menge (Halloran et al., 2017). Das Produktionsvolumen dieser Zucht, 36'7000 kg pro Jahr, überstiegt das des Grossbetriebes um 22'700 kg und benutzt eine Fläche von 2700 m² (Halloran et al., 2017). Der Fussabdruck pro FU-F gleicht der des Grossbetriebes (Best Case) Szenario, mit 2.57 kg CO₂. Wenn die Emissionen pro kg Protein verglichen werden, weist dagegen die thailändische Zucht 50% geringere Emissionen auf. Das Kleinbetrieb-Szenario (Worst Case), emittiert 67% mehr Emissionen als die Produktion von *A. domesticus* und *G. bimaculatus*.

Von den untersuchten Insektenzuchten stellte sich die von *Hermetia illucens* als die mit dem geringsten Fussabdruck heraus, bei welchem die Emissionen bei 1.16 kg CO₂ eq. pro kg Larven liegen, also 55% weniger als beim Grossbetrieb-Szenario (Best Case). Das

Treibhauspotential pro kg Protein ist für die *H. illucens* 46% geringer als beim Grossbetrieb (Best Case) und 70% geringer als beim Kleinbetrieb (Worst Case). Der geringere Fussabdruck des *Hermetia illucens* konnte durch die Auswahl von Nebenprodukten der Lebensmittelindustrie erreicht werden. Der Ansatz des Projektes "Food from Wood", also das Anwenden von Nebenprodukten als Futtermittel, bestätigte sich als eine vielversprechende Strategie zur Reduktion der Emissionen.

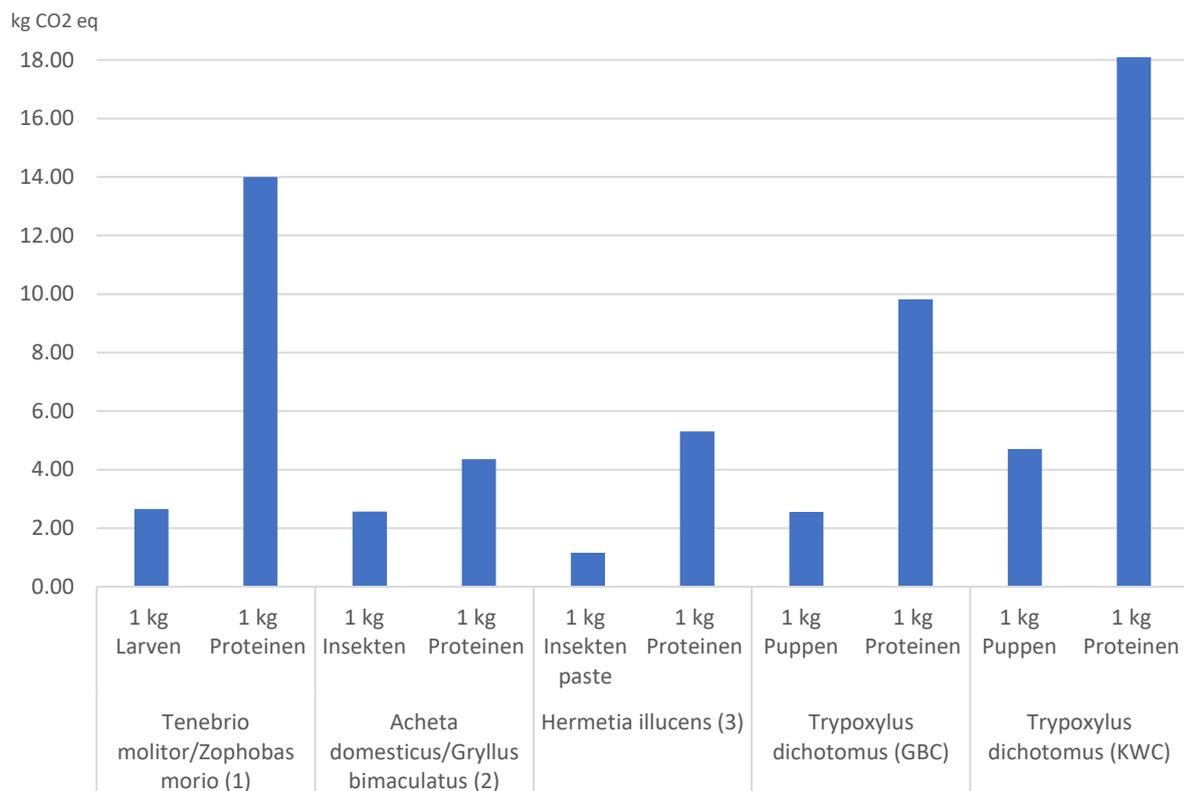


Abbildung 9: Vergleich des Fussabdruckes von 3 Insektenarten mit dem *Trypoxylus dichotomus*, in kg CO2 eq. angegeben. 1-(Oonincx & de Boer, 2012) Insektenzucht aus der Niederlande. 2-(Halloran et al., 2017), Insektenzucht in Nord-Thailand. 3-(Smetana et al., 2019) Insektenzucht in der Niederlande. Alle drei Studien wurden mit einer Cradle to Gate LCA durchgeführt. GBC=Grossbetrieb Best Case, KWC= Kleinbetrieb Worst Case.

5.3 Vergleich mit Fleisch

Um das Potential des *Trypoxylus dichotomus* als Fleischersatz zu untersuchen, wurde der Fussabdruck des Zuchtverfahrens mit drei Fleischarten aus der Schweiz verglichen, jeweils BIO und konventionell. Die Resultate, die in kg CO₂eq. ausgedrückt wurden, sind in der Abbildung 10 dargestellt. Die Werte stammen aus dem Paper von Alig et al. (2012). Die dabei benutzte Funktionelle Einheit ist 1 kg Fleisch, Lebendgewicht. Der Fussabdruck pro kg Protein wurde vom Autor hochgerechnet. Das Paper von de Castro et al. (2018) gab für jedes Tier die Proteinwerte von verschiedenen Fleischschnitten an. Es wurde der Mittelwert der Proteinanteile der Fleischschnitte berechnet; somit konnte die nötige Menge Fleisch für das Erhalten von 1 kg Protein berechnet werden. Das Resultat wurde als Multiplikationsfaktor angewendet, um den Fussabdruck pro kg Protein abzuleiten. Das Kleinbetrieb Szenario (Worst Case) weist, wenn das Frischprodukt betrachtet wird, 53% der Emissionen der Grossviehmast auf, 30% mehr CO₂ eq. als das Schweinefleisch und 66% mehr Emissionen als das Pouletfleisch. Wenn die Emissionen pro kg Protein berücksichtigt werden, emittiert der Kleinbetrieb geringere Emissionen als das Rindfleisch, 2% mehr als das Schweinefleisch und Schweinefleisch BIO, 55% und 40% mehr als Pouletfleisch konventionell und Pouletfleisch BIO. Der Grossbetrieb (Best Case) weist geringere CO₂ eq. Werte als die Grossviehmast und Schweinefleisch Produktion (Konventionell und BIO), für das kg Frischprodukt und kg Protein auf. Die Emissionen sind dagegen um 37% grösser als das konventionell Gezüchtete Pouletfleisch und 18% grösser als das BIO-Pouletfleisch. Mit 1 kg Proteinen als Funktionelle Einheit emittiert dagegen der Grossbetrieb 9% weniger CO₂ eq. als das BIO-Pouletfleisch und 17% mehr CO₂ eq. als das konventionelle Pouletfleisch.

Ein Problem bei diesem Vergleich liegt in der benutzten funktionellen Einheit, die für das Fleisch in kg Lebendgewicht angegeben wurde, das aber auch nicht essbare Teile des Tieres beinhaltet, wie die Knochen. Es muss des Weiteren bemerkt werden, dass die Verarbeitung des Fleisches möglicherweise ein energieintensiveres Verfahren ist als die Verarbeitung von Speiseinsekten. Allenfalls muss auch bemerkt werden, dass die Nutztierhaltung im Laufe der Jahre stark optimiert wurde. Die Zucht des Projektes "Food from Wood" befindet sich allenfalls in der Pilotphase und hat deshalb noch ein breites Optimierungspotential. Dies könnte die Validität des *T. dichotomus* als Fleischersatzes weiterhin bestätigen. Der Fussabdruck pro kg Protein des Fleisches wurde basierend auf den Fleisch-Nährwerten des Papers von de Castro et al. (2018) berechnet. Diese Werte stellen somit kein Endgültiges Resultat dar.

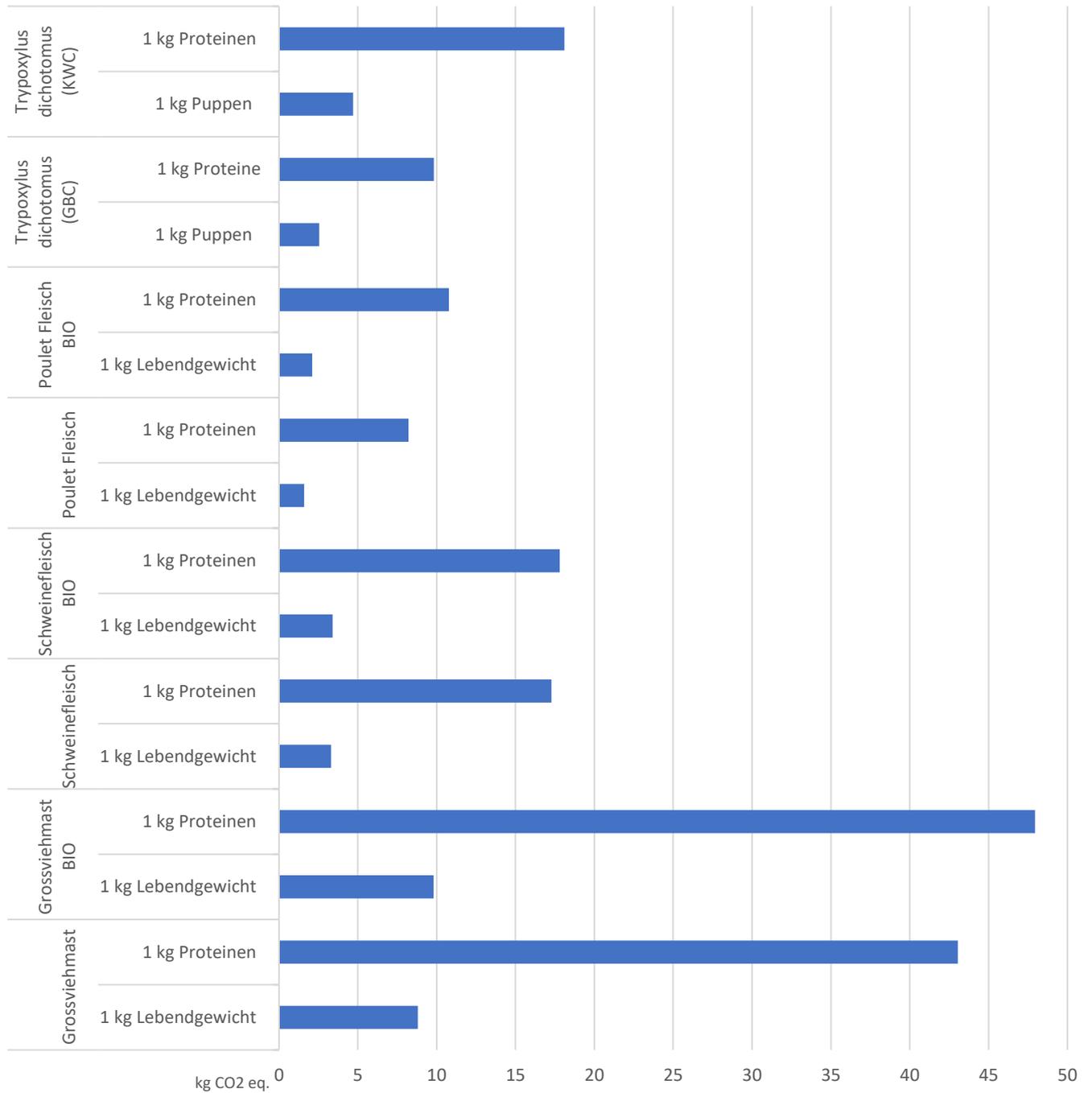


Abbildung 10: Vergleich des Fussabdruckes mit 6 Fleischprodukten aus der Schweiz. Es werden 3 Fleischtypen verglichen, jeweils konventionell und Bio gezüchtet. Die Werte des Fleisches stammen aus dem Paper von Alig et al. (2012). Die ausgeführte Ökobilanz wird mit Cradle to Gate durchgeführt, also ohne Verarbeitung und Distribution bis zum Endkonsument. Die Werte pro kg Protein wurden vom Autor gerechnet, basierend auf die Proteinwerte die von de Castro et al. (2018) angegeben wurden. 1-GBC=Grossbetrieb Best Case 2-Kleinbetrieb Worst Case.

5.4 Limitationen

Diese Arbeit war mit einigen Limitationen verbunden. Die Emissionen, die aus der Fermentierung des Substrates entstehen, wurden nicht berücksichtigt, da im Forschungsprojekt diesbezüglich keine Daten erhoben wurden. Die Daten der Emissionen, die von den Insekten generiert werden, sowie der Proteinanteil des *T. dichotomus* basieren auf Literaturwerten. Die von den Insekten generierte Emissionen haben einen minimalen Einfluss auf das Endresultat. Der Proteinanteil dagegen, kann zwischen Insektenarten stark variieren, was der Fussabdruck pro kg Protein vermutlich auf eine bedeutende Weise beeinflussen kann. Der Stromverbrauch des Tiefkühl-Prozesses auf den Daten eines Fleischbetriebes basiert wurde, was durchaus nicht unbedingt den Lagerbedingungen von Insekten entspricht. Dieser Aspekt der Zucht wurde von den Forschern von "Food from Wood" noch nicht untersucht.

Eine weitere Limitierung dieser Arbeit stellt die Modellierung des Zuchtbetriebes dar. Für diese Arbeit wurde der Grossbetrieb (Best Case) als Referenz benutzt, und, auf Empfehlung des Leiters von «Food from Wood», 30% dieses Datensatzes auf das Endresultat zugerechnet.

Der Heizungsaufwand des Forschungsszenarios wurde anhand einer Messung, die in der Forschungsanlage durchgeführt wurde, auf der Zeitdauer eines Zuchtzyklus hochgerechnet. Dieser Wert ist somit mit einer gewissen Unsicherheit verbunden.

5.5 Ausblick und Empfehlungen

Der nächste Schritt für das Projekt sollte darin bestehen, ein vollständiges Modell des Zucht- und Mastablaufes zu entwerfen. Dies würde eine aussagekräftigere Ökobilanzierung erlauben. Die Daten der direkten Emissionen und der Zusammensetzung der Insekten werden an der ETH erforscht und sollten nächstens veröffentlicht werden, diese sollten ebenfalls in der Berechnung mitberücksichtigt werden.

Die Wirkungsabschätzung hat gezeigt, dass einige Prozesse einen merkbaren Einfluss auf das Endresultat haben. Bei einem Aufbau einer *T. dichotomus* Zucht wird es dementsprechend zentral sein, diese Faktoren zu berücksichtigen. Der Standort des Mastbetriebes sollte so ausgewählt werden, dass die Transportwege der Rohstoffe möglichst kurz sind. Speziell ist dies für das Holz wichtig, da die 6-Fache Menge der Weizenkleie benötigt wird. Im Forschungsszenario kann bereits ein grosser Anteil des Holzes von der nahestehenden Sägerei bezogen werden. Ein zukünftiger Betrieb sollte sich somit ebenfalls in der unmittelbaren Nähe eines Gewerbes, welches grosse Menge an Holz verarbeitet, befinden. Eine Vision von "Food from Wood" ist das Anwenden der Abwärme von einer Kehrlichtverbrennungsanlage, um den Fussabdruck des Heizungsprozesses zu reduzieren. Die Wirkungsabschätzung hat jedoch gezeigt, dass dieser Prozess einen mässigen Einfluss auf die Gesamtemission ausübt,

besonders wenn eine Wärmepumpe als Heizung benutzt wird. Bei der Standortauswahl sollten dementsprechend kurze Transportwege gegenüber dem Nutzen von Abwärme priorisiert werden.

Die Kunststoffkisten stellten ebenfalls einen wichtigen Beitrag zur Gesamtemissionen dar. Ein Weg, um die Emissionen in diesem Bereich zu reduzieren, wäre die Auswahl eines Materials, das eine längere Lebensdauer aufweist. Das Anwenden von Kunststoffkisten aus rezyklierten PET würde eine Reduktion des 7% für den Grossbetrieb (Best Case) führen, wie die Sensitivitätsanalyse gezeigt hat. Wenn die Kisten zur Ende des Lebenszyklus anstatt in einer Verbrennungsanlage weiter rezykliert werden, sinken für den Grossbetrieb (Best Case) die Emissionen sogar um 39%, mit 1.57 kg CO₂ eq. Somit würde die CO₂ Emissionen die des Pouletfleisch gleichen.

Es wurde festgestellt, dass die Produktionsdichte einen grösseren Einfluss als die Auswahl des Baumaterials hat. Zur Erhöhung der Produktionsdichte könnte die Fläche des Mastrausms erweitert werden sowie die Anzahl an gestapelten Kisten. Wohl bedacht, dass nicht alle Prozesse optimiert werden können, muss überlegt werden, welche Umweltwirkungen zu priorisieren sind.

Die Zucht des *Trypoxylus dichotomus* kann als ein versprechender Ansatz als alternative Quelle von hochwertigen Proteinen bezeichnet werden. Wenn die Hürden der Zulassung des *T. dichotomus* als Lebensmittel überschritten werden können, sowie der Widerstand der Konsumenten gegenüber Insektenprodukten, würde dieses Produkt sicherlich eine Nische im Schweizer Markt finden.

6 Fazit

Die Durchführung der Wirkungsabschätzung bestätigte, dass die Best Case Varianten den geringeren Fussabdruck gegenüber der Worst Case Varianten aufwiesen. Der Grossbetrieb war hauptsächlich aufgrund der höheren Produktionsdichte effizienter als der Kleinbetrieb, und wies dadurch geringere Emissionen pro Funktionelle Einheit auf. Der Einfluss der Produktionsdichte war beim Bau der Anlage besonders auffallend. Mit der Methode der Ökologischen Knappheit trieben beim Kleinbetrieb dreimal so viel Emissionen aus als beim Grossbetrieb. Die Verlängerung des Transportweges zeigte sich als ein einflussreicher Faktor auf die Gesamtumweltbelastung. Die Herstellung und Entsorgung der Kisten hatte besonders mit der IPCC Methode ein wichtiger Einfluss auf das Endergebnis, wobei diese im Grossbetrieb fast bis zur Hälfte der Gesamtemissionen ausmachte. Die Werte des Grossbetriebs (Best Case) waren mit diejenigen der weiteren Insektenzuchten vergleichbar, mit die *T. molitor*/*Z. morio* die den höchsten Wert und die *H. illucens*, welche den kleinsten Wert aufweisen. Beim Vergleich mit dem Fleisch schneidet nur das konventionell gezüchtete Pouletfleisch besser als die Best Case Variante des Grossbetriebs. Die Limitationen dieser Arbeit lagen hauptsächlich an den zahlreichen Annahmen, die für die Modellierung der Zuchtszenarien notwendig waren. Zum Schluss wurde empfohlen, der Standort der Zucht so auszuwählen, dass möglichst kurze Transportwege für den Rohstoff, besonders das Holz, entstehen. Das Anwenden von Kisten aus rezyklierten Material und dessen rezyklieren nach Ablauf des Lebenszyklus kann zu einer Reduktion der CO₂ eq. Emissionen von bis zu knapp 40% führen. Zusammenfassend kann gesagt werden, dass der *T. dichotomus* eine vielversprechende nachhaltige Proteinquelle darstellen kann.

7 Literaturverzeichnis

- Abplanalp, J.-R. (2019). *Ökobilanz Speiseinsektenproduktion Food from Wood*. ZAHW, Institut für Umwelt und Natürliche Ressourcen.
- Alig, M., Grandl, F., Mieleitner, J., Nemecek, T. & Gaillard, G. (2012). Ökobilanz von Rind-, Schweine- und Geflügelfleisch. *Forschungsanstalt Agroscope Reckenholz-Tänikon ART*.
- BAFU, B. für U. (2011). Gesamt-Umweltbelastung durch Konsum und Produktion der Schweiz. Zugriff am 22.4.2020. Verfügbar unter:
<https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/thema-wirtschaft-und-konsum/wirtschaft-und-konsum--publikationen/publikationen-wirtschaft-und-konsum/gesamt-umweltbelastung-durch-konsum-und-produktion-der-schweiz--.html>
- Banjo, A. D., Lawal, O. A. & Songonuga, E. A. (2006). The nutritional value of fourteen species of edible insects in southwestern Nigeria. *African Journal of Biotechnology*, 5(3), 298–301. <https://doi.org/10.4314/ajb.v5i3>.
- BioLib. (2021). BioLib: Biological library. Zugriff am 1.1.2021. Verfügbar unter:
<https://www.biolib.cz/en/taxon/id337415/>
- de Castro, R. J. S., Ohara, A., Aguilar, J. G. dos S. & Domingues, M. A. F. (2018). Nutritional, functional and biological properties of insect proteins: Processes for obtaining, consumption and future challenges. *Trends in Food Science & Technology*, 76, 82–89. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2018.04.006>
- Churchward-Venne, T. A., Pinckaers, P. J. M., van Loon, J. J. A. & van Loon, L. J. C. (2017). Consideration of insects as a source of dietary protein for human consumption. *Nutrition Reviews*, 75(12), 1035–1045. Oxford Academic.
<https://doi.org/10.1093/nutrit/nux057>
- Ecoinvent. (2021, Januar). Cut-Off System Model. *Ecoinvent*. Zugriff am 26.1.2021. Verfügbar unter: <https://www.ecoinvent.org/database/system-models-in-ecoinvent-3/cut-off-system-model/allocation-cut-off-by-classification.html>

- Frischknecht, R., Büsser Knöpfel, S., Flury, K., Stucki, M. & Ahmadi, M. (2013). Ökofaktoren Schweiz 2013 gemäss der Methode der ökologischen Knappheit. Methodische Grundlagen und Anwendung auf die Schweiz, (Bundesamt für Umwelt BAFU).
<https://doi.org/UW-1330-D>
- Halloran, A., Hanboonsong, Y., Roos, N. & Bruun, S. (2017). Life cycle assessment of cricket farming in north-eastern Thailand. *Journal of Cleaner Production*, 156, 83–94.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.04.017>
- Halloran, A., Roos, N., Eilenberg, J., Cerutti, A. & Bruun, S. (2016). Life cycle assessment of edible insects for food protein: a review. *Agronomy for Sustainable Development*, 36(4), 57. <https://doi.org/10.1007/s13593-016-0392-8>
- Halloran, A., Vantomme, P., Hanboonsong, Y. & Ekesi, S. (2015). Regulating edible insects: the challenge of addressing food security, nature conservation, and the erosion of traditional food culture. *Food Security*, 7(3), 739–746. <https://doi.org/10.1007/s12571-015-0463-8>
- Holzvomfach. (2021). Weichholz oder Hartholz? *Holz vom Fach*. Zugriff am 30.1.2021.
 Verfügbar unter: <https://www.holzvomfach.de/fachwissen-holz/wissenswertes/holzwissen/weichholz-oder-hartholz/>
- van Huis, A. (2015). Edible insects contributing to food security? *Agriculture & Food Security*, 4(1), 20. <https://doi.org/10.1186/s40066-015-0041-5>
- Huis, A. van. (2016). Edible insects are the future? *Proceedings of the Nutrition Society*, 75(3), 294–305. Cambridge University Press.
<https://doi.org/10.1017/S0029665116000069>
- Manfredi, S., Allacker, K., Pelletier, N., Chomkham Sri, K. & de Souza, D. M. (2012). Product Environmental Footprint (PEF) Guide. European Commission - Joint Research Centre; Ispra, Italy.
- Mertenat, A., Diener, S. & Zurbrügg, C. (2019). Black Soldier Fly biowaste treatment – Assessment of global warming potential. *Waste Management*, 84, 173–181.
<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.11.040>

- Nettoshop. (2020, Dezember). Kibernetik TK65L A++ Gefrierschrank weiss rechts.
Nettoshop. Zugriff am 12.12.2020. Verfügbar unter:
<https://www.nettoshop.ch/Haushalt-Grossger%C3%A4te/K%C3%BChlen-und-Gefrieren/Gefrierschrank-freistehend/Kompakt-85cm/Kompakt-85cm-ab-30-kg/Kibernetik-TK65L-A-Gefrierschrank-weiss-rechts/p/IP074511>
- Oonincx, D. G. A. B. & de Boer, I. J. M. (2012). Environmental Impact of the Production of Mealworms as a Protein Source for Humans – A Life Cycle Assessment. (G.A. Sword, Hrsg.) *PLoS ONE*, 7(12), e51145.
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0051145>
- Oonincx, D. G. A. B., Itterbeeck, J. van, Heetkamp, M. J. W., Brand, H. van den, Loon, J. J. A. van & Huis, A. van. (2010). An Exploration on Greenhouse Gas and Ammonia Production by Insect Species Suitable for Animal or Human Consumption. *PLOS ONE*, 5(12), e14445. Public Library of Science.
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0014445>
- Ritchie, H. & Roser, M. (2017). Meat and Dairy Production. *Our World in Data*.
- Rojas-Downing, M. M., Nejadhashemi, A. P., Harrigan, T. & Woznicki, S. A. (2017). Climate change and livestock: Impacts, adaptation, and mitigation. *Climate Risk Management*, 16, 145–163. <https://doi.org/10.1016/j.crm.2017.02.001>
- Salim, I., González-García, S., Feijoo, G. & Moreira, M. T. (2019). Assessing the environmental sustainability of glucose from wheat as a fermentation feedstock. *Journal of Environmental Management*, 247, 323–332.
<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.06.016>
- Scanu, S. (2019). *Vergleichende Ökobilanz von gefrorenem Rindfleisch der Lumabeef AG und gekühltem Rindfleisch aus dem Supermarkt*. Wädenswil: ZAHW, Institut für Umwelt und Natürliche Ressourcen.
- Schmidt, R. (2016). Ausgestaltung und Wirkung der forstlichen Förderung nach NFA im Kanton Bern (Essay). *Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen*, 167(5), 264–269.
<https://doi.org/10.3188/szf.2016.0264>

- Shin, Y., Kim, T. & Cho, H. (2014). Comparison of Exergy in a Refrigerating System using R404A and R134a for a Refrigeration Truck with Operating Conditions. *Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering*, 26(11), 497–503.
<https://doi.org/10.6110/KJACR.2014.26.11.497>
- Shockley, M. & Dossey, A. T. (2014). Chapter 18 - Insects for Human Consumption. In J.A. Morales-Ramos, M.G. Rojas & D.I. Shapiro-Ilan (Hrsg.), *Mass Production of Beneficial Organisms* (S. 617–652). San Diego: Academic Press.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-391453-8.00018-2>
- Smetana, S., Palanisamy, M., Mathys, A. & Heinz, V. (2016). Sustainability of insect use for feed and food: Life Cycle Assessment perspective. *Journal of Cleaner Production*, 137, 741–751. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.07.148>
- Smetana, S., Schmitt, E. & Mathys, A. (2019). Sustainable use of *Hermetia illucens* insect biomass for feed and food: Attributional and consequential life cycle assessment. *Resources, Conservation and Recycling*, 144, 285–296.
<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.01.042>
- Stocker, T. F., Qin, D., Plattner, G.-K., Tignor, M., Allen, S. K., Boschung, J. et al. (2013). *Climate change 2013: The physical science basis*. Cambridge University Press Cambridge.
- Topregal. (2020, Dezember). SolidHub Elektrostapler HE1200/3, Hubhöhe 3000mm, Tragkraft 1200kg | TOPREGAL. <https://www.topregal.com/>. Zugriff am 9.12.2020.
 Verfügbar unter: <https://www.topregal.com/de/hubwagen/solidhub-elektrostapler-he1200-3-hubhoehe-3000mm-tragkraft-1200kg.html>
- Ubakus. (2020). U-Wert-Rechner | ubakus.com. Zugriff am 29.1.2021. Verfügbar unter: <https://www.ubakus.com/de-ch/u-wert-rechner/>
- van der Weele, C., Feindt, P., Jan van der Goot, A., van Mierlo, B. & van Boekel, M. (2019). Meat alternatives: an integrative comparison. *Trends in Food Science & Technology*, 88, 505–512. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2019.04.018>

8 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Systembild Forschungsszenario. Das Systembild kann in vier Bereiche unterteilt werden, die von einem gestrichelten Rahmen umgeben werden. Die Systemgrenze umfasst alle in der Ökobilanzierung berücksichtigten Prozesse. Der zweite Bereich ist von den Hintergrunddaten dargestellt. Des Weiteren werden die Bereiche markiert, in dem die Mast-und-Zuchtprozesse stattfinden. Das Kästchen der Funktionelle Einheit wird rot markiert. Das Systembild wurde mit der Software draw.io hergestellt. 18

Abbildung 2: Systembild der Zukunftsszenarien. Die zwei Szenarien unterscheiden sich nur an den gelb markierten Kästchen. Diese Prozesse finden nur im Grossbetrieb statt. Das Systembild wurde mit der Software draw.io hergestellt. 20

Abbildung 3: Vergleichende Graphik der untersuchten Szenarien mit der IPCC 2013 Methode. Die Werte sind in kg CO₂ eq. ausgedruckt. Die Gesamtemissionen pro Variante sind, von links nach rechts: 2.57 kg CO₂ eq., 4.19 kg CO₂ eq., 2.79 kg CO₂ eq., 4.66 kg CO₂ eq. und 4.92 kg CO₂ eq. Im Kleinbetrieb Worst Case ist führt der Fussabdruck der Heizung dazu, dass der Zuchtprozess in die «restliche Prozesse» fliesst. Dies geschieht, weil für jede Variante die 4 Prozesse mit dem grössten Beitrag zur Gesamtemissionen führen. Der Zuchtprozess wurde für alle Zukunftsszenarien gleich modelliert, da es angenommen wird, dass die Betreiber die Mastbereite Larven aus derselbe Zuchtbetrieb stammen. Im Forschungsszenario wird die Zucht im gleichen Gebäude der Mast. Somit fällt der Transport aus, was zu einer Reduktion des Fussabdruckes führt. Im Grossbetrieb Worst Case fällt die Heizung unten die «restliche Prozesse», ist jedoch mit 0.31 kg CO₂ eq. mit dem Bau der Anlage vergleichbar. Im Forschungsszenario weist der Transport der Weizenkleie einen grösseren Fussabdruckes als das Transport des Holzes. Grund dafür ist die längere Lieferdistanz der Weizenkleie. Der Bau der Anlage erscheint im Forschungsszenario nicht, da bei diesem Szenario dieser Prozess nicht modelliert wurde. 53

Abbildung 4: Vergleichende Graphik des Fussabdruckes der untersuchten Szenarien, mit der Methode der Ökologische Knappheit. Die Werte sind in kPt angegeben (Tausend UBP) Von links nach rechts weisen die folgende Gesamtemissionen: 3.82 kPt, 5.55 kPt, 5.26 kPt, 7.19 kPt und 15.1 kPt. Für den Vergleich der Szenarien wurden die 4 Prozesse mit dem grössten Einfluss auf die Gesamtbelastung ausgewählt, die andere werden unten «restliche Prozesse» eingeteilt. Der Zuchtprozess weist in den Zukunftsszenarien denselben Wert, während im Forschungsszenario dieser um 35% geringer ist, da der Transport von Mastbereite Larven ausfällt. Der Holztransport erscheint nur in den Worst-Case Varianten, aufgrund der deutlich höhere Emissionen. Der Fussabdruckes der Substratmaterial ist für alle untersuchten Szenarien gleich, fällt aber in den Worst Case Varianten unten den restlichen Prozesse. Die Resultate werden im Anhang vollständig dargestellt. 55

Abbildung 5: Vergleichende Graphik der 5 untersuchten Varianten. Auf der Vertikalachse befinden sich die PEF Midpoint-Kategorien, auf der Horizontalachse werden die Prozentanteile aufgezeigt. Für jede Kategorie wurde die Variante mit dem Grössten Fussabdruck gleich 100% gesetzt, sodass der prozentuellen Unterschied zwischen den unterschieden Varianten ersichtlich wird. Der Gesamten Fussabdruck

liegt bei 1336.92 μ Pt für das FS, 619 μ Pt für das KWC, 468 μ Pt für den KBC, 466.5 μ Pt für den GWC und 329.34 μ Pt für den GBC. 57

Abbildung 6: Prozessbeitrag pro Midpoint Kategorie der PEF Methode. Auf der Vertikalachse werden die Kategorie, und auf der Horizontalachse die prozentuellen Anteile dargestellt. Die Prozesse wurden in Kategorien eingeordnet, ausser die Prozesse Heizung und Bau Anlage. Material: Kunststoffkisten und Substrat; Transport: Transportprozesse von Holz, Weizenkleie und Puppen; Verarbeitung: Maschinelle Prozesse (Hammermühle, Mischmaschine, Rüttelsieb) Tiefkühlung der Puppen; Weiteres: Zucht und Emissionen der Insekten. 58

Abbildung 7: Sensitivitätsanalyse der Umweltauswirkungsabschätzung mit der IPCC Methode. Die Daten auf der Vertikalachse werden in kg CO₂ eq. aufgezeigt. Wenn Recycling PET verwendet wird und die Entsorgung in der Kehrichtverbrennungsanlage stattfindet, sinken die Fussabdruck auf 2.39 kg CO₂ eq. im GBC und 2.66 kg CO₂ eq. im KBC. Wenn die Kisten nach dem Verbrauch rezykliert werden, sinken die CO₂ Emissionen auf 1.57 kg pro FU-F für den GBC und 2.08 kg pro FU-F. 59

Abbildung 8: Vergleich des Fussabdruckes von 3 Insektenarten mit dem Trypoxylus dichotomus, in kg CO₂ eq. angegeben. 1-(Oonincx & de Boer, 2012) Insektenzucht aus der Niederlande. 2-(Halloran et al., 2017), Insektenzucht in Nord-Thailand. 3-(Smetana et al., 2019) Insektenzucht in der Niederlande. Alle drei Studien wurden mit einer Cradle to Gate LCA durchgeführt. GBC=Grossbetrieb Best Case, KWC= Kleinbetrieb Worst Case. 63

Abbildung 9: Vergleich des Fussabdruckes mit 6 Fleischprodukten aus der Schweiz. Es werden 3 Fleischtypen verglichen, jeweils konventionell und Bio gezüchtet. Die Werte des Fleisches stammen aus dem Paper von Alig et al. (2012). Die ausgeführte Ökobilanz wird mit Cradle to Gate durchgeführt, also ohne Verarbeitung und Distribution bis zum Endkonsument. Die Werte pro kg Protein wurden vom Autor gerechnet, basierend auf die Proteinwerte die von de Castro et al. (2018) angegeben wurden. 1-GBC=Grossbetrieb Best Case 2-Kleinbetrieb Worst Case. 65

9 Tabellenverzeichnis

| | |
|--|----|
| Tabelle 1: Berechnung der nötige Menge an Puppen für 1 kg Proteinen | 12 |
| Tabelle 2: Darstellung der untersuchten Varianten. Der Produktionsvolumen wurde anhand folgender Formel berechnet: $(\text{Fläche Mastraum} / \% \text{ von Kisten gedeckte Fläche} / \text{Fläche Kiste}) * n. \text{ gestapelten Boxen} * \text{Anzahl Puppen pro Kiste} * \text{Gewicht Puppe} * \text{Zuchtzyklen}$. Die Variablen der Formel sind ebenfalls in der Tabelle dargestellt. Der Kisten-Füllungsgrad der Masträume liegt 80%. Um den Anteil der Puppen pro Kiste zu berechnen wurde der Füllvolumen der Kisten durch 0.001 m ³ geteilt, das den Substratbedarf pro Larve darstellt, korrigiert mit dem Faktor 0.95, der die Mortalität von 5% der Larven mitberücksichtigt. | 15 |
| Tabelle 3: Berechnung des Substratverbrauch anhand eines kg Puppen. Die Zusammensetzung des Substrates wird in Massenprozent angegeben. Eine Larve in der Mastphase verbraucht bis zur Verpuppung 1 Liter Substrat, das 0.3 kg Masse entsprechen..... | 23 |
| Tabelle 4: Datensatz Substratmaterial Forschungsszenario..... | 23 |
| Tabelle 5: Datensatz Holzlieferung Forschungsszenario..... | 24 |
| Tabelle 6: Datensatz Weizenkleie-Lieferung im Forschungsszenario | 24 |
| Tabelle 7: Datensatz Holztransport | 25 |
| Tabelle 8: Datensatz Transport Weizenkleie | 25 |
| Tabelle 9: Datensatz Holztransport | 25 |
| Tabelle 10: Datensatz Weizenkleie-Transport..... | 25 |
| Tabelle 11: Berechnung des Anteil an benutzte Kunststoffkiste pro FU-F. Die angegebenen Lebensdauer bezieht sich auf einem Schätzwert des Projektleiters von «Food from Wood». Der Volumen der Kisten wird für die Berechnung des Wasserverbrauches in der Tabelle 12 angewendet. Die Anzahl an Zuchtzyklen wird in Tabelle 2 aufgezeigt und liegt bei 1.8 pro Jahr. | 26 |
| Tabelle 12: Berechnung für den Wasserverbrauch für das Reinigen der Kisten. Für diese Berechnung wird den Volumen von 0.09m ³ für den Kleinbetrieb/Forschungsszenario und 0.34m ³ für den Grossbetrieb angewendet. Der Wasserverbrauch pro FU-F ist im Kleinbetrieb grösser als für das Reinigen einer Kiste, da mehr als eine benötigt ist für das Mästen von 1 kg Puppen. Andererseits können in den Kisten des Grossbetriebes mehr als ein kg Puppen produziert werden, daher ist der Wasserverbrauch pro FU-F geringer als das Reinigen der ganze 0.34m ³ Kiste..... | 27 |
| Tabelle 13: Datensatz Kunststoffkisten kleinbetrieb/Forschungsszenario | 27 |
| Tabelle 14: Datensatz Kunststoffkisten Grossbetrieb | 28 |

| | |
|---|----|
| Tabelle 15: Technische Daten Schneckenhäcksler. Aus dem Einsatzdauer für 1000 kg Holz wird der Einsatzdauer pro FU-F berechnet. Das Gewicht des Holz pro FU-F, das in der Berechnung benutzt wird, liegt bei 6 kg. Da der Schneckenhäcksler für 50% des Holzes eingesetzt wird, werden bei der Berechnungen der Zuteilung der Maschine pro FU-F sowie des Dieserverbrauches pro FU-F mit dem Faktor 0.5 korrigiert..... | 30 |
| Tabelle 16: Datensatz Schneckenhäcksler. Die Herstellung sowie das Verbrennen des Diesels wurden mitberücksichtigt. Für den Verbrennungsdatsatz musste die Verbrauchte Menge mit der Energiedichte ausmultiplizieren, da der Datensatz in kWh ausgedruckt wird. | 30 |
| Tabelle 17: Technische Daten Hammermühle. Die Lebensdauer der Hammermühle ist auf einen Schätzwert basiert. Der Einsatzdauer pro FU-F wurde aus dem Einsatzdauer pro 1000 kg gerechnet. | 31 |
| Tabelle 18:Datensatz Hammermühle (Forschungsszenario)..... | 31 |
| Tabelle 19: Datensatz für Hammermühle (Best Case, Klein und Grossbetrieb)..... | 31 |
| Tabelle 20: Datensatz für Hammermühle (Worst Case, Klein und Grossbetrieb)..... | 32 |
| Tabelle 21: technische Daten Mischmaschine..... | 32 |
| Tabelle 22: Datensatz Forschungsszenario..... | 32 |
| Tabelle 23: Datensatz Mischmaschine (Best Case) | 33 |
| Tabelle 24: Datensatz Mischmaschine (Worst Case) | 33 |
| Tabelle 25: Technische Daten Rüttelsieb. Die Lebensdauer ist basiert auf einen Schätzwert basiert. Das Gewicht des Substrates pro FU-F wird in der Tabelle 4 dargestellt und liegt bei 20 kg. | 34 |
| Tabelle 26: Datensatz Rüttelsieb (Forschungsszenario) | 34 |
| Tabelle 27: Datensatz Rüttelsieb (Best Case)..... | 35 |
| Tabelle 28: Datensatz Rüttelsieb (Worst Case)..... | 35 |
| Tabelle 29: Technische Daten Elektrostapler (Topregal, 2020). Der Einsatzdauer wurde auf 5 min pro Kiste geschätzt. Basierend auf diese Annahme wurde den Einsatzdauer pro FU-F gerechnet. | 36 |
| Tabelle 30: Datensatz Elektrostapler (Best Case)..... | 36 |
| Tabelle 31: Datensatz Elektrostapler (Worst Case)..... | 37 |
| Tabelle 32: Berechnungen Energiebedarf Tiefkühlung für Forschungsszenario. Der Energieverbrauch für 5 kg Puppen wurde durch 5 geteilt, um den Wert pro FU-F zu bestimmen. Der Volumen der Puppen wurde benutzt, um das Verhältnis zum Energieverbrauch bei Vollast zu berechnen. | 38 |

| | |
|---|----|
| Tabelle 33: Datensatz Tiefkühlung Forschungsszenario | 38 |
| Tabelle 34: Strombedarf für Tiefkühlung (Kleinbetrieb) | 40 |
| Tabelle 35: Strombedarf für Tiefkühlung (Grossbetrieb)..... | 40 |
| Tabelle 36: Berechnung Kühlmittel für Kleinbetrieb | 41 |
| Tabelle 37 Berechnung Kühlmittel für Grossbetrieb | 41 |
| Tabelle 38: Datensatz Tiefkühlung Best Case (Kleinbetrieb)..... | 42 |
| Tabelle 39: Datensatz Tiefkühlung Worst Case (Kleinbetreib) | 42 |
| Tabelle 40: Datensatz Tiefkühlung Best Case (Grossbetrieb)..... | 42 |
| Tabelle 41: Datensatz Tiefkühlung Worst Case (Grossbetrieb)..... | 42 |
| Tabelle 42: Berechnung Heizungsbedarf pro FU-F für Gross-und-Kleinbetrieb | 44 |
| Tabelle 43: Datensatz Kleinbetrieb Best Case | 44 |
| Tabelle 44: Datensatz Grossbetrieb Best Case | 44 |
| Tabelle 45: Datensatz Kleinbetrieb Worst Case | 45 |
| Tabelle 46: Datensatz Grossbetrieb Worst Case..... | 45 |
| Tabelle 47: Berechnungen Heizungsbedarf Forschungsszenario | 46 |
| Tabelle 48: Datensatz Heizungsbedarf Forschungsszenario..... | 46 |
| Tabelle 49: Bau Datensatz für Kleinbetrieb | 47 |
| Tabelle 50: Bau Datensatz für Grossbetrieb (Best Case)..... | 47 |
| Tabelle 51: Emissionen der Larven | 48 |
| Tabelle 52: Berechnungen für Transportmenge. Das Gewicht der L2 Larven ist auf eine Annahme des Autors basiert..... | 50 |
| Tabelle 53: Datensatz Transport Puppen und Larven für Zuchtbetrieb | 50 |
| Tabelle 54: Datensatz für die erste Sensitivitätsanalyse des GBC und KBC. Der ersten Datensatz stellt das rezyklierten PET dar, und der «Waste Plastic» Datensatz die Entsorgung in der Kehrichverbrennung. | 60 |
| Tabelle 55: Datensatz für die zweite Sensitivitätsanalyse des GBC und KBC. Die Entsorgung wird hier nicht berücksichtigt, da es angenommen wird, dass die Kisten zur Ende der Lebensdauer rezykliert werden. | 60 |

Anhang 1



Alle Angaben ohne Gewähr

Innenwand_A

Innenwand
erstellt am 25.12.2020

Wärmeschutz

$U = 0,50 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$

MuKEn14 Umbau*: $U < 0,7 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$



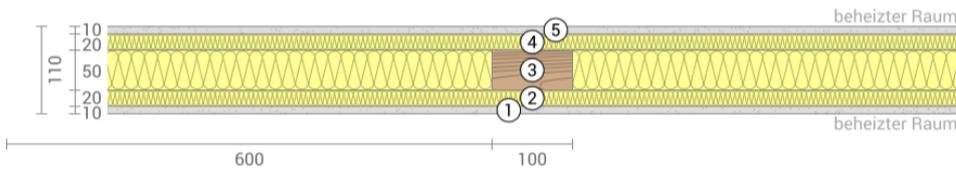
Feuchteschutz

Kein Tauwasser



Hitzeschutz

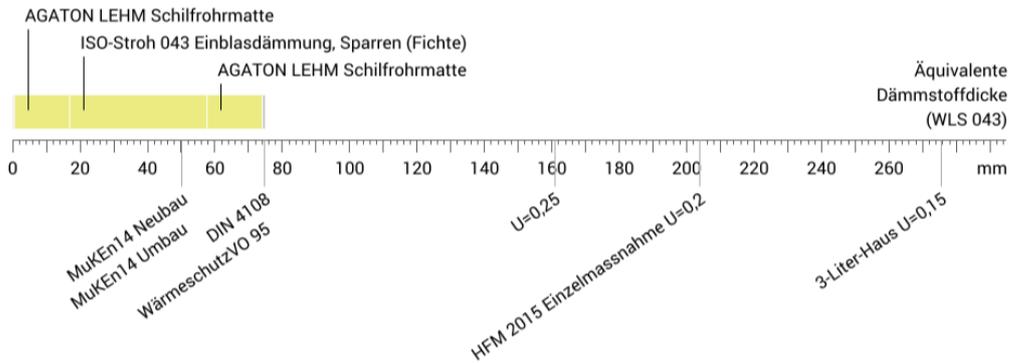
Temperaturamplitudendämpfung: 3,2
Phasenverschiebung: 6,2 h
Wärmekapazität innen: 23 kJ/m²K



- ① Lehm-Oberputz (10 mm)
- ② AGATON LEHM Schilfrohrmatte (20 mm)
- ③ Sparren (50 mm)
- ④ AGATON LEHM Schilfrohrmatte (20 mm)
- ⑤ Lehm-Oberputz (10 mm)

Dämmwirkung einzelner Schichten und Vergleich mit Richtwerten

Für die folgende Abbildung wurden die Wärmedurchgangswiderstände (d.h. die Dämmwirkung) der einzelnen Schichten in Millimeter Dämmstoff umgerechnet. Die Skala bezieht sich auf einen Dämmstoff der Wärmeleitfähigkeit 0,043 W/mK.



Raumluft: 26,0°C / 80%
Raumluft 2: 20,0°C / 50%
Oberflächentemp.: 25,1°C / 20,1°C

sd-Wert: 0,3 m

Dicke: 11,0 cm
Gewicht: 44 kg/m²
Wärmekapazität: 51 kJ/m²K

Aussenwand_A_Beton

Außenwand
erstellt am 25.12.2020

Wärmeschutz

$U = 0,19 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$

MuKEn14 Umbau*: $U < 0,25 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$

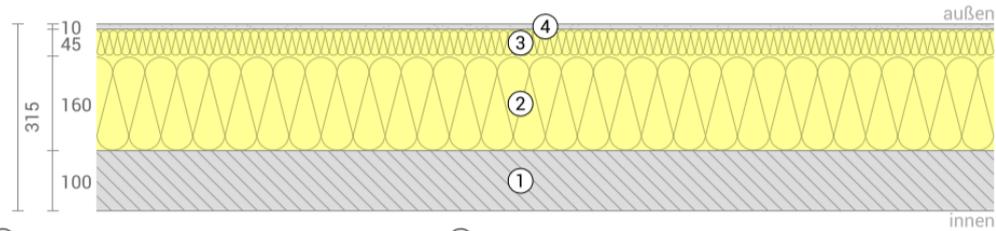


Feuchteschutz

Kein Tauwasser

Hitzeschutz

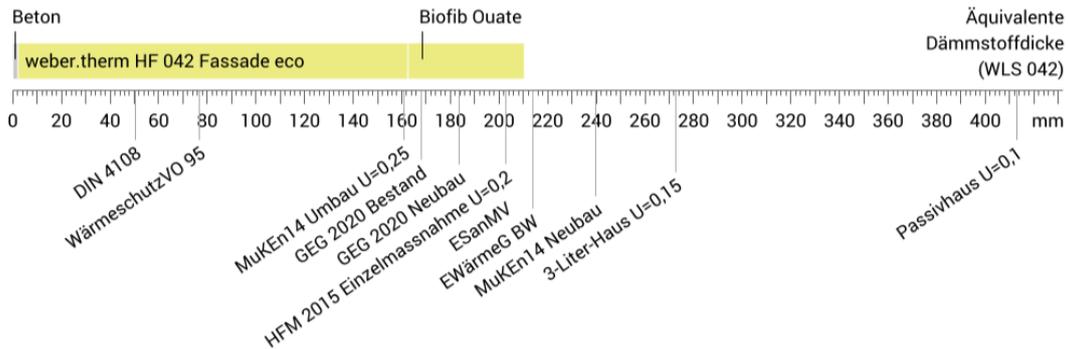
Temperaturamplitudendämpfung: >100
Phasenverschiebung: nicht relevant
Wärmekapazität innen: 235 kJ/m²K



- ① Beton (100 mm)
- ② weber.therm HF 042 Fassade eco (160 mm)
- ③ Biofib Ouate (45 mm)
- ④ HASIT SE 210 MINERAL Silikat-Strukturputz außen (10 mm)

Dämmwirkung einzelner Schichten und Vergleich mit Richtwerten

Für die folgende Abbildung wurden die Wärmedurchgangswiderstände (d.h. die Dämmwirkung) der einzelnen Schichten in Millimeter Dämmstoff umgerechnet. Die Skala bezieht sich auf einen Dämmstoff der Wärmeleitfähigkeit 0,042 W/mK.



Raumluft: 20,0°C / 50%
Außenluft: -5,0°C / 80%
Oberflächentemp.: 18,8°C / -4,8°C

sd-Wert: 8,8 m

Dicke: 31,5 cm
Gewicht: 289 kg/m²
Wärmekapazität: 278 kJ/m²K

Aussenwand_A_Stroh

Außenwand
erstellt am 22.12.2020

Wärmeschutz

$U = 0,21 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$

MuKEn14 Umbau*: $U < 0,25 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$

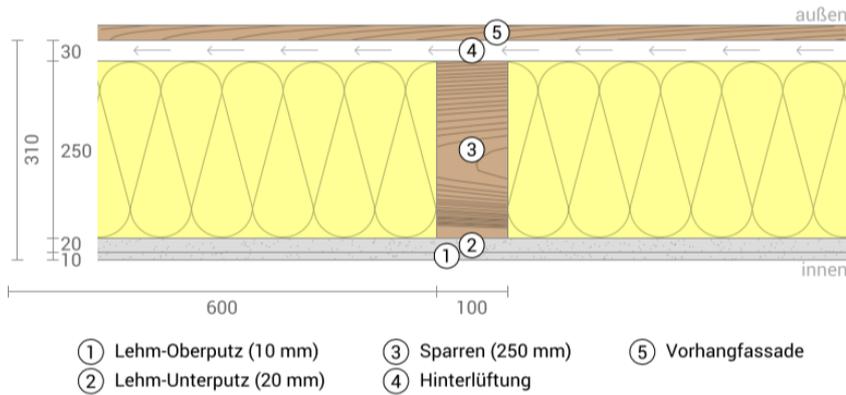


Feuchteschutz

Kein Tauwasser

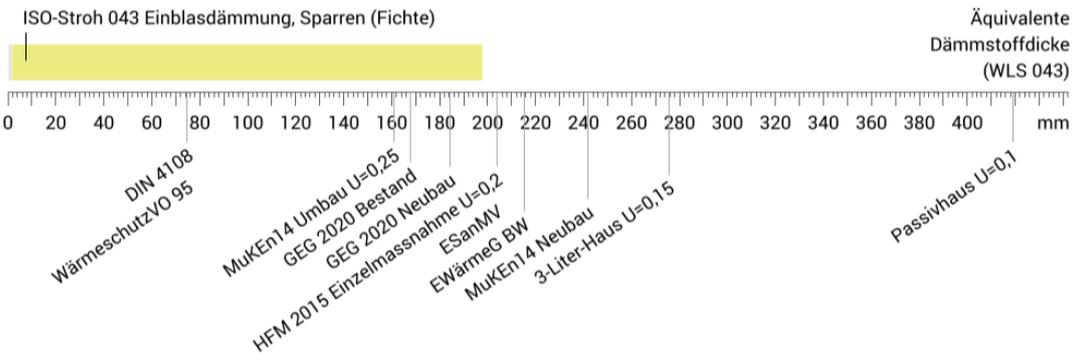
Hitzeschutz

Temperaturamplitudendämpfung: 88
Phasenverschiebung: 15,7 h
Wärmekapazität innen: 83 kJ/m²K



Dämmwirkung einzelner Schichten und Vergleich mit Richtwerten

Für die folgende Abbildung wurden die Wärmedurchgangswiderstände (d.h. die Dämmwirkung) der einzelnen Schichten in Millimeter Dämmstoff umgerechnet. Die Skala bezieht sich auf einen Dämmstoff der Wärmeleitfähigkeit 0,043 W/mK.



Raumluft: 20,0°C / 50%
Außenluft: -10,0°C / 80%
Oberflächentemp.: 17,8°C / -9,8°C

sd-Wert: 0,8 m

Dicke: 33,1 cm
Gewicht: 95 kg/m²
Wärmekapazität: 122 kJ/m²K

Anhang 2

Wichtige Zahlen und Daten für die LCA vom Food from Wood Projekt

Zusammengestellt von Pascal Herren, 24.04.2020, aktualisiert am 08.07.2020

Diese Zusammenstellung sollte als Ergänzung zur Semesterarbeit von Jan-Reto Ablanalp («Ökobilanz Speiseinsektenproduktion *Food from Wood*») verstanden werden.

Bemerkungen:

- In der Semesterarbeit sind wir noch davon ausgegangen, dass das Substrat zuerst mit Hilfe einer Maschine fermentiert werden muss. Dies haben wir jetzt widerlegen können. Das frische Substrat muss mind. während 2 Wochen und 26 °C fermentiert werden. Dabei wird auch Eigenwärme produziert, welche man allenfalls gerade für das Heizen der Masträume brauchen könnte.
- In der Semesterarbeit wurde dem Zerkleinern des Holzes viel Beachtung geschenkt. Wenn das Holz jedoch als Sägemehl gekauft wird, entfällt das Zerkleinern. Abfallsubstrat aus der Pilzproduktion müsste lediglich durch die Hammermühle gehen und nicht durch den Schneckenhäcksler.
- Ob die Beleuchtung während der Zucht nötig ist, bleibt unklar. Für die Mast ist sie nicht nötig.
- Die Mast beginnt wenn das zweite Larvenstadium erreicht ist.
- Daten zum Gasaustausch wurden im Rahmen dieses Projektes nicht erhoben. Daten von anderen Insektenarten finden sich in diesem Paper: (Ooninx et al. 2010)
- Weitere Literatur zu LCA: (Smetana et al. 2016; Halloran et al. 2016, 2017; Mertenat et al. 2019)

Allgemein

| | |
|-------------|--|
| Insektenart | <i>Trypoxylus dichotomus</i> (früher: <i>Allomyrina dichotomus</i>) |
|-------------|--|

Substratvorbereitung

| | |
|---|---|
| Optimale Temperatur für die Fermentation (°C) | 26 |
| Zusammensetzung Substrate | 30% Rohstoff, 5% Weizenkleie, 65% Wasser |
| Mögliche Rohstoffe | <ul style="list-style-type: none"> - Buche (<i>Fagus sylvatica</i>) - Eiche (<i>Quercus robur</i>) - Kiefer (<i>Pinus sylvestris</i>) - Abfallsubstrat aus der Shiitake-Produktion - Abfallsubstrat aus der Kräuterseitling-Produktion |
| Dauer Fermentation (Wochen) | 2 |

Mast

| | |
|--|------------------|
| Durchschnittsgewicht einer Puppe (g) | 15 |
| Durchschnittsgewicht einer Larve, wenn Maximalgewicht erreicht ist (g) | 21 |
| Substratverbrauch pro g Puppe in Trockenmasse (g) | Tbd ¹ |
| Benötigtes Volumen pro g Puppe (dm ³) | 0.1 |
| Anfallende Kotpellets pro g Puppe (g) | Tbd ¹ |
| Optimale Temperatur zur Entwicklung der Larven (°C) | Tbd ² |
| Dauer bis zur Verpuppung (Wochen) | 32 |

Zucht

| | |
|--|--|
| Anzahl Eier pro Weibchen | 100 (während durchschnittlich 5 Wochen gelegt) |
| Schlupfrate aus den Eiern (%) | 80 |
| Optimale Temperatur zum Schlupf der Eier (°C) | 32 |
| Optimale Temperatur zur Eiablage (°C) | 26 |
| Optimale Temperatur zur Verpaarung (°C) | 26 |
| Optimale Temperatur für Präoviposition (°C) | 26 |
| Dauer Präoviposition (Wochen) | 2 |
| Dauer Verpaarung (Wochen) | 1 |
| Dauer von Ei bis zur Mast (Wochen) | 4 |
| Volumen Eiablagesubstrat pro Weibchen (dm ³) | 7.5 |
| Gewicht Eiablagesubstrat pro Weibchen (g) | 1500 |
| Beleuchtung während Verpaarung und Eiablage | 12 h pro Tag |

¹Resultate aus Versuch 2.14

²Resultate aus Versuch 2.4

| Stadium | L3 | Prae-Puppe | Puppe | Adult | Ei – L2 |
|---------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|---------|
| Zeit (Wochen) | 32 | 1 | 3 | 8.5 | 4 |
| Anzahl | 2 (maennlich und weiblich) | 52 |
| Volumen (m ³) | 0.004 | 0.004 | 0.004 | 0.0055 | 0.001 |

- Ein Weibchen legt durchschnittlich 65 Eier in der Lebenszeit von durchschnittlich 8.5 Wochen, davon entwickeln sich durchschnittlich 80% zu L2 (=52)
- Das Verhaeltnis von weiblichen zu maennlichen Kaefern muss nicht 1:1 sein fuer die Zucht (6:1 reicht aus), hier nur der Einfachheit halber so dargestellt. Man weiss jedoch erst im Puppenstadium mit Sicherheit welches Geschlecht es ist.

Hier noch eine Bemerkung von Sheila:

Schätzungen:

Wir wissen aus Erfahrung dass 1l Substrat/Larve bis zur Verpuppung geht.

In den grossen Boxen der Erhaltungszucht (Fassungsvermögen 1/10 m³) haben wir 50 Larven, füllen die Box aber nur halb (d.h. 1l Substrat). Die Box wird jedoch 1 mal gesiebt und wieder mit frischem Substrat aufgefüllt → 1.5l Substrat/ Larve steht zur verfügung aber es wird nur ca. 750 g pelletiert (nicht gemessen!).

Viel mehr als diese 50 Larven pro 50l Substrat würden wir nicht empfehlen.

Für genauere Auswertungen läuft der Feed conversion rate Versuch, der aber aktuell nicht wirklich auswertbar aussieht (Pellets sind so verschimmelt, dass es schwer wird diese zu trennen, aber mal schauen). Deshalb haben wir jetzt noch ein paar Daten aus der nNachzucht aufgenommen, welche wir zwar aus wissenschaftlicher Sicht nicht publizieren können, weil zu ungenau, aber für unsere Erfahrungen helfen können.

Poster

Ökobilanzierung der Produktion von Trypoxylus dichotomus auf Holz-Basis

Ausgangslage

Das Forschungsprojekt «Food from Wood», erforscht ein Verfahren, um Insekten in der Schweiz nachhaltig zu züchten. Der Kernpunkt des Projekts besteht aus der Entwicklung eines Zuchtverfahrens, welches Holz als Futtermittel einsetzt, einen geringen energetischen Input, einen minimalen Personaleinsatz benötigt und keine Abfallprodukte generiert. Der Trypoxylus dichotomus stellte sich als die beste Art für dieses Zuchtverfahrens. Der Verkaufsprodukt sind die Puppen der Insekten.



Abbildung: Puppe des T. dichotomus

Ziele, Funktionelle Einheit und Methodik

Das Ziel dieser Arbeit ist die Bestimmung des Fussabdruckes des T. dichotomus mit drei Umweltauswirkungsmethoden, nämlich die IPCC 2013, Mök und PEF.

Für diese Arbeit wurden zwei Funktionelle Einheiten ausgewählt:

- 1 kg Puppen
- 1 kg Proteinen

Zur Bewertung des Fussabdruckes wurden das Forschungsszenario und zwei Zukunftsszenarien untersucht. Diese unterscheiden sich in Gross- und Kleinbetrieb. Für jede dieser Szenarien wurde eine Best- und Worst-Case Variante bestimmt, die sich an der Lieferdistanz der Rohstoffe und Heizmethode unterscheiden.

Wirkungsabschätzung und Auswertung

Der Grossbetrieb war hauptsächlich aufgrund der höheren Produktionsdichte effizienter als der Kleinbetrieb, und wies dadurch geringere Emissionen pro Funktionelle Einheit auf.

Die Verlängerung des Transportwegs zeigte sich als ein einflussreicher Faktor auf die Gesamtumweltbelastung. Die Herstellung und Entsorgung der Kisten hatte besonders mit der IPCC Methode einen wichtigen Einfluss auf das Endergebnis, wobei diese im Grossbetrieb fast bis zur Hälfte der Gesamtemissionen ausmachte.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass der T. dichotomus eine vielversprechende nachhaltige Proteinquelle darstellen kann.

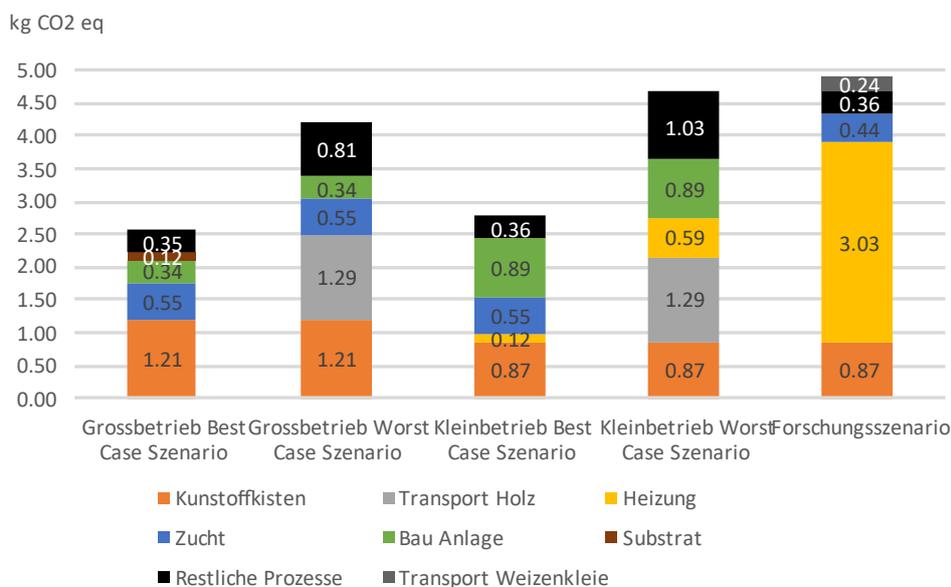


Abbildung: Vergleichende Graphik der untersuchten Szenarien mit der IPCC 2013 Methode. Die Werte sind in kg CO₂eq. ausgedrückt. Die Gesamtemissionen pro Variante sind, von links nach rechts: 2.57 kg CO₂eq., 4.19 kg CO₂eq., 2.79 kg CO₂eq., 4.66 kg CO₂eq. und 4.92 kg CO₂eq.

Bachelorarbeit, HS20, UI17
 Autor: Savian Scanu
scanusav@students.zhaw.ch
 12.02.2021

Erklärung betreffend das selbstständige Verfassen einer Bachelorarbeit im Departement Life Sciences und Facility Management

Mit der Abgabe dieser Bachelorarbeit versichert der/die Studierende, dass er/sie die Arbeit selbständig und ohne fremde Hilfe verfasst hat.

Der/die unterzeichnende Studierende erklärt, dass alle verwendeten Quellen (auch Internetseiten) im Text oder Anhang korrekt ausgewiesen sind, d.h. dass die Bachelorarbeit keine Plagiate enthält, also keine Teile, die teilweise oder vollständig aus einem fremden Text oder einer fremden Arbeit unter Vorgabe der eigenen Urheberschaft bzw. ohne Quellenangabe übernommen worden sind.

Bei Verfehlungen aller Art treten Paragraph 39 und Paragraph 40 der Rahmenprüfungsordnung für die Bachelor- und Masterstudiengänge an der Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften vom 29. Januar 2008 sowie die Bestimmungen der Disziplinarmaßnahmen der Hochschulordnung in Kraft.

Ort, Datum:

Wädenswil, 11.02.2014

