

# Ökobilanz zu Herstellung und Einsatz anthropogener Schwarzerde für Grünflächen, Stadtbäume und Landwirtschaft

## Masterarbeit

von

cand. M. Sc. Alexander Schneider

Institut für Katalyseforschung und -technologie,  
Thermochemische Umwandlung von Biomasse  
Fakultät für Chemieingenieurwesen und Verfahrenstechnik

**Erstgutachter:** Prof. Dr. Nicolaus Dahmen  
**Zweitgutachter:** Prof. Dr. Armin Grunwald  
**Betreuer:** Dipl.-Ing. Jens Buchgeister  
Dr. Armin Siepe  
Dipl.-Ing. Georg Blesinger

Karlsruhe, Juli 2022



# Kurzfassung

Die Arbeit umfasst die Erstellung einer Ökobilanz von der Herstellung bis zum Einsatz von anthropogener Schwarzerde in der Landwirtschaft und für Stadtbäume. Der Untersuchungsrahmen beinhaltet die Prozessschritte der *Biomasseerzeugung*, *Pyrolyse*, *Umwandlung zu Schwarzerde*, *Ausbringung* und *Nutzung*. Die Prozesskette wird in einer Übersichts-Grafik dargestellt (Kap. 3.1 Abb. 3.1). Die beiden Anwendungsbereiche „Einsatz von 16,5 Tonnen Trockenmasse auf einem Hektar Ackerfläche über drei Jahre in der Landwirtschaft“ (*funktionelle Einheit 1 (FU 1)*) und zur „Neupflanzung eines Stadtbäumens unter Verwendung von 2,25 m<sup>3</sup> Schwarzerde (entspricht 1080 kg) über drei Jahre“ (*FU 2*), werden in zwei getrennten Produktsystemen betrachtet. Ziel der Arbeit ist, die entlang der gesamten Prozesskette von der Herstellung bis zur Nutzung der Schwarzerde entstehenden, potenziellen Treibhausgas-Emissionen (THG-Emissionen) zu bestimmen, die wesentlich zur globalen anthropogenen Erderwärmung beitragen. Auf dieser Grundlage wird eine Aussage hinsichtlich der Anwendung von Schwarzerde als Negativ Emissions-Technologie (NET) getroffen.

Die Ergebnisse der Ökobilanz zeigen, dass durch die Anwendung von Schwarzerde mehr THG der Atmosphäre entnommen als emittiert werden. Für die Anwendung von Schwarzerde auf einem Hektar Ackerfläche über drei Jahre werden 2.389 kg CO<sub>2</sub> – Eq an THG der Atmosphäre entzogen. Dieser Wert kann durch die Berücksichtigung einer energetischen Gutschrift aus dem Pyrolyseprozess (Kap. 4.2) ansteigen, die je nach Energieform und Prozess in etwa zwischen 2.790 kg CO<sub>2</sub> – Eq und 7.883 kg CO<sub>2</sub> – Eq variieren kann. Für die Anwendung der Schwarzerde bei der Neupflanzung eines Stadtbäumens werden 639 kg CO<sub>2</sub> – Eq (bzw. mit Gutschrift in etwa zwischen 682 kg CO<sub>2</sub> – Eq und 1.229 kg CO<sub>2</sub> – Eq) an THG der Atmosphäre entzogen. Konkret bedeutet dies, dass die Anwendung von Schwarzerde für die beiden Produktsysteme (*FU 1* und *FU 2*) zur Reduktion von THG in der Atmosphäre beiträgt und damit als NET bezeichnet werden kann.

Innerhalb der Prozesskette werden THG beim Prozessschritt der *Biomasseerzeugung* durch die Photosynthese der Atmosphäre entzogen (d.h. CO<sub>2</sub>) und zu einem Großteil bei der *Umwandlung zu Schwarzerde* wieder emittiert (Kompostierung). Im Pyrolyseprozess wird ebenfalls ein Großteil der zuvor entnommenen (biogenen) THG emittiert. Darüber hinaus fallen beim Pyrolyseprozess weitere fossile THG-Emissionen an. Diese stehen größtenteils im Zusammenhang mit dem Bedarf an Strom zum Betrieb der Anlage.

Nach der Prüfung und Validierung sind die verwendeten Daten und Berechnungen zur Erstellung der Ökobilanz konservativ eingestuft, um die bestehenden Unsicherheiten in den Daten und bei Abschätzungen stets zu berücksichtigen. Die Ökobilanz betrachtet die Kohlenstoffspeicherung, die mit der Schwarzerde einhergeht und den stabilisierenden und THG-reduzierenden Effekt beim Abbau des organischen Materials. Diese Effekte stellen allerdings nur einen kleinen Auszug an Effekten der Schwarzerde dar. Weitere vorteilhafte Effekte, wie z.B. Verbesserung der Bodenfruchtbarkeit, der Ertragssteigerung, der Resistenz gegenüber Extremwetterereignissen (Starkregen, Trockenperioden etc.), der biophysikalischen Funktion und Biodiversität von

Ökosystemen etc., sind im Hinblick auf die THG-Emissionen aufgrund einer mangelnden Datenlage sowie Komplexität der zum Teil wechselwirkenden Effekte nicht umfassend berücksichtigt worden. Diese weisen auf ein zusätzliches Potenzial zur Steigerung der Entnahme von THG aus der Atmosphäre hin.

Neben dem Beitrag zur Erreichung der im Bundes-Klimaschutzgesetz verfassten nationalen Klimaschutzziele bringt die Schwarzerde zahlreiche weitere vorteilhafte Effekte mit sich, die den Einbezug weiterer Wirkungskategorien u.a. biologische Ressourcenerschöpfung, Human- und Ökotoxizität erfordert, um eine vollständige umweltbezogene Bewertung durchführen zu können. Erst durch diese erweiterte ökobilanzielle Untersuchung lassen sich die Beiträge der Schwarzerde hinsichtlich weiterer ernstzunehmender Problematiken, u.a. fortschreitende Bodendegradierung und Ernährungssouveränität, ermitteln. Die Arbeit stellt damit einen ersten Schritt für eine umfassendere Ermittlung zur Ökobilanz beim Einsatz von Schwarzerde insbesondere im Vergleich zur konventionellen Landwirtschaft dar.

# Abstract

The work includes the preparation of a life cycle assessment from the production to the use of anthropogenic dark earth in agriculture and for urban trees. The scope of the study includes the process steps of *biomass production*, *pyrolysis*, *conversion to dark earth*, *application* and *use*. The process chain is shown in an overview diagram (Chap. 3.1 Fig. 3.1). The two application cases „Use of 16.5 tonnes of dry mass of dark earth on one hectare of arable land over three years in agriculture“ (functional unit 1 (FU 1)) and for „New planting of an urban tree using 2.25 m<sup>3</sup> of dark earth (equivalent to 1080 kg) over three years“ (FU 2), are considered in two separate product systems. The aim of the work is to determine the potential greenhouse gas emissions (GHG emissions) along the entire process chain from the production to the use of the dark earth, which contribute significantly to anthropogenic global warming. On this basis, a statement is made regarding the use of dark earth as a negative emissions technology (NET).

The results of the LCA show that the application of dark earth removes more GHG from the atmosphere than it emits. For the application of dark earth on one hectare of arable land over three years, 2,389 kg CO<sub>2</sub> – Eq of GHG are removed from the atmosphere. This value can increase by taking into account an energy credit from the pyrolysis process (Chap. 4.2), which can vary between 2,790 kg CO<sub>2</sub> – Eq and 7,883 kg CO<sub>2</sub> – Eq depending on the energy form and process. For the application of dark earth in the planting of a new urban tree, 639 kg CO<sub>2</sub> – Eq (or with credit approximately between 682 kg CO<sub>2</sub> – Eq and 1,229 kg CO<sub>2</sub> – Eq) of GHG are removed from the atmosphere. This shows that the application of dark earth for the two product systems (FU 1 and FU 2) contributes to the reduction of GHG in the atmosphere and can thus be described as NET.

Within the process chain, GHG are removed from the atmosphere (i.e. CO<sub>2</sub>) during the process step of *biomass production* through photosynthesis and are emitted to a large extent during *conversion to dark earth* (composting). The pyrolysis process also contributes to a large part of the previously removed (biogenic) GHG. In addition, the pyrolysis process emits fossil GHG emissions. These are largely related to the electricity required for plant operation.

The verification and validation classify the data and calculations used for the preparation of the LCA as conservative in order to take into account the uncertainty in the data and estimations. The LCA considers the carbon sequestration, associated with the carbon content of the dark earth and the stabilising and GHG-reducing effect of the decomposition of the organic material. However, these effects represent only a small proportion of the effects of dark earth. Other beneficial effects, such as improvement of soil fertility, increased yields, resistance to extreme weather events (heavy rain, dry periods, etc.), the biophysical function and biodiversity of ecosystems, etc., have not been comprehensively considered with regard to GHG emissions due to a lack of data and the complexity of the partly interacting effects. These point to additional potential for increasing the removal of GHGs from the atmosphere.

In addition to its contribution to the achievement of the national climate protection goals set out in the Federal Climate Protection Act, dark earth has numerous other beneficial effects that re-

quire the inclusion of further impact categories, including biological resource depletion, human toxicity and ecotoxicity, to carry out a complete environmental assessment. Only through this extended environmental consideration can the contributions of the dark earth to other serious issues, including soil degradation and food sovereignty, be determined. The work thus represents a first step towards a more comprehensive assessment of the life cycle assessment of the use of dark earth, especially in comparison to conventional agriculture.

## Masterarbeit

für Herrn B.Sc. Alexander Schneider

Ökobilanz zur Herstellung und Einsatz anthropogener Schwarzerde für Grünflächen,  
Stadtbäume und Landwirtschaft

Ecological balance for the production and application of black earth on urban green areas,  
city trees and agricultural areas

Der Klimawandel führt in Deutschland zu immer häufigeren und längeren Trockenperioden, die sowohl für Grünflächen und Bäume im urbanen Raum als auch für landwirtschaftliche Flächen das Risiko erhöhen, die für den Pflanzenkreislauf notwendigen physikalischen und chemischen Bodeneigenschaften (Nährstoffverfügbarkeit, Wasseraufnahme- und Speicherfähigkeit etc.) zu verlieren. Um Pflanzen und Bäume davor zu schützen, kann anthropogen erzeugte Schwarzerde eingesetzt werden, um die Bodeneigenschaften zu verbessern und weitere positive Nebeneffekte auszulösen. Die Schwarzerde ist ein fruchtbares, anthropogenes Substrat, das sich aus den Bestandteilen Pflanzenkohle, die mittels Pyrolyse hergestellt wird, zugesetzten Mineralien, organischen Nährstoffen (Gülle, Mist, Kompost u.a.) und Mikroorganismen zusammensetzt.

Im Rahmen dieser Arbeit soll die gesamte Prozesskette von der Herstellung bis zum Einsatz der anthropogen erzeugten Schwarzerde auf verschiedenen Nutzflächen untersucht und auf Basis von Stoff- und Energiebilanzen der einzelnen Prozessschritte eine Ökobilanz erstellt und eine Bewertung hinsichtlich der Treibhausgasemissionen vorgenommen werden. Die Arbeit umfasst im Einzelnen:

- Einarbeitung in die Ökobilanz-Methodik, in die Software openLCA sowie die einzelnen Prozessschritte der Schwarzerde-Herstellung und -Aufbringung
- Auswertung vorhandener Literatur zu den eingesetzten Pyrolyseprozessen und deren Produkte sowie zu den Effekten beim Einsatz von Schwarzerde auf Grünflächen und landwirtschaftlichen Flächen und der Entwicklung des Bodens und darauf wachsender Nutzpflanzen z.B. bzgl. Treibhausgasemissionen, Erntemengen, Vitalität der Bäume, Biodiversität, Bodenparameter
- Erstellung eines Sachbilanzmodells auf Basis der Stoff- und Energiebilanzierung über den Gesamtprozess und die jeweilige Anwendung zur Reduktion der Treibhausgasemissionen über den gesamten Lebensweg der Schwarzerde
- Durchführung von Sensitivitätsanalysen
- Abschließende Diskussion der Ergebnisse und Dokumentation

Beginn der Arbeit: 15. Dezember 2021

Abgabe der Arbeit:

Aufgabensteller: Prof. Dr. Nikolaus Dahmen

Betreuer: Dipl.-Ing. Jens Buchgeister, ITAS

(Aufgabensteller)

---

## **Eidesstattliche Erklärung**

Hiermit versichere ich die vorliegende Arbeit selbstständig und nur mit den im Literaturverzeichnis angegebenen Quellen und Hilfsmitteln sowie den Informationen aus den Sitzungsprotokollen der wöchentlichen Betreuungsbesprechungen angefertigt zu haben.

Ich erkläre mich damit einverstanden, dass eine Kopie dieser Arbeit in die Bibliothek der Institute für Katalyseforschung und -technologie und für Technikfolgenabschätzung und Systemanalyse abgelegt werden darf.

Karlsruhe, Juli 2022

Unterschrift



# Danksagung

Zunächst möchte ich mich ganz herzlich bei Herrn Prof. Dr. Nicolaus Dahmen vom Institut für Katalysatorforschung und -technologie (IKFT) für die Übernahme der Erstbetreuung, und damit für die Möglichkeit diese Masterarbeit durchführen zu können, bedanken. Dies weiß ich gleichermaßen zu schätzen wie Rückmeldungen und Anregungen zur Richtungsvorgabe der Arbeit.

Des Weiteren bedanke ich mich bei Herrn Prof. Dr. Armin Grunwald für die Zweitbetreuung und die Möglichkeit die Masterarbeit am Institut für Technikfolgenabschätzung und Systemanalyse (ITAS) anfertigen zu dürfen.

Großer Dank gilt auch Herrn Dipl.-Ing. Georg Blesinger (Facility Management, KIT), der viele Anreize zur Gestaltung der Arbeit gab und stets für Rückfragen zur Verfügung stand.

Ganz herzlichem Dank bin ich Herrn Dr. Armin Siepe (Büro SchwarzErde) verpflichtet, der mit der eingebrachten Expertise zur Bodenkunde wesentlich zum Verständnis der etwas „fachfremden“ Schwarzerde und ihren Zusammenhängen beitrug. Für die vielen, verständlichen und sehr ausführlichen Erklärungen, die Bereitschaft für Rückfragen und die angenehmen Diskussionen möchte ich mich ebenfalls bedanken.

Besonderer Dank gilt Herrn Dipl.-Ing. Jens Buchgeister (ITAS) für die Möglichkeit der Bearbeitung des Themas, aber vor allem für die intensive Betreuung der Masterarbeit. Die ständige Bereitschaft für Nachfragen, die vielen Hilfestellungen und Erklärungen insbesondere zur Methode der Ökobilanz, die Anregungen und Hinweise zur Richtungsvorgabe aber auch das Entgegenkommen in einigen Punkten der Arbeit haben einen wichtigen Beitrag zu dieser Masterarbeit geleistet.

Beim gesamten Betreuerkreis möchte ich mich für die sehr angenehme Atmosphäre und die vielen produktiven Diskussionsrunden bedanken.

Weiterer Dank gilt den Unternehmen Biomacon, Pyreg, Regenis, Carbon Technik Schuster, AWS Freiburg, Finzelberg, Grossenbacher Grüngut, IWB, Carbo-FORCE, Kaskad-E und ProE Bioenergie, die durch das Bereitstellen von Daten zum Pyrolyseprozess einen wichtigen Beitrag für die Arbeit und zum Verständnis der Pyrolysetechnologie leisteten. Hervorzuheben sind Herr Philipp Reichardt der Firma Pyreg, Herr Nabil Linke der Firma Carbon Technik Schuster und Herr Philipp Vögelin der Firma IWB, die für wertvolle Gesprächsrunden und weitere Rückfragen zur Verfügung standen.

Ganz besonderer Dank gilt meinen Freunden und meiner Familie, mit ausdrücklicher Erwähnung meiner lieben Eltern, die mir während der Masterarbeit aber auch im gesamten Studium stets zur Seite standen und mich dabei unterstützt haben. Ausdrücklich möchte ich mich auch bei meinem lieben Bruder Matthias Schneider und meinem guten Freund Julian Schnitzius für das Korrektur-Lesen der Arbeit bedanken.

# Inhaltsverzeichnis

<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>xiii</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>xiv</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis</b>	<b>xvi</b>
<b>1. Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1. Motivation . . . . .	1
1.2. Zielsetzung der Arbeit . . . . .	4
<b>2. Grundlagen</b>	<b>5</b>
2.1. Klimaschutz und Klimaschutzpolitik . . . . .	5
2.2. Schwarzerde . . . . .	7
2.2.1. Natürliche und Anthropogene Schwarzerde . . . . .	7
2.2.2. Herstellung der Schwarzerde . . . . .	9
2.2.3. Pflanzenkohle . . . . .	11
2.2.3.1. Herstellung von Karbonisaten und Pflanzenkohle . . . . .	11
2.2.3.2. Pyrolyse . . . . .	14
2.2.4. Kompost . . . . .	16
2.2.4.1. Herstellung des Kompostes . . . . .	16
2.2.5. Anwendung und Wirkungen der Schwarzerde . . . . .	18
2.2.6. Rechtliche Anforderungen an die Herstellung, Produktqualität und Anwendung der Schwarzerde . . . . .	21
2.3. Die Methode der Ökobilanz . . . . .	23
2.3.1. Definition . . . . .	23
2.3.2. Methodischer Rahmen der Ökobilanz . . . . .	24
2.3.2.1. Zielsetzung und Festlegung des Untersuchungsrahmens . . . . .	24
2.3.2.2. Sachbilanz . . . . .	25
2.3.2.3. Wirkungsabschätzung . . . . .	26
2.3.2.4. Auswertung . . . . .	27
2.4. Wissensstand zur Ökobilanzierung der Schwarzerde . . . . .	27
<b>3. Erstellung der Ökobilanz</b>	<b>29</b>
3.1. Zielsetzung und Festlegung des Untersuchungsrahmens . . . . .	29
3.1.1. Zielsetzung . . . . .	29
3.1.2. Systemgrenze . . . . .	29

3.1.3. Funktionelle Einheiten . . . . .	31
3.2. Sachbilanz . . . . .	33
3.2.1. Datenerhebung . . . . .	33
3.2.2. Datenberechnung . . . . .	35
3.2.3. Allokation . . . . .	37
3.3. Prozessmodellierung in openLCA . . . . .	38
<b>4. Ergebnisse</b>	<b>41</b>
4.1. Wirkungsabschätzung . . . . .	41
4.2. Auswertung des Produktsystems der <i>FU 1</i> . . . . .	42
4.2.1. Identifizierung signifikanter Parameter des PS der <i>FU 1</i> . . . . .	46
4.2.2. Sensitivitätsanalyse des PS der <i>FU 1</i> . . . . .	47
4.3. Auswertung des PS der <i>FU 2</i> . . . . .	52
4.3.1. Identifizierung signifikanter Parameter des PS der <i>FU 2</i> . . . . .	54
4.3.2. Sensitivitätsanalyse des PS der <i>FU 2</i> . . . . .	55
4.4. Vollständigkeits- und Konsistenzprüfung . . . . .	56
4.5. Fehlerbetrachtung . . . . .	57
4.6. Diskussion und Empfehlungen . . . . .	59
<b>5. Zusammenfassung &amp; Ausblick</b>	<b>63</b>
<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>66</b>
<b>A. Anhang</b>	<b>74</b>
A.1. Rechtliche Vorgaben zu Schadstoffgehalten . . . . .	74
A.2. Erklärung zur ecoinvent-Datenbank . . . . .	75
A.3. Fragenkatalog . . . . .	76
A.4. Datenerhebung . . . . .	90
A.5. Datenberechnung . . . . .	96
A.5.1. Biomasseerzeugung . . . . .	96
A.5.2. Pyrolyseprozess - Pyreg . . . . .	97
A.5.3. Pyrolyseprozess - CT-Schuster . . . . .	107
A.5.4. Schwarzerdeherstellung . . . . .	111
A.5.5. Ausbringung . . . . .	116
A.5.6. Nutzung . . . . .	118
A.5.7. Transportprozesse . . . . .	119
A.5.8. Strommix Deutschland 2018 . . . . .	123

# Abbildungsverzeichnis

1.1. Die Änderung der globalen Oberflächentemperatur von 1850 bis 2020 [Masson-Delmotte et al., 2021]. . . . .	2
2.1. Bodenhorizonte im Amazonasgebiet [Glaser and Birk, 2012]. . . . .	8
2.2. Schwarzerde der Firma Sonnenerde GmbH. . . . .	10
2.3. Pflanzenkohle (a)) und ihre Herstellung b) im Kon-Tiki und c) in einer technisierten Pyrolyseanlage . . . . .	14
2.4. Der Kompostierungsprozess [Haug, 1993]. . . . .	17
2.5. Phasen einer Ökobilanz nach DIN ISO 14040. . . . .	24
3.1. Untersuchungsrahmen der Ökobilanz von der Herstellung bis zur Nutzung von Schwarzerde. . . . .	30
3.2. Modellierungssoftware <i>openLCA Version 1.10.3</i> . . . . .	39
3.3. Modellgraph in <i>openLCA</i> . . . . .	40
4.1. Beiträge der Prozessschritte an den THG-Emissionen mit und ohne Gutschrift für die beiden PS der <i>FU 1</i> . . . . .	44
4.2. Vergleich der Ergebnisse der beiden PS der <i>FU 1</i> mit dem PS aus Oldfield et al. [2018] . . . . .	45
4.3. Sensitivität des Pyreg-PS der <i>FU 1</i> in Bezug auf die THG-Emissionen des Prozesses <i>Photosynthese, Mischholz</i> . . . . .	48
4.4. Sensitivität des Pyreg-PS der <i>FU 1</i> in Bezug auf die THG-Emissionen beim Prozess der <i>Umwandlung zu Schwarzerde</i> . . . . .	49
4.5. Sensitivität des Pyreg-PS und des CTS-PS der <i>FU 1</i> in Bezug auf die THG-Emissionen im Zusammenhang mit dem Prozess der <i>Pyrolyse</i> , a) ohne Gutschrift und b) mit Gutschrift . . . . .	50
4.6. Sensitivität des Pyreg-PS der <i>FU 1</i> in Bezug auf die THG-Emissionen beim Prozess der <i>Nutzung</i> . . . . .	51
4.7. Sensitivität des Pyreg-PS und des CTS-PS der <i>FU 1</i> in Bezug auf die Gutschrift . . . . .	51
4.8. Beiträge der Prozessschritte an den THG-Emissionen mit und ohne Gutschrift für die beiden PS der <i>FU 2</i> . . . . .	53
A.1. Bereiche die von der ecoinvent-Datenbank abgedeckt werden [Hischier, 2011]. . . . .	76
A.2. Fragenkatalog - Pyreg . . . . .	77
A.3. Fragenkatalog - IWB . . . . .	81
A.4. Fragenkatalog - CT-Schuster . . . . .	85

# Tabellenverzeichnis

3.1. Sachbilanz: Prozess der Holz-Zerkleinerung und -Trocknung - Pyreg . . . . .	36
4.1. Charakterisierungsfaktoren des Erderwärmungspotenzials ausgewählter THG der Wirkungskategorie <i>Klimawandel</i> . . . . .	42
4.2. Beiträge der einzelnen Prozessschritte an den THG-Emissionen der zwei PS zur <i>FU 1</i> . . . . .	43
4.3. Prozessmodule mit nennenswertem Beitrag an den THG-Emissionen der beiden PS der <i>FU 1</i> . . . . .	46
4.4. Beiträge verschiedener THG an den THG-Emissionen ( <i>FU 1</i> ) . . . . .	47
4.5. Beiträge der einzelnen Prozessschritten an den THG-Emissionen der zwei PS zur <i>FU 2</i> . . . . .	53
4.6. Prozessmodule mit nennenswertem Beitrag an den THG-Emissionen der beiden PS der <i>FU 2</i> . . . . .	54
4.7. Beiträge verschiedener THG an den THG-Emissionen ( <i>FU 2</i> ) . . . . .	55
A.1. Rechtliche Vorgaben zu Schadstoffgehalten in der Schwarzerde bzw. im Boden .	74
A.2. Rohdaten-Sammlung . . . . .	90
A.3. Sachbilanz: Photosynthese (Buche und Fichte Mix) . . . . .	96
A.4. Sachbilanz: Rücken und Sammlung von Waldrestholz . . . . .	96
A.5. Sachbilanz: Speicherung von CO <sub>2</sub> durch Photosynthese in Obst und Gemüse (Bioabfall) . . . . .	97
A.6. Sachbilanz: Prozess der Holzzerkleinerung und -trocknung - Pyreg . . . . .	97
A.7. Sachbilanz: Herstellung Holz-Zerkleinerungs und -Trocknungsanlage - Pyreg . .	99
A.8. Sachbilanz: Herstellung Holz hackschnitzel-Trockner, Bandtrockner . . . . .	100
A.9. Sachbilanz: Pyrolyseprozess - Pyreg . . . . .	101
A.10.Sachbilanz: Pyreg PX1500-Anlage . . . . .	103
A.11.Sachbilanz: Reaktor-Modul . . . . .	104
A.12.Sachbilanz: Prozessgasfilter-Modul . . . . .	105
A.13.Sachbilanz: Ventilator-Modul . . . . .	106
A.14.Sachbilanz: Prozess der Holz-Zerkleinerung und -Trocknung - CT-Schuster . . .	107
A.15.Sachbilanz: Herstellung Holz-Zerkleinerungs und -Trocknungsanlage - CT-Schuster	108
A.16.Sachbilanz: Pyrolyseprozess - CT-Schuster . . . . .	109
A.17.Sachbilanz: Herstellung Pyrolyseanlage CTS40 - CT-Schuster . . . . .	110
A.18.Sachbilanz: Schwarzerdeherstellung für landw. Anwendung . . . . .	111
A.19.Sachbilanz: Schwarzerdeherstellung für städt. Anwendung . . . . .	114

A.20.Sachbilanz: Herstellung Kompostierungsanlage . . . . .	115
A.21.Sachbilanz: Ausbringung von Schwarzerde auf der landw. Anwendungsfläche mittels Düngestreuer und Pflügen . . . . .	116
A.22.Sachbilanz: Einsatz von Schwarzerde für Stadtbäume . . . . .	117
A.23.Sachbilanz: Effekte der Schwarzerde im landw. Boden . . . . .	118
A.24.Sachbilanz: Effekte der Schwarzerde im städt. Boden . . . . .	119
A.25.Sachbilanz: Transport Waldrestholz zur Pyrolyseanlage . . . . .	120
A.26.Sachbilanz: Transport Bioabfall zur Kompostierungsanlage . . . . .	120
A.27.Sachbilanz: Transport Grünschnitt zur Kompostierungsanlage . . . . .	120
A.28.Sachbilanz: Transport Pflanzenkohle zur Kompostierungsanlage und Befeuch- tung der Pflanzenkohle . . . . .	121
A.29.Sachbilanz: Transport Gesteinsmehl zur Kompostierungsanlage . . . . .	121
A.30.Sachbilanz: Transport Schwarzerde zum Kunden (Landwirtschaftliche Anwendung)	122
A.31.Sachbilanz: Transport Schwarzerde zum Kunden (Städtische Anwendung) . . . .	122
A.32.Sachbilanz: Deutschland Markt high Voltage (2030)(JB) . . . . .	123

# Abkürzungsverzeichnis

ADE	Anthropogenic Dark Earth
BBodSchG	Bundesbodenschutzgesetz
BECCS	Bioenergy with Carbon Capture and Storage
BiobAbfV	Bioabfallverordnung
BGBI	Bundesgesetzblatt
CCS	Carbon Capture and Storage
CDR	Carbon Dioxide Removal
CTS	CT-Schuster; Carbon Technik Schuster
DACCS	Direct Air Carbon Capture and Storage
DüMV	Düngemittelverordnung
EBC	European Biochar Certificate
EE	Erneuerbare Energien
FU	Functional Unit
GHG	Greenhouse Gas
GWP	Global Warming Potential
ILCD	International reference Life Cycle Data system
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
KSG	Klimaschutzgesetz
KW	Kohlenwasserstoffe
LCA	Life Cycle Assessment
NET	Negative Emissionen-Technologie
PAK	Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe
PCB	Polychlorierte Biphenyle
PET	Perfluorierte Tenside
PIK	Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung
PKK	Pflanzenkohle-Kompost
PS	Produktsystem
PyCCS	Pyrogenic Carbon Capture and Storage
THG	Treibhausgas
UNEP	United Nations Environmental Program
WMO	World Meteorological Organization

# 1. Einleitung

Diese Arbeit behandelt die Erstellung einer Ökobilanz zur Herstellung und Anwendung von anthropogener Schwarzerde. In der **Einleitung** werden die Beweggründe und die Ziele formuliert. Das Kapitel **2 Grundlagen** umfasst den Klimaschutz und die Klimaschutzpolitik, Ausführungen zur Schwarzerde, als Hauptuntersuchungsgegenstand dieser Arbeit, die Vorstellung der Methode der Ökobilanz und ein Überblick zum aktuellen Wissensstand zur Ökobilanz von Schwarzerde. Im Kap. **3 Erstellung der Ökobilanz** wird die ingenieurstechnische Kernaufgabe dieser Arbeit beschrieben. Neben der Beschreibung zur Vorgehensweise bei der Zielsetzung, der Festlegung des Untersuchungsrahmens und der Sachbilanz wird auch die Prozessmodellierung mit der *openLCA*-Software vorgestellt. Es folgt in Kap. 4 die Erläuterung der Wirkungsabschätzung und die Darstellung, Auswertung und Diskussion der **Ergebnisse**. Abschließend werden die **Zusammenfassung** der Arbeit und ein **Ausblick** formuliert.

## 1.1. Motivation

Die fortschreitende **globale Erderwärmung** (cp. Klimawandel) und ihre Auswirkungen auf Mensch und Umwelt sind heute mehr denn je zu beobachten. Die Erhöhung der mittleren globalen Oberflächentemperatur um 1,07 °C ist die Folge der unverminderten Emission von Treibhausgasen (THG) bzw. des Strahlungsantriebs der einzelnen THG (siehe Kap. 2.3.2.3) und gleichzeitig die Ursache weitreichender Folgen, wie dem Anstieg des mittleren Meeresspiegels um 0,2 m, dem Rückgang der Polarzone durch Verschiebung der Klimazonen polwärts und der Erwärmung der Ozeane [Masson-Delmotte et al., 2021]. Wie Abbildung 1.1 zeigt, sind die aufgezeichneten Verläufe der jährlichen mittleren globalen Oberflächentemperaturänderung mit dem Simulationsmodell für anthropogene (menschliche) und natürliche Einflüsse auf die Temperaturänderung in guter Näherung zueinander. Aus dem Verlauf des zusätzlichen Simulationsmodells für ausschließlich natürliche Einflüsse auf die Temperaturänderung geht der Einfluss des Menschen auf die zunehmende Oberflächentemperatur maßgebend hervor. Eine durch den Menschen verursachte globale Erderwärmung ist die logische Konsequenz dieser Erkenntnis [Masson-Delmotte et al., 2021].



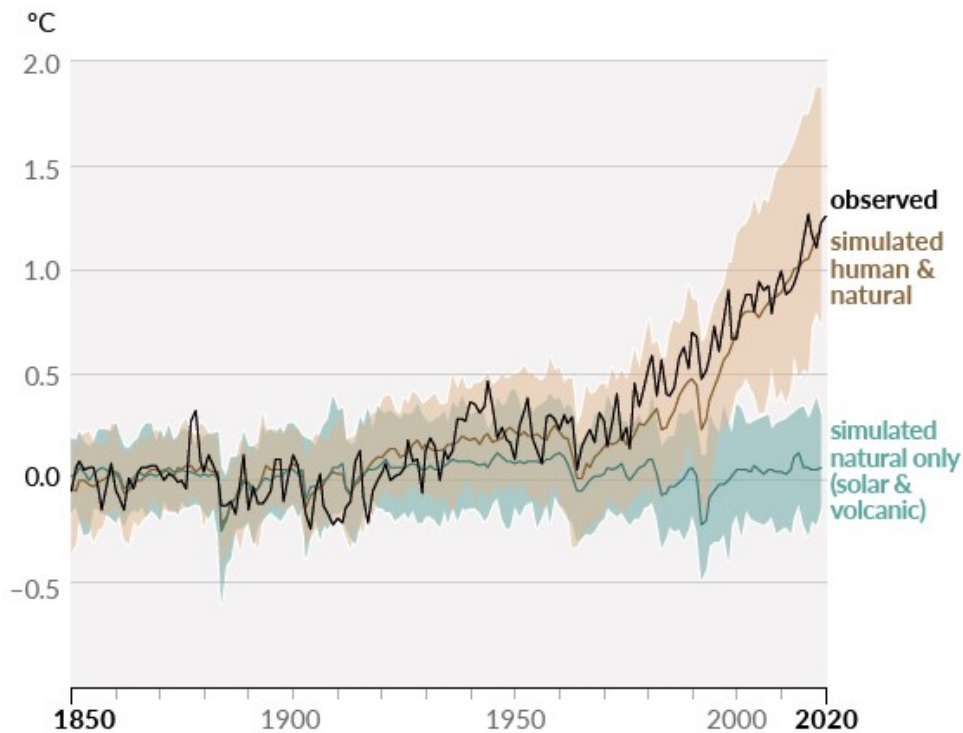


Abbildung 1.1.: Die Änderung der globalen Oberflächentemperatur von 1850 bis 2020 [Masson-Delmotte et al., 2021].

Die *schwarze* Linie stellt die beobachtete Änderung der globalen Oberflächentemperatur dar. Die simulierten Verläufe für anthropogene und natürliche Einflüsse sind in *Braun* und die für ausschließlich natürliche Einflüsse in *Grün* abgebildet.

Demnach sind die mit der globalen Erderwärmung einhergehenden wahrnehmbaren Auswirkungen, wie z. B.

- die zahlreicher und intensiver auftretenden Extremwetterereignisse (Starkregen und Überflutungen, Hitze- und Dürreperioden, Stürme etc.),
- der Rückgang von Gletschern,
- der Rückgang arktischer Eisflächen,
- die Zerstörung aquatischer und terrestrischer Ökosysteme,
- das Artensterben und
- der Verlust an Biodiversität

auf das Handeln des Menschen zurückzuführen [Masson-Delmotte et al., 2021], [Jane et al., 2021]. Diese Auswirkungen und die Tendenz dieser Problematik sind Warnsignale, die richtig interpretiert werden müssen und die das sofortige Ergreifen von Maßnahmen gegen diese Entwicklungen erfordern.

Neben der globalen Erderwärmung ist die fortschreitende **Bodendegradierung** eine Problematik, die großen Einfluss auf den Kohlenstoffkreislauf hat und ebenfalls im Sinne des Umweltschutzes Handlungsbedarf verlangt. Bodendegradierung bezeichnet das Verschwinden von Ökosystemdienstleistungen (Dienstleistungen biologischer Gemeinschaften und deren physischer Umwelt und Verlust von Artenvielfalt im Boden und ist durch sozioökonomische und politische Interessen bedingt [Lal et al., 2003], [Nkonya et al., 2016]. Dies äußert sich u.a durch Versiegelung, Verdichtung, reduzierte Wasserspeicher- und Infiltrationskapazität, Versteppung, Versauerung und Kontamination des Bodens als auch durch den Abbau von Humus (organischer Bodenkohlenstoff) und dem Rückgang der Biodiversität im Boden [Lal et al., 2003]. 80 % des am Kohlenstoffkreislauf teilnehmenden terrestrischen organischen Kohlenstoffs ist im Boden gebunden und nur 20 % in der Vegetation [Blume et al., 2010]. Dies hebt das enorme Potenzial zur Emission von THG hervor, die durch die Bodendegradierung ausgelöst werden können. Bodendegradierung tritt auf 30 % der globalen Landfläche (3,2 Milliarden Menschen betreffend) in signifikantem Ausmaß auf und wird größtenteils durch anthropogenes Handeln verursacht, wie z. B.

- Abholzung und Rodung von Wäldern,
- Gewinnung von Rohstoffen im Tagebau,
- exzessiven Fahrzeugverkehr,
- Deponie industrieller oder städtischer Abfälle,
- exzessive Bodenbearbeitung und Anwendung von anorganischen Düngern,
- mangelnde Rückführung/Anwendung organischer Materialien (Mulch etc.) und
- Bodenversiegelung, -verdichtung und Änderung der Bodenbedeckung [Nkonya et al., 2016].

Diese Einwirkungen beeinflussen den Boden, seine Funktionen und sein Gleichgewicht mit der Umwelt negativ. Das Bundesbodenschutzgesetz (BBodSchG, 25. Februar 2021) regelt alle Maßnahmen zum Schutz und Wiederaufbau der "natürlichen Funktionen des Bodens, als Lebensgrundlage und Lebensraum für Menschen, Tiere, Pflanzen und Bodenorganismen, als Bestandteil des Naturhaushaltes insbesondere mit seinen Wasser- und Nährstoffkreisläufen) und als Abbau-, Ausgleichs- und Aufbaumedium für stoffliche Einwirkungen aufgrund der Filter-, Puffer- und Stoffumwandlungseigenschaften". Der gegenläufige Trend der Verschlechterung des Bodens (Nutzbarkeit) und der gleichzeitig steigenden Ansprüche der wachsenden Menschheit an die Nahrung (steigender Fleischkonsum) und an Energieträger und Materialien auf Basis nachwachsender Rohstoffe öffnet ein starkes Spannungsfeld, das die Diskussion zur *Tank or Table*-Thematik (Tank oder Teller) und zur **Ernährungssouveränität**<sup>1</sup> anheizt [Quicker and

---

<sup>1</sup>Ernährungssouveränität ist ein Begriff aus der *La Via Campesina*-Bewegung (Verbund aus Kleinbauern und Landarbeitern) und beschreibt ein Konzept einer freien, solidarischen und nachhaltigen Lebensmittelversorgung. Mit der Forderung, sich von der privatisierten, intensiven und hoch mechanisierten Lebensmittelerzeugung zu lösen und ein dezentrales, wettbewerbsfreies und nachhaltiges System aufzubauen geht die Ernährungssouveränität weit über die klassische Ernährungssicherung hinaus [Anderson and Iqbal, 2018].

Weber, 2016].

## 1.2. Zielsetzung der Arbeit

Die fortschreitende globale Erderwärmung und die Bodendegradation erfordern offensichtlich ein sofortiges Handeln. Ein möglicher Lösungsansatz, der beide Problemfelder berücksichtigt, ist die Anwendung von anthropogener Schwarzerde. Schwarzerde ist ein dunkler, sehr fruchtbarer Bodentyp, der einen hohen Gehalt an Kohlenstoff aufweist (siehe Kapitel 2.2).

Eine Anwendung von anthropogener Schwarzerde kann u.a. zur Bodenverbesserung und zur langfristigen Speicherung von Kohlenstoff im Boden führen (s. Kap. 2.2.5). Positive Effekte können für besonders belastete Grünflächen und Bäume im urbanen Raum (Bodenverdichtung, Wasser- und Nährstoffhaushalt etc.) und für landwirtschaftlich genutzte Flächen (exzessive Bodenbearbeitung und Düngereinsatz etc.) vielversprechend sein. Um diesen positiven Nutzen mit den Aufwänden der Herstellung und der Anwendung der anthropogenen Schwarzerde abzuwägen, ist eine Untersuchung potenzieller Umweltbelastungen entlang der Wertschöpfungskette notwendig. Daher wird in dieser Arbeit, auf Basis von Stoff- und Energiebilanzen der einzelnen Prozessschritten (von der Herstellung bis zur Anwendung von anthropogener Schwarzerde für Stadtbäume und Landwirtschaft), eine Ökobilanz nach dem Lebenszyklusansatz erstellt und eine Bewertung der THG-Emissionen vorgenommen (s. Kap. 3). Auf Grundlage der Ergebnisse wird außerdem eine Empfehlung hinsichtlich einer Schwarzerde-Anwendung insbesondere als Negative Emissions-Technologie (NET) (s. Kap. 2.1) ausgesprochen. Weiter wird eine Sensitivitätsanalyse zur Bestimmung der Einflüsse einzelner Parameter auf die THG-Emissionen durchgeführt.

Die Arbeit verfolgt das Ziel, anhand der durch die Ökobilanz gewonnenen Erkenntnisse zu den THG-Emissionen im Zusammenhang mit der Herstellung und Anwendung von anthropogener Schwarzerde, eine Aussage zu treffen hinsichtlich der Nutzung von anthropogener Schwarzerde, als Möglichkeit zur Begrenzung der globalen Erderwärmung.

## 2. Grundlagen

Das Kap. *Grundlagen* beschreibt zunächst den derzeitigen Stand und politische und gesetzliche Vorgaben zum **Klimaschutz** (Kap. 2.1). Die Gründe zur Bedeutung und Relevanz des Themas sowie Maßnahmen und Ziele zum Klimaschutz werden herausgearbeitet. Wie der Boden mittels **Schwarzerde** (Kap. 2.2) zum Klima- und Umweltschutz beiträgt, gleichzeitig die Bodenqualität verbessert und die Ernährungssouveränität fördert, wird anschließend vorgestellt. Dabei werden insbesondere die Terminologie, Herstellung, Bestandteile und ihre Erzeugung, Anwendung, Wirkung und rechtliche Rahmenbedingungen betrachtet. Zur Bewertung der Umweltauswirkungen, die im Zusammenhang mit der Herstellung und Anwendung von Schwarzerde stehen, wird in Kap. 2.3 die Methode der **Ökobilanz** eingeführt. Hierbei werden Begriffsbezeichnungen, methodischer Rahmen und Vorgehensweise des Lebenszyklusansatzes aufgezeigt. Kap. 2.4 befasst sich mit dem aktuellen **Wissensstand** zur Ökobilanzierung von Schwarzerde und legt dar, welche Betrachtungen und Ergebnisse zur Herstellung und Anwendung von Schwarzerde bisher vorliegen.

### 2.1. Klimaschutz und Klimaschutzpolitik

Der IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change, Zwischenstaatlicher Ausschuss für Klimaänderung) bildet als Zusammenschluss aus Politik (UNEP, United Nations Environmental Program, Umweltprogramm der Vereinten Nationen) und Wissenschaft (WMO, World Meteorological Organization, Weltorganisation für Meteorologie) die wissenschaftliche Basis für die Diskussion zum internationalen Klimaschutz [IPCC, 2021].

Die IPCC-Berichte legen dar, dass die Anstrengungen zur Beschränkung der globalen Erderwärmung um 1,5 °C ( „deutlich unter 2 °C “) nach dem Pariser Klimaschutzabkommen (2015) nur durch drastische Maßnahmen zur Reduzierung der globalen THG-Emissionen realisiert und damit die weitreichenden Folgen einer Überschreitung dieser Grenze verhindert werden können [Masson-Delmotte et al., 2018]. Längst scheint dieses Ziel durch unverminderte Freisetzung von THG als überholt [Masson-Delmotte et al., 2021], weshalb bereits der Zielwert 2 °C Erderwärmung im Vergleich zum vorindustriellen Zeitalter in den Blick rückt [Schmidt and Hagemann, 2021]. Dies unterstreicht die Notwendigkeit eines schnellen aber vorausschauenden Handelns zur Vermeidung von THG-Emissionen, das idealerweise global geplant und umgesetzt wird. Denn eine sonst mögliche Verlagerung von THG-Emissionen außerhalb nationaler

Bilanzgrenzen würde keine Verbesserung bewirken, sondern zum *Greenwashing*<sup>1</sup> einzelner Staaten führen.

In Deutschland beteiligt sich insbesondere das Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung (PIK) an den wissenschaftlichen Arbeiten zum Klimawandel auf internationaler Ebene (u.a. IPCC). Darüber hinaus wirkt das PIK als Bestandteil verschiedener Expertenräte für Klima- und Umweltschutz auf die Politik, Wirtschaft und Gesellschaft in Deutschland ein und hat damit substantziellen Anteil an den nationalen Vorgaben und Zielen, die im Bundes-Klimaschutzgesetz (KSG, vom 18. August 2021 (BGBl. I S. 3905)) verankert sind.

Das legt vor, dass die anthropogenen THG-Emissionen bis 2030 um 65 % und bis 2040 um 88 % im Vergleich zum Jahr 1990 reduziert werden sollen. Weiter sollen für das Jahr 2045 eine Netto-Treibhausgasneutralität (Summe der emittierten THG-Emissionen ist gleich der Summe der aus der Atmosphäre gebundenen THG-Emissionen) und nach 2050 negative THG-Emissionen erreicht werden. Um die formulierten Ziele realisieren zu können, sind nicht nur die Reduktion von THG-Emissionen durch effizientere und nachhaltigere Prozesse notwendig, sondern auch negative Emissionen zur aktiven Entnahme von THG aus der Atmosphäre, um die THG-Konzentration dauerhaft zu senken [Masson-Delmotte et al., 2018]. Im IPCC-Sonderbericht von 2018 [Masson-Delmotte et al., 2018] werden dazu folgende Möglichkeiten aufgeführt, sie werden als *carbon dioxide removal* (CDR, Kohlenstoffdioxid-Entnahme) bezeichnet:

- Aufforstung (Neuentwicklung von Wald) und Wiederaufforstung (Wiederherstellung von Wald),
- Renaturierung,
- Sequestrierung von Bodenkohlenstoff,
- Direct Air Carbon Capture and Storage (DACCS),
- Enhanced Weathering (Turbo-Verwitterung [Claußen et al., 2010]) und Ocean Alkalinization (Alkalisierung des Ozeans),
- Energetische Nutzung von Biomasse mit CO<sub>2</sub>-Abscheidung und -speicherung (Bioenergy with Carbon Capture and Storage (BECCS)).

Beim DACCS-Verfahren wird das in der Luft enthaltene CO<sub>2</sub> chemisch oder elektrochemisch entnommen und anschließend gespeichert [Keller et al., 2018]. Die Methode der Turbo-Verwitterung beschreibt die CO<sub>2</sub>-Entnahme mittels chemischer Bindung durch beschleunigtes Verwittern von Gesteinen und bei der Alkalisierung wird die verbesserte Löslichkeit von CO<sub>2</sub> in Wasser mit höherem pH-Wert (alkalisch) ausgenutzt [Keller et al., 2018]. BECCS-Verfahren umfassen die Brennstoffherstellung auf Basis von Biomasse, sowie die Abscheidung und Speicherung des bei der Verbrennung dieser Brennstoffe emittierten CO<sub>2</sub> [Keller et al., 2018]. Eine weitere Möglichkeit zur Entnahme von CO<sub>2</sub> aus der Atmosphäre stellt das PyCCS-Verfahren

---

<sup>1</sup>Greenwashing - Umweltfreundliche Darstellung eines Unternehmens oder einer Institution, die nicht auf aktiven Maßnahmen für den Umweltschutz basiert, sondern auf Methoden zur unbegründet positiven Außendarstellung.

(Pyrogene CO<sub>2</sub>-Abscheidung und -Speicherung) dar [Werner et al., 2018], [Keller et al., 2018], [Schmidt and Hagemann, 2021]. Als Schnittstelle zwischen der Sequestrierung von Bodenkohlenstoff und dem BECCS-Verfahren kann hierbei ein Großteil des in der Biomasse enthaltenen Kohlenstoffs langfristig gespeichert werden und darüber hinaus bei bodenbezogener Anwendung die Pflanzenproduktivität gesteigert, das organische Bodenmaterial stabilisiert und dadurch die Bodenkohlenstoffgehalte erhöht werden [Keller et al., 2018], [Shackley et al., 2016]. Pyrogener Kohlenstoff ist Bestandteil von Schwarzerde, dessen Herstellung und Einsatz ein zentrales Thema dieser Arbeit darstellt. Aus diesem Grund werden Erklärungen zu pyrogenem Kohlenstoff und seiner Herstellung im folgenden Kap. **2.2 Schwarzerde** aufgeführt.

## 2.2. Schwarzerde

Dieses Kap. beschäftigt sich mit der Schwarzerde, dem Untersuchungsgegenstand dieser Arbeit. Es werden einleitende Erklärungen zur Schwarzerde die Terminologie und Definitionen vorgestellt sowie die Entstehung oder Herstellung von Schwarzerde und ihrer Komponenten erläutert.

### 2.2.1. Natürliche und Anthropogene Schwarzerde

Als Schwarzerde wird ein dunkler, sehr fruchtbarer Boden bezeichnet, der neben hohen Gehalten an organischem Material und Nährstoffen auch Anteile an pyrogenem Kohlenstoff aufweist. Seine schwarze Farbe ist für die Namensgebung der Schwarzerde verantwortlich [Sombroek et al., 2002]. Pyrogener Kohlenstoff (altgriechisch *πυρ pyr* 'Feuer') entsteht durch thermochemische Umwandlung von organischen Stoffen und weist hohe Anteile an Kohlenstoff in Form stabiler Verbindungen auf [Blume et al., 2010]. Pyrogener Kohlenstoff kann als Rückstand einer unvollständigen Verbrennung entweder durch natürliche Ereignisse wie Waldbrände oder nach Vulkanausbrüchen oder durch menschliche (anthropogene) Eingriffe entstehen [Kammann et al., 2016]. Die kontrollierte Herstellung pyrogenen Kohlenstoffs wird in Kap. 2.2.3 **Pflanzenkohle** näher beschrieben.

Eine bekannte anthropogene Schwarzerde ist die *Terra Preta (de Índio)*, die als Relikt indigener prä-kolumbischer Völker besonders im Amazonasgebiet vorzufinden ist [Sombroek et al., 2002]. Durch Kombination von anorganischen (z. B. Asche, Mineralien) und organischen Stoffen (Biomasse-Abfälle, Knochen, Mist, Exkrememente, Urin und Pflanzenkohle), die mikrobiell verstoffwechselt und durch Humifizierung stabilisiert wurden, Nährstoffe angereichert und gespeichert haben, war eine nachhaltige Bewirtschaftung der, tropische Regenwälder charakterisierenden, stark verwitterten und sehr nährstoffarmen Böden, möglich [Glaser and Birk, 2012].

Abb. 2.1 zeigt die Horizonte zweier Böden in den Tropen. Im linken Bild ist ein *Ferralsol*, ein typischer Bodenhorizont der Tropen abgebildet, im rechten Bild die *Terra Preta* und ihre mächtige Humusschicht, die durch die dunkle Farbe des pyrogenen Kohlenstoffs charakterisiert wird [Glaser and Birk, 2012].



Abbildung 2.1.: Bodenhorizonte im Amazonasgebiet [Glaser and Birk, 2012].  
Links: Typischer Horizont eines stark verwitterten Bodens in den Tropen (*Ferralsol*). Rechts:  
Bodenhorizont der *Terra Preta*.

Chernozem (russ. *chernij zemlja*, Schwarzerde) ist die Bezeichnung einer weiteren Schwarzerde, die in Mittel-Europa u.a. in Deutschland in der Hildesheimer und Magdeburger Börde auftritt [Quicker and Weber, 2016], [Blume et al., 2010]. Aufgrund hoher Gehalte an Humus und pflanzenverfügbaren Mikronährstoffen sowie der großporigen Struktur des Oberbodens ist der Chernozem für das Wachstum und die Resistenz von Pflanzen besonders geeignet [Blume et al., 2010]. Chernozem entstand auf natürliche Weise in Steppen mit Sommertrockenheit, wo durch Steppenbrände (grasbasierte) Pflanzenkohle und Asche gebildet wurden [Quicker and Weber, 2016]. Zwar wurde früher eine auch anthropogene Entstehung dieser Schwarzerde in Deutschland bezweifelt [Altermann et al., 2005], in späteren Arbeiten konnte der Einfluss des Menschen auf die Chernozem-Herstellung aber nachgewiesen werden (u.a. Eckmeier et al. [2007]).

Da in dieser Arbeit die Prozesskette der Herstellung von Schwarzerde durch den Menschen betrachtet wird, ist im Folgenden mit der Bezeichnung Schwarzerde stets die anthropogene Schwarzerde gemeint.

Aufgrund der verschiedenen Bestandteile der Schwarzerde und der sich daraus ergebenden Vielzahl an Möglichkeiten zur Entstehung, wird im folgenden Kap. die Herstellung von Schwarzer-

de genauer behandelt.

### 2.2.2. Herstellung der Schwarzerde

Anthropogene Schwarzerde entsteht durch die Kombination von anorganischen und organischen Stoffen. Asche, Mineralien und Gesteinsmehl sind anorganische Stoffe und weisen im Vergleich zu organischen Stoffen, wie Grünschnitt, Exkrementen, Mist, Gärreste, Humus, Kompost und Pflanzenkohle, keine oder geringe Anteile an organischer Substanz (Kohlenwasserstoffe (KW)) auf [Glaser and Birk, 2012], [Glaser et al., 2001].

Für die Kombination und Stabilisierung dieser Ausgangsmaterialien sind biochemische und mikrobielle Prozesse bei Kompostierung und Bodenbildung verantwortlich [Glaser and Birk, 2012]. Durch Humifizierung und Komplexbildung der organischen und anorganischen Bestandteile entsteht die weitgehend stabile Schwarzerde.

Pflanzenkohle ist ein Feststoffprodukt bei der Pyrolyse von Biomasse (s. Kap. 2.2.3.2). Sie kann vor, während oder nach der Kompostierung zugesetzt werden, wodurch Pflanzenkohle-Kompost (PKK) entsteht. Da u.a. nach Schmidt [2011b] die Pflanzenkohle möglichst schon vor der Anwendung im Boden mit Nährstoffen und Wasser aufgeladen, mit Mikroorganismen besiedelt und durch Oxidation gealtert werden soll, ist eine Zugabe der Pflanzenkohle zu Beginn oder während der Kompostierung empfehlenswert. Bestätigt wird diese Empfehlung durch einen um 30 % reduzierten Stickstoffverlust und die Emissionsminderung des klimarelevanten THG  $N_2O$  um 66 % durch Zugabe von Pflanzenkohle bei der Kompostierung [Zhao et al., 2020].

Ähnlich der Pflanzenkohle können die anorganischen Stoffe zu verschiedenen Zeitpunkten hinzugegeben werden. Während Gesteinsmehl üblicherweise vor der Kompostierung zugemischt wird, werden bspw. Tonscherben, Lehm und Sand erst im Anschluss daran zugegeben [Shackley et al., 2016]. Die Zugabe u.a. dieser mineralischen Bestandteile, die in Analysen der *Terra Preta* identifiziert wurden [Glaser and Birk, 2012], wird auch als Prozess der Erdenherstellung bezeichnet und dient primär zur Steuerung der physikalischen Eigenschaften des Substrates. Je nach Boden, auf dem das Substrat appliziert werden soll, ist dieser Prozessschritt nicht zwangsläufig notwendig. So ist bei schweren Lehmböden mit hohem Feinanteil die Anwendung von PKK ohne Zusatz von Tonscherben, Lehm etc. möglich, wohingegen ein Zusatz für die Applikation auf leichten Sandböden zu empfehlen ist, um mineralisch-organische Pflanzenkohle-Komplexe zu bilden. Diese sind maßgeblich für die hohe Nährstoffspeicherkapazität und den hohen Gehalt an organischer Substanz im Boden verantwortlich [Glaser et al., 2001], [Shackley et al., 2016]. Durch eine regelmäßige Anwendung dieser PKK-Substrate und ihrer spezifischen Eigenschaften kann sich der vorliegende Bodentyp über mehrere Jahre zu einer Schwarzerde entwickeln.

Ein Beispiel für ein solches PKK-Substrat ist die *Riedlingsdorfer Schwarzerde* der Firma *Sonnenerde GmbH* (Abb. 2.2). Dabei wird zunächst Pflanzenkohle und Steinmehl co-kompostiert





Abbildung 2.2.: Schwarzerde der Firma Sonnenerde GmbH.

und durch eine gestaffelte Zugabe von Mineralien wie Sand, Lehm, Ziegelsplitt und Hornspänen Schwarzerde hergestellt [Dunst, o.J.].

Es existieren weitere Methoden zur Herstellung einer Schwarzerde, wie bspw. das direkte Aufbringen aufgeladener Pflanzenkohle (z. B. mit Urin abgelöscht/gequencht) in die Nutzfläche, wo anschließend aus einer Kombination aus Ernteresten, bodenstämmigen Mikroorganismen und Pflanzenkohle eine Schwarzerde entstehen kann [Schmidt et al., 2017]. Angesichts der vielfältigen Möglichkeiten zur Herstellung von Schwarzerden, wird in der vorliegenden Arbeit nur die Herstellung über den Kompostierungsprozess berücksichtigt.

Aufgrund der vielen Vorstufen bei der Herstellung einer Schwarzerde und der damit einhergehenden Vielzahl an Begriffsbezeichnungen (Schwarzerde [Wiedner et al., 2015], Pflanzenkohle-Substrat [Schmidt et al., 2014b], Pflanzenkohle-Kompost [Agegnehu et al., 2017], aufgeladene Pflanzenkohle [Chia et al., 2014] etc.), wird für diese Arbeit eine klar definierte Terminologie verwendet. *Fertige Schwarzerde* ist die Bezeichnung für einen anthropogenen Boden, in den das zuvor hergestellte PKK-Substrat eingearbeitet wurde und natürliche Vorgänge, wie z. B. eine Durchmischung und Stabilisierung, bereits stattgefunden haben. Zur Vereinfachung soll der Begriff *Schwarzerde* dagegen all jene Substrate umfassen, die neben Pflanzenkohle auch Kompost-Anteile aufweisen, ohne dies weiter zu spezifizieren. Somit steht *Schwarzerde* in dieser Arbeit stellvertretend für alle Vorstufen der fertigen (anthropogenen) Schwarzerde, die in der Prozesskette der Herstellung von Schwarzerde betrachtet werden.

Als wichtiger Bestandteil von Schwarzerde wird die Pflanzenkohle und ihre Herstellung im Fol-

genden näher erläutert.

### 2.2.3. Pflanzenkohle

Pflanzenkohle, Biokohle und Holzkohle sind Produkte der thermochemischen Umwandlung von Biomasse, die durch einen Großteil an pyrogenem Kohlenstoff charakterisiert sind und somit auch allgemein als Biomassekarbonisate bezeichnet werden [Quicker and Weber, 2016]. Infolge z.T. fehlender Standardisierung werden diese Kohlen in der Literatur oft nicht voneinander abgegrenzt und die Begriffe oft nicht einheitlich verwendet [Quicker and Weber, 2016].

Pflanzenkohle wird im Europäischen Pflanzenkohle-Zertifikat (European Biochar Certificate (EBC)) definiert als "poröses, kohlenstoffhaltiges Material, das durch Pyrolyse aus klar definierten, pflanzlichen Biomassen hergestellt und so angewendet wird, dass der enthaltene Kohlenstoff langfristig und klimarelevant als C-Senke gespeichert bleibt oder in industriellen Fertigungsprozessen fossilen Kohlenstoff ersetzt [Schmidt et al., 2016]. Damit ist Pflanzenkohle von anderen Biomassekarbonaten dahingehend zu unterscheiden, dass sie ausschließlich für eine stoffliche Nutzung vorgesehen ist [Quicker and Weber, 2016]. Der stoffliche Einsatz zu Bodenzwecken u.a. in der Landwirtschaft knüpft nach dem EBC verschiedene Bedingungen an die Produktion und Qualität der Pflanzenkohle [Schmidt et al., 2021b]. Rechtliche Anforderungen und Bestimmungen für den landwirtschaftlichen Einsatz werden in Kap. 2.2.6 thematisiert. Das folgende Kap. beschreibt die Produktion von Pflanzenkohle, die verschiedenen Möglichkeiten zur Herstellung und die dabei herrschenden Prozessbedingungen.

#### 2.2.3.1. Herstellung von Karbonisaten und Pflanzenkohle

Kohlen werden durch Verkohlungsprozesse gebildet. Anthropogene Verkohlungsprozesse sind: [Cha et al., 2016], [Quicker and Weber, 2016]

- die Torrefizierung,
- die hydrothermale Karbonisierung,
- die Pyrolyse und
- die Vergasung.

Die **Torrefizierung** ist eine milde Form der Pyrolyse und läuft typischerweise im Bereich von 230 bis 290 °C und in einer sauerstoffreduzierten oder sauerstofffreien Atmosphäre ab [Quicker and Weber, 2016]. Ein Verlust der flüchtigsten Komponenten sowie ein Teilabbau verschiedener Bestandteile wie z. B. Hemicellulose und Cellulose ist die Folge [Quicker and Weber, 2016].

Die **hydrothermale Karbonisierung** orientiert sich am natürlichen Inkohlungsprozess von Biomasse und findet in Anwesenheit von Wasser bei niedrigen Temperaturen (180 bis 240 °C) und bei erhöhtem Druck (15 bis 60 bar) [Quicker and Weber, 2016] statt. Es entsteht eine Feststoffsuspension, die im Gegensatz zum Einsatzstoff eine verbesserte Entwässerbarkeit sowie eine

höhere Energiedichte aufweist. Da es sich bei den Produkten dieser beiden Verkohlungsprozesse nach den Bestimmungen des EBC-Zertifikats nicht um Pflanzenkohle handelt, werden die Torrefizierung und die hydrothermale Karbonisierung nicht weiter aufgeführt und betrachtet [Schmidt et al., 2016].

Die **Pyrolyse** ist ein thermochemischer Prozess, bei dem der Einsatzstoff in sauerstofffreier oder stark sauerstoffreduzierten Atmosphäre und bei Temperaturen von etwa 300 bis 900 °C umgesetzt wird [Cha et al., 2016]. Dabei wird einerseits Pyrolysekohle (oder Pyrolysekoks) gebildet, die bei geeigneter Prozessführung auch als Pflanzenkohle bezeichnet werden kann (EBC-Zertifikat). Gleichzeitig entsteht eine Gasphase, die sich aus nicht-kondensierbaren und kondensierbaren Gasen zusammensetzt. Die nicht-kondensierbaren Gase werden auch als Pyrolysegas bezeichnet, während die kondensierten Gase eine flüssige Phase bilden, die wiederum in eine wässrige und teerige/ölige Phase (Pyrolyseöl) unterteilt wird [Quicker and Weber, 2016]. Weitere Ausführungen zur Pyrolyse werden in Kap. 2.2.3.2 beschrieben.

Bei der **Vergasung** wird das Ziel verfolgt, eine möglichst hohe Gasausbeute zu erreichen. Dazu wird der Einsatzstoff zunächst in einem Pyrolysereaktor entgast und die dabei entstehende gasförmige und feste Phase in den Vergasungsreaktor geleitet, wo unter Zugabe eines Vergasungsmittels (Luft, Sauerstoff, Wasserdampf) bei für gewöhnlich hohen Temperaturen (> 600 °C) eine partielle Oxidation abläuft (d.h. es wird eine geringe Menge an Vergasungsmittel hinzugegeben, sodass nur ein Bruchteil der Pyrolyseprodukte oxidiert wird) [Quicker and Weber, 2016]. Neben dem angestrebten Produktgas (u.a.  $H_2$ ,  $CO$ ,  $CO_2$ ,  $H_2O$ ) entsteht dabei ein fester Vergasungsrückstand, auch Vergaserkoks genannt, der aufgrund seines hohen Inertierungsgrades hohe Konzentrationen an polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffen (PAK) und Schwermetallen aufweisen kann und damit für eine landwirtschaftliche Anwendung gesetzlich zu prüfen ist [Quicker and Weber, 2016]. Wird die Vergasung allerdings hinsichtlich einer Pflanzenkohle-Herstellung optimiert, sodass die Anforderungen an die Produktqualität nach den EBC-Richtlinien erfüllt sind, kann das entstandene Karbonisat als Pflanzenkohle bezeichnet und verwendet werden.

Bei der klassischen **Verbrennung** handelt es sich wie bei den zuvor beschriebenen Prozessen um eine thermochemische Umwandlung des Einsatzstoffes bei Temperaturen > 700 °C, mit dem Unterschied, dass hier ausreichend Oxidationsmittel (Luft, Sauerstoff) hinzugegeben wird, um eine vollständige Oxidation des Einsatzstoffes zu erzielen [Quicker and Weber, 2016]. Da außer Wärme nur noch Asche als Nebenprodukt entsteht, eignet sich die klassische Verbrennung nicht zur Herstellung von Pflanzenkohle und wird demnach nicht weiter betrachtet.

Die systematische Herstellung von Kohlen, das simple Löschen eines Lager- oder Holzfeuers mit Sand oder Wasser nicht impliziert, begann mit Verkohlungsprozessen in Gruben bereits in der Jungsteinzeit ab etwa 5.500 v.Chr. [Eckmeier et al., 2007] und fand später (Eisenzeit, ca. 800 v.Chr.) auch in Meilern statt [Quicker and Weber, 2016], [Schmidt, 2011a]. Beide Methoden bildeten die Grundlage für die Köhlerei, die bis zur industriellen Revolution im 19. Jahrhundert Anwendung fand und infolge erhöhter Nachfrage nach Kohle durch die reichlich verfügbare Steinkohle ersetzt wurde [Quicker and Weber, 2016]. Aufgrund der Freisetzung unverbrannter

Pyrolysegase und weiterer Schadstoffe und der damit einhergehenden Umweltbelastung ist der Köhlereiprozess in Deutschland heute nur mit Sondergenehmigung zugelassen [Quicker and Weber, 2016]. Deshalb wurden Methoden entwickelt, die deutlich umweltverträglicher sind und gleichzeitig Kohlen erzeugen, die die Qualitätsanforderungen einer Pflanzenkohle erfüllen.

Die Kon-Tiki Methode von Schmidt et al. [2014a], die lediglich aus einem nach oben geöffneten konischen Stahlbehälter besteht, ist eine sehr einfache Methode zur Herstellung von Pflanzenkohle (s. Abb. 2.3b)). Nach dem Anheizen des Behälters wird Biomasse hinzugegeben, die anschließend ausgast und die dabei entstehenden Pyrolysegase werden mit der über die Außenwände vorgewärmten und in den Behälter eingesogenen Verbrennungsluft vermischt und oxidiert [Schmidt et al., 2014a]. Sobald die gebildete Kohle beginnt, sich mit weißer Asche zu überziehen (Anzeichen für die nicht erwünschte Oxidation von Kohle), muss eine weitere Schicht Biomasse nachgeführt werden [Schmidt et al., 2014a]. Beendet wird der Prozess durch Ablöschen der Pflanzenkohle nach Zugabe von Wasser am Boden des Behälters, wobei der aufsteigende Wasserdampf durch das Pflanzenkohle-Bett die Pflanzenkohle aktiviert [Schmidt et al., 2014a]. Die ursprüngliche Methode wird in Erdgruben angewendet. Das bietet die Möglichkeit insbesondere für Kleinanwender, einfach und ohne monetären Aufwand, qualitativ hochwertige Pflanzenkohle herzustellen [Cornelissen et al., 2016].

Verfahren zur Herstellung von Pflanzenkohle im industriellen Maßstab existieren ebenfalls. Beispielhaft sind die Pyrolyse im Schneckenreaktor (z. B. Firma Pyreg), die Pyrolyse im Schacht-/Wanderbettreaktor (z. B. Firma Carbon Technik Schuster) und die Vergasung im Schwebebettvergaser (z. B. Firma Syncraft).

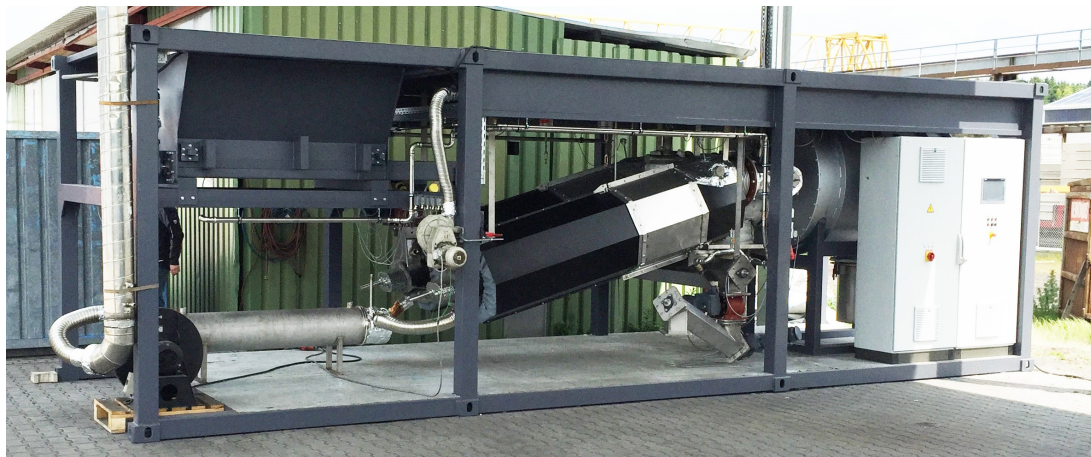
Bei der Schneckenpyrolyse wird die Biomasse mithilfe von Förderschnecken durch den Reaktorraum gefördert und dabei pyrolysiert (s. Abb. 2.3c)). Das Pyrolysegas wird dabei abgezogen und in einer nachgeschalteten Brennkammer verbrannt. Die Pflanzenkohle wird am Ende des Reaktors abgelöscht [PYR, 2022].

Im Schacht-/Wanderbettreaktor wird die Biomasse am oberen Ende des senkrecht stehenden Reaktors zugeführt, in diesem pyrolysiert und am unteren Ende wieder ausgeschleust. Die Förderung der Biomasse folgt hierbei der Gravitation, während die Pyrolysegase im Gegenstrom am oberen Ende abgezogen und anschließend in einer Brennkammer verbrannt werden [CTS, 2022].

Die Vergasung im Schwebebettvergaser ist einer thermochemischen Behandlung der Biomasse in Form eines Pyrolyseschritts nachgeschaltet. Die bei der Pyrolyse entstehenden gasförmigen und festen Produkte werden direkt in den Vergaser geleitet, wo die Feststoffe zu einem Schwebebett mobilisiert werden und damit eine gute Wärmeübertragung realisiert wird. Dort findet die Vergasung sowohl der gasförmigen als auch zum Teil der festen Pyrolyseprodukte statt, sodass primär ein Produktgas und Pflanzenkohle entsteht. Das Produktgas wird in einem Blockheizkraftwerk zur Erzeugung thermischer und elektrischer Energie verbrannt. [Hebenstreit and Käßler, 2017]



(a) Pflanzenkohle mit den gut sichtbaren Strukturen des pflanzlichen Ursprungsmaterials [Schmidt, et al., 2014a] 2011a] (b) Stahl Kon-Tiki Kegelmeiler in Betrieb [Schmidt



(c) PYREG-P500 Pyrolyseanlage der Abfallwirtschaft und Stadtreinigung Freiburg GmbH (AWSF) [AWS]

Abbildung 2.3.: Pflanzenkohle (a) und ihre Herstellung b) im Kon-Tiki und c) in einer technischen Pyrolyseanlage

Da bei der Vergasung die Pflanzenkohle-Ausbeute sehr gering ist und in der Regel lediglich als Nebenprodukt anfällt, wird im folgenden Kap. nur die Pyrolyse genauer betrachtet. Das Kap. hebt insbesondere hervor, welchen Einfluss die Prozessbedingungen auf die Mengenanteile der erzeugten Produkte und deren Qualität haben.

### 2.2.3.2. Pyrolyse

Die Pyrolyse ist nicht nur ein eigenständiger Prozess, sondern läuft ähnlich wie der Trocknungsprozess auch als Teilprozess anderer thermochemischer Umwandlungen, wie z. B. der Vergasung oder Verbrennung, ab [Shackley et al., 2016]. Bei der Pyrolyse eines Einsatzstoffes in sauerstofffreier bzw. sauerstoffreduzierter Atmosphäre entstehen drei Phasen (gasförmig, flüssig, fest) an Produkten (Kap. 2.2.3.1). Deren Aufteilung sowie die Qualität und Zusammen-

setzung der einzelnen Phasen sind stark abhängig von den Prozessbedingungen (Aufheizrate, Temperatur, Partikelgröße und Verweilzeit). Zur Steuerung der Zielproduktausbeute und -qualität sind drei Haupttechnologien zu unterscheiden: [Quicker and Weber, 2016]

- die Schnellpyrolyse,
- die mittelschnelle und
- die langsame Pyrolyse.

Bei der **Schnellpyrolyse** ist das Zielprodukt das Pyrolyseöl. Dazu wird bei typischerweise moderaten Temperaturen (400 bis 600 °C) und hohen Aufheizraten ( $> 100 \text{ }^\circ\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$ ) die entstehende Gasphase nach einer Verweilzeit von 0,5 bis 2 Sekunden sehr schnell gequench/abgekühlt, um sekundäre Gasphasenreaktionen auf Kosten der Ölausbeute zu vermeiden [Shackley et al., 2016]. Angesichts der hohen Aufheizrate muss zudem vorab die Biomasse auf wenige Millimeter zerkleinert werden. Ebenso finden Reaktorkonzepte Anwendung, die eine gute Wärmeübertragung und damit eine schnelle Aufheizung der Biomasse ermöglichen, wie z. B. der Wirbelschichtreaktor [Shackley et al., 2016]. Das entstandene Pyrolyseöl besteht aus einer wässrigen und öligen Phase und muss daher in weiteren Prozessschritten aufbereitet und konditioniert werden [Shackley et al., 2016], [Quicker and Weber, 2016]. Während die Ölausbeute bei der Schnellpyrolyse zwischen 70 und 75 M.-% (bezogen auf trockene Biomasse) liegt, befinden sich die Kohle- und Gasausbeute nur bei jeweils 12 bis 13 M.-% [Shackley et al., 2016].

Dagegen steht eine hohe Kohleausbeute bei der **langsamen Pyrolyse** im Vordergrund. Diese zeichnet sich durch geringe Aufheizraten (bis zu  $100 \text{ }^\circ\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$ ) und Verweilzeiten von einigen Minuten bis mehreren Tagen [Shackley et al., 2016] aus. Zu der hohen Kohleausbeute trägt hier außerdem die Kondensation von polyaromatischen Verbindungen aus der Gasphase zu größeren Molekülstrukturen und der damit einhergehenden Bildung sekundärer Kohle bei [Shackley et al., 2016]. Aus diesem Grund ist die langsame Pyrolyse besonders geeignet für die Herstellung von Pflanzenkohle [Shackley et al., 2016]. Die drei Pyrolyseprodukte (gasförmig, flüssig und fest) werden dabei zu etwa gleichen Massenanteilen gebildet [Quicker and Weber, 2016]. Reaktorkonzepte wie der Drehrohrofen oder Schneckenreaktor werden zur langsamen Pyrolyse genutzt, da diese eine hohe Temperaturspanne, gute Kontrolle der Produktqualität sowie hohe Verweilzeit und Verweilzeitverteilung erlauben [Shackley et al., 2016].

Die **mittelschnelle Pyrolyse** oder Intermediatpyrolyse ist eine Kombination aus den beiden zuvor dargestellten Technologien. Die Prozessbedingungen und die Produktausbeute befinden sich demnach zwischen der Schnellpyrolyse und der langsamen Pyrolyse [Shackley et al., 2016]. Im Vergleich zur festen Phase hat die Gasphase typischerweise eine kurze Verweilzeit im Reaktor und wird anschließend schnell gequench, sodass eine hohe Ölausbeute resultiert [Quicker and Weber, 2016].

Neben der durch Pyrolyse hergestellten Pflanzenkohle spielt die Kompostierung bei der Herstellung einer Schwarzerde eine wichtige Rolle. Daher werden im folgenden Kap. die Grundla-

gen der Kompostierung bzw. des Kompostes vorgestellt.

### 2.2.4. Kompost

Kompost ist ein organisches Produkt und entsteht während des Kompostierungsprozesses durch den biologischen Abbau und die biologische Stabilisierung von organischen Ausgangsstoffen. Damit eignet sich Kompost zur Bildung von Bodenumus, der essenziell für eine gute Bodenstruktur und hohe Wasserhaltekapazität ist. Außerdem kann Kompost zu einem verbesserten Pflanzenwachstum beitragen und aufgrund der enthaltenen Nährstoffe und Spurenelemente als Bodenverbesserer, (Kopf-)Dünger oder Mulchmaterial verwendet werden [Haug, 1993].

Im Folgenden wird der Kompostierungsprozess, insbesondere die Prozessbedingungen, und verschiedene Verfahren zur Herstellung von Kompost vorgestellt.

#### 2.2.4.1. Herstellung des Kompostes

Die Kompostierung kann grundsätzlich in einer **anaeroben** (sauerstofffreien) Umgebung stattfinden, dann als Fermentation bezeichnet, oder unter **aeroben** Bedingungen ablaufen [Eliot, 2017], [Haug, 1993]. Da bei der Fermentation ein erhöhtes Geruchspotenzial vorhanden ist und metastabile Zwischenprodukte entstehen, die in nachfolgenden Prozessschritten bei Kontakt mit Sauerstoff abgebaut werden, wird die technisierte Kompostierung für gewöhnlich in aerober Umgebung durchgeführt [Haug, 1993].

Aus diesem Grund sind die wichtigsten Prozessparameter bei der Kompostierung der **Sauerstoffgehalt** und die **Feuchte**. Weiterhin ist die Temperatur eine wichtige Prozessgröße, die eine Aussage zur mikrobiellen Aktivität und damit auch zur Abbaurate der organischen Stoffe zulässt und gleichzeitig ein Maß für den Prozessfortschritt der Kompostierung darstellt. Der Kompostierungsprozess lässt sich in zwei Hauptphasen unterteilen, der Phase der **aktiven Kompostierung** und der **Reifephase** [Eliot, 2017]. Die erste Phase ist durch den Abbau leicht abbaubarer Bestandteile gekennzeichnet und kann Temperaturen von 45 bis 68 °C aufweisen [Maheshwari, 2014]. In der Reifephase ist ein Großteil der abbaubaren Substanzen bereits verstoffwechselt, sodass Syntheseprozesse zur Bildung stabiler neuer Komplexe und polymerisierter organischer Strukturen den Abbauprozessen überwiegen [Bernal et al., 2009]. Je nach Prozessführung und Verfahrensart kann der Kompostierungsprozess in fünf bis acht Wochen abgeschlossen sein [Eliot, 2017].

In Abb. 2.4 ist der Kompostierungsprozess und die wichtigsten Input- und Outputgrößen dargestellt.

Typische Ausgangsstoffe für die Kompostierung sind: [Epstein, 2011]

- Klärschlamm,

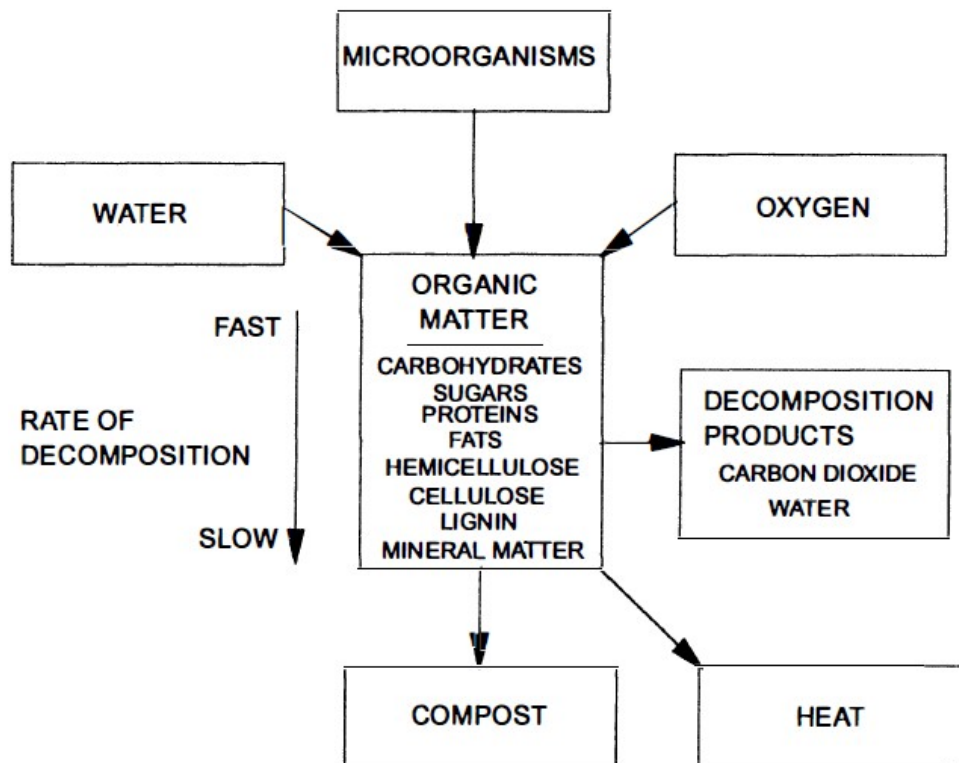


Abbildung 2.4.: Der Kompostierungsprozess [Haug, 1993].

- Mist,
- Feld-/Erntereste,
- Lebensmittelreste und
- kommunaler Bioabfall.

Da diese Stoffe üblicherweise einen sehr hohen Wassergehalt aufweisen, sind organische Strukturmaterialien (engl.: **bulking agents**) zur Anpassung an die Kompost-Anforderungen hinsichtlich des Inputmaterials notwendig. Beispiele dafür sind: [Epstein, 2011]

- Holzhackschnitzel,
- Stroh,
- Pflanzenkohle und
- Ast-/Grünschnitt.

Solche Strukturmaterialien sorgen neben einer guten Durchlüftung und Drainageführung u.a. für ein geeignetes Kohlenstoff/Stickstoff-Verhältnis (C/N-Verhältnis: 25 bis 30 [Bernal et al., 2009], [Schmidt, 2011b]), das insbesondere für die Aktivität und das Wachstum der Mikroorganismen entscheidend ist [Maheshwari, 2014], [Epstein, 2011].



Bevor das Inputmaterial kompostiert werden kann, sind häufig Vorbehandlungsschritte wie Schreddern, Trocknen, Aussortieren von Fremdstoffen etc. notwendig [Epstein, 2011]. Außerdem wird meist eine Nachbereitung des Kompostes durchgeführt. Dazu zählen z. B. das Sieben zur Trennung des Kompostes in Fein- und Grobanteil, die Hygienisierung zum Abtöten von (Krankheits-)Keimen und Samen und das Luftstromsichten zur Abscheidung von Fremdstoffen wie Glas, Metalle und Kunststoffe [Epstein, 2011].

Bei den verschiedenen Kompostierungsverfahren unterscheidet man zunächst zwischen **Reaktor-Systemen** und **offenen Systemen** [Haug, 1993], [Epstein, 2011]. Bei den Reaktor-Systemen unterscheidet man weiter zwischen Reaktoren, in welchen das Material vertikal gefördert wird (*vertical solids flow*) und denen mit horizontaler Förderung des Materials (*horizontal solids flow*) [Epstein, 2011]. Offene Systeme können in Bewegtbett-Systeme und in statische Systeme sowie jeweils nach natürlicher bzw. erzwungener Belüftung unterteilt werden [Haug, 1993], [Epstein, 2011].

Für eine weitere Ausführung und detaillierte Beschreibung der Kompostierungsverfahren und des Kompostierungsprozesses wird an dieser Stelle auf die Literaturstellen von Epstein [2011] und Haug [1993] verwiesen.

Als wichtiger Bestandteil der Prozesskette der Herstellung von Schwarzerde ist die Kompostierung maßgeblich an der Qualität der Schwarzerde beteiligt. Abhängig von der Qualität der Schwarzerde ergeben sich unterschiedliche Anwendungsmöglichkeiten und Wirkweisen für die Schwarzerde, die im folgenden Kap. beschrieben werden.

### 2.2.5. Anwendung und Wirkungen der Schwarzerde

In der Literatur ist eine Vielzahl an Studien zur Anwendung und Wirkung von Pflanzenkohle zu finden, während die Zahl von Studien zu Schwarzerden noch geringer sind. Das liegt vermutlich an einer langjährigen Konzentration in der Forschung auf das wesentliche Element *Pflanzenkohle* in der Schwarzerde und Terra preta. Eine isolierte Anwendung der Pflanzenkohle ohne Weiterentwicklung zur Schwarzerde ist wegen ihrer hohen Adsorptionsleistung und Kationenaustauschkapazität aber meist nicht sinnvoll (oder nur in Sonderfällen). Vielmehr ist ihre Aufladung mit Nährstoffen oder die Kombination mit nährstoffreichen Substraten in der Regel dringend zu empfehlen [Schmidt, 2011a]. Passend dazu steigt die Anzahl an Veröffentlichungen zur Herstellung und Anwendung von Schwarzerde in den letzten Jahren an.

Der Einsatz von Schwarzerde findet primär in der Landwirtschaft statt [Azzi, 2021]. Je nach Produktqualität der Schwarzerde kann diese als Ergänzung oder gar als Ersatz zu konventionellem Dünger verwendet werden.

Eine weitere Anwendung, die mit Begriffen wie *Schwammstadt* oder *Stockholm-Modell* in Verbindung gebracht wird, ist der Einsatz von Schwarzerde für Grünflächen in Städten. Nach dem Schwammstadt-Konzept werden städtische Böden so gestaltet, dass poröse Bodenstrukturen Wasser bei Starkregenereignissen aufnehmen und während Dürreperioden wieder abgeben

können [Schubert, 2021]. Damit wird das Risiko von Überschwemmungen oder Austrocknen von Böden und ein damit einhergehendes Absterben von z. B. Bäumen und Sträuchern reduziert. Eine Methode dazu stellt das Stockholm-Modell nach Embrén (2016, [Embren, 2016]) dar. Bei dieser Methode wird zur Pflanzung neuer Stadtbäume die Pflanzgrube mit einer Schicht aus grobkörnigem Gestein aufgebaut und anschließend Schwarzerde (50 vol.-% Pflanzkohle und 50 vol.-% Kompost) eingeschlemmt [Embren, 2016]. Das weitere Verfüllen der Pflanzgrube wird mit einer Mischung aus feinkörnigem Gestein und Schwarzerde durchgeführt [Embren, 2016].

Schwarzerden mit hohen Gehalten an Pflanzenkohle können außerdem zur Sanierung von belasteten Böden [Azzi, 2021] dienen. Die Pflanzenkohle nimmt dabei mit ihrer porösen Struktur Schwermetalle und andere Schadstoffe auf, während der Kompostanteil als Nährstofflieferant und Vorstufe von Humus für ein gesundes Pflanzenwachstum sorgt [Papageorgiou et al., 2021], [Wu et al., 2017].

Wirkungen der Schwarzerde sind in der Literatur sehr vielseitig beschrieben. Zwar liegen Studien vor, die z. B. negative oder fehlende positive Effekte von Pflanzenkohle und Schwarzerde auf bodenphysikalische und -chemische Parameter und die Bodenfruchtbarkeit beschreiben [Paetsch et al., 2018], allerdings spiegeln diese nicht den Großteil der Literaturstimmen wider [Tertytze et al., 2015], [Wagner et al., 2021], [Quicker and Weber, 2016], [Kammann et al., 2016], [Schmidt et al., 2021a], [Stucki et al., 2019] und werden auch durch gegensätzliche Aussagen aus Meta-Analysen relativiert [Schmidt et al., 2021b].

Allen Wirkungen voran ist die Reduktion des THG-Potenzials durch die Speicherung stabiler Kohlenstoffverbindungen zu nennen. Dieser Primäreffekt der Schwarzerde wird einerseits anteilig durch die Pflanzenkohle und ihrer mittleren Verweildauer von wenigen 100 bis einigen 1000 Jahren hervorgerufen [Stucki et al., 2019], [Wagner et al., 2021], andererseits aber auch durch den Kompost, der durch die Co-Kompostierung mit Pflanzenkohle eine verbesserte Stabilität aufweist und somit ebenfalls längerfristig Kohlenstoff speichert [Fischer and Glaser, 2012], [Godlewska et al., 2017]. Dieses Phänomen lässt sich auch an jahrtausendealten Schwarzerden beobachten, die mächtige Humusschichten von bis zu einem Meter aufweisen können [Glaser and Birk, 2012].

Zudem können durch den Kompostierungsprozess mit ausreichender Zugabe von Pflanzenkohle bereits vor der Anwendung von Schwarzerde THG-Emissionen reduziert werden [Kammann et al., 2017], [Xiao et al., 2017], [Chen et al., 2020]. Dies wird einerseits durch die Aufnahme und Speicherung von z. B. Ammoniak ( $\text{NH}_3$ ) und Nitrat ( $\text{NO}_3^-$ ) hervorgerufen, die ansonsten zur Entstehung des THG *Lachgas* ( $\text{N}_2\text{O}$ ) führen können [Godlewska et al., 2017]. Gleichzeitig führt die Pflanzenkohle durch Bindung dieser flüchtigen Stoffe ( $\text{NH}_3$ ,  $\text{NO}_3^-$ ) zu verminderten Stickstoffverlusten bei der Kompostierung und wirkt sich damit positiv auf den Stickstoffkreislauf aus [Cao et al., 2019]. Außerdem trägt die Pflanzenkohle mit ihrer porösen Struktur zu einer verbesserten Belüftung des Kompostmaterials bei, wodurch das Auftreten von anaeroben Bakterien, die für die Entstehung des THG *Methan* ( $\text{CH}_4$ ) verantwortlich sind, reduziert

wird [Godlewska et al., 2017]. Des Weiteren wirkt eine Pflanzenkohle-Zugabe bei der Kompostierung positiv auf die Kompostqualität und -stabilität (z. B. erhöhte Gehalte an wasserlöslichen Kalium-, Natrium- und Calcium-Kationen und erhöhter Polymerisations-Index (Huminsäure zu Fulvinsäure-Verhältnis)<sup>2</sup>) [Xiao et al., 2017] sowie auf die Hemmung der Schadstofffreisetzung (Schwermetalle und organische Schadstoffe) [Godlewska et al., 2017].

Nur wenige Studien zu klimarelevanten Sekundäreffekten der Schwarzerde zeigen, dass THG-Emissionen in Feldexperimenten mit Schwarzerde reduziert werden [Agegnehu et al., 2015]. Auch die vielen möglichen Sekundäreffekte einer Bodenverbesserung, wie z. B. eine gesteigerte Pflanzenproduktivität und -vitalität, sind noch nicht vollumfänglich untersucht und geklärt. Das ist besonders auch im Hinblick auf die Ernährungssouveränität relevant. Daher lässt sich aufgrund fehlender Datenlage eine repräsentative Bewertung hinsichtlich der Sekundäreffekte von Schwarzerde nicht machen.

Im Hinblick auf die strukturellen Bodeneigenschaften werden Verbesserungen der Wasserspeicherkapazität, Infiltration z. B. bei Starkregenereignissen, Nährstoffretention und mikrobiellen Aktivität in Böden mit Schwarzerde beschrieben [Quicker and Weber, 2016], [Kammann et al., 2016], [Glaser and Birk, 2012]. Folgen des Klimawandels, wie zunehmende Extremwetterereignisse (Dürreperioden, Starkregen etc.) [Masson-Delmotte et al., 2018] können solche Böden demnach besser widerstehen und, neben dem erhöhten Nährstoffrückhaltevermögen und den begünstigten Bedingungen für die Ansiedlung von Mikroorganismen, zusätzlich die Produktivität und Vitalität von Pflanzen fördern [Quicker and Weber, 2016], [Terytze et al., 2015], [AWS]. Die erhöhte Nährstoff-Rückhaltung trägt außerdem zu einer verminderten Auswaschung von bspw. Nitrat ins Grundwasser bei, was sich wiederum positiv auf die Trinkwasserversorgung und das Einhalten rechtlicher Bestimmungen (EU-Nitrat Richtlinie) auswirkt [Quicker and Weber, 2016]. Vor dem Hintergrund der Ernährungssouveränität kann auch die Lebensmittelversorgung durch den Einsatz von Schwarzerde gesichert und verbessert werden. Denn während sich u.a. unter konventionellen landwirtschaftlichen Methoden zurzeit die weltweit landwirtschaftlich nutzbaren Flächen durch Bodendegradation und Bodenkohlenstoffverlust verringern, wächst gleichzeitig der Bedarf durch eine Zunahme der Weltbevölkerung und die Nachfrage nach biogenen Energieträgern und Stoffen (Biokraftstoffe, Biowerkstoffe etc.; *Tank oder Teller*-Diskussion) [Quicker and Weber, 2016]. Wie Untersuchungen zur Schwarzerde z. B. im Amazonasgebiet zeigen, bleibt trotz starker Verwitterung und Mineralisierung (Abbau) von Nährstoffen der Boden langfristig (mehrere tausend Jahre) fruchtbar [Glaser and Birk, 2012]. Aus diesem Grund könnte der Einsatz von Schwarzerde auf landwirtschaftlichen Flächen als Lösung dieser stetig zunehmenden Problematik herangezogen werden.

Herstellung und Anwendung von Schwarzerde bieten also einerseits die Möglichkeit dem Klimawandel entgegen zu treten, sowohl mit ihren Primäreffekten (Kohlenstoffsequestrierung im Boden, Reduzierung von THG-Emissionen bei der Kompostierung etc.) als auch mit den nicht umfassend präzise im Detail belegten Sekundäreffekten im Feldexperiment (reduzierte THG-

---

<sup>2</sup>Polymerisations-Index gibt das Verhältnis aus dem Gehalt an Huminsäure-ähnlichem organischen Kohlenstoff zum Gehalt an Fulvinsäure-ähnlichem organischen Kohlenstoff im Kompost wieder und ist damit ein Maß für die Humifizierung des organischen Ausgangsmaterials [Xiao et al., 2017].

Emissionen nach Anwendung und Nutzung im Boden). Andererseits tragen sie zur vielfältigen Verbesserung des Ökosystems *Boden* (physikalisch-chemische Eigenschaften, Biodiversität, Mikrobiologie, Fruchtbarkeit, Langzeitwirkung etc.) und seiner Nutzwirkungen für die Menschheit bei. Welchen zusätzlichen Einfluss diese Verbesserungen auf die THG-Emissionen haben, ist aufgrund der Komplexität der zum Teil wechselwirkenden Effekte nicht umfassend beschrieben. Diese weisen aber auf ein zusätzliches Potenzial zur Steigerung der Entnahme von THG aus der Atmosphäre hin.

Gerade vor dem Hintergrund der Dringlichkeit gegen den schnell voranschreitenden Klimawandel und die Bodendegradation vorzugehen und auf Basis der fundierten Literaturaussage zu den positiven Effekten einer Schwarzerde-Anwendung ist an dieser Stelle das unmittelbare Handeln jeglicher Entscheidungsträger zu empfehlen. Eine Förderung der Forschung, insbesondere hinsichtlich der positiven Sekundäreffekte, und das Erarbeiten einer nationalen Strategie zur Anwendung von Schwarzerde und deren Umsetzung wird dringend empfohlen. Auf Grundlage weiterer Erkenntnisse könnte die Wirkung der Schwarzerde auf die Umwelt noch genauer ermittelt und zielgerichtete Empfehlungen zur Anwendung getroffen werden.

Als Einwirkung auf den Boden ist der Einsatz von Schwarzerde an verschiedene rechtliche Bedingungen und Anforderungen an die Stoffeigenschaften geknüpft. Dieser rechtliche Rahmen wird im folgenden Kap. in Bezug auf den Einsatzzweck dargelegt.

### 2.2.6. Rechtliche Anforderungen an die Herstellung, Produktqualität und Anwendung der Schwarzerde

Ein Einsatz von Schwarzerde ist als Einwirkung auf den Boden zu bewerten. Diese regelt das **Bundes-Bodenschutzgesetz** (Gesetz zum Schutz vor schädlichen Bodenveränderungen und zur Sanierung von Altlasten - Bundes-Bodenschutzgesetz - BBodSchG, vom 25. Februar 2021 (BGBl. I S. 306)). Nach §1 BBodSchG ist es „Zweck dieses Gesetzes . . . , nachhaltig die Funktionen des Bodens zu sichern oder wiederherzustellen. Hierzu sind schädliche Bodenveränderungen abzuwehren, . . . und Vorsorge gegen nachteilige Einwirkungen auf den Boden zu treffen. Bei Einwirkungen auf den Boden sollen Beeinträchtigungen seiner natürlichen Funktionen sowie seiner Funktion als Archiv der Natur- und Kulturgeschichte so weit wie möglich vermieden werden.“ Die Funktionen des Bodens sind in §2 BBodSchG. „Begriffsbestimmungen“ erläutert. Dort sind neben den o.g. Funktionen auch „Nutzungsfunktionen“ weiter spezifiziert, die ebenfalls zu schützen sind. Weiter sind dort „Schädliche Bodenveränderungen“ und „Beeinträchtigungen der Bodenfunktionen“ definiert.

§3 regelt den Anwendungsbereich des BBodSchG. Nach Abs. (1) Satz 1. findet „dieses Gesetz . . . auf schädliche Bodenveränderungen . . . Anwendung, soweit . . . Vorschriften des Kreislaufwirtschaftsgesetzes über das Aufbringen von Abfällen zur Verwertung als Düngemittel im Sinne des §2 des Düngegesetzes und der hierzu auf Grund des Kreislaufwirtschaftsgesetzes erlassenen Rechtsverordnungen . . . Einwirkungen auf den Boden nicht regeln“. Für die Masterarbeit sind danach die Bestimmungen des **Kreislaufwirtschaftsgesetzes** (vom 10. August

2021 (BGBl. I S. 3436)) und des **Düngegesetzes** (10. August 2021 (BGBl. I S. 3436)) mit den zugehörigen Verordnungen und rechtlichen Regelungen in Bezug auf Herstellung und Einsatz von Schwarzerde auszuwerten und mit den Regelungen des BBodSchG abzugleichen. Weitere Bestimmungen des BBodSchG befassen sich u.a. mit

- Pflichten zur Gefahrenabwehr (§4),
- Auf- und Einbringen von Materialien auf oder in den Boden (§6),
- Vorsorgepflicht (§7),
- Werten und Anforderungen (§8) und
- Landwirtschaftlicher Bodennutzung mit guter fachlicher Praxis in der Landwirtschaft (§17).

Für die Masterarbeit sind insbesondere Bestimmungen

- zur Qualität der zugeführten Stoffe,
- zu Zeitpunkten und
- Quantitäten der Ausbringung zu bewerten

soweit sie sich auf die Ökobilanz von Herstellung und Einsatz von Schwarzerde auswirken können. Nach dem Kreislaufwirtschaftsgesetz sind hier insbesondere Bestimmungen der **Bioabfallverordnung BioAbfV** und nach dem Düngegesetz Bestimmungen der **Düngemittelverordnung DüMV** auszuwerten. In diesen beiden Verordnungen sind bspw. keine Angaben zu den organischen Schadstoffen der Polyzyklischen Aromatischen Kohlenwasserstoffe (PAK) geregelt. Dafür greifen nach §3 BBodSchG die Bestimmungen der Bundesbodenschutzverordnung BBodSchV.

Die Düngemittelverordnung DüMV (vom 2. Oktober 2019 (BGBl. I S. 1414)) gilt nach §2 Geltungsbereich für das „Inverkehrbringen von Düngemitteln, Bodenhilfsstoffen, Kultursubstraten und Pflanzenhilfsmitteln“, die den in §1 des Düngegesetzes vorgegebenen Zweckbestimmungen dienen sollen:

- „Ernährung von Nutzpflanzen sicherzustellen,
- die Fruchtbarkeit des Bodens... zu erhalten oder nachhaltig zu verbessern... ,
- Gefahren für die Gesundheit von Menschen und Tieren sowie für den Naturhaushalt vorzubeugen oder abzuwenden... ,
- einen nachhaltigen und ressourceneffizienten Umgang mit Nährstoffen bei der landwirtschaftlichen Erzeugung sicherzustellen“.

Anforderungen hinsichtlich Herstellung, Fremdbestandteile und Schadstoff-Grenzwerte sind für Düngemittel im §3 „Zulassung von Düngemitteltypen“ und für Bodenhilfsstoffe, Kultursubstrate und Pflanzenhilfsmittel in §4 Inverkehrbringen von Wirtschaftsdüngern, Bodenhilfsstoffen, Kultursubstraten und Pflanzenhilfsmitteln beschrieben. Neben den Obergrenzen für die Schwermetalle Arsen, Blei, Cadmium, Chrom, Nickel, Quecksilber und Thallium sind dort auch die

Grenzwerte für die organischen Schadstoffgruppen Dioxine und dioxin-ähnliche polychlorierte Biphenyle (PCB) sowie Perfluorierte Tenside (PFT) aufgeführt. Vor dem Inverkehrbringen dieser Stoffe sind im Weiteren Anforderungen an die Kennzeichnung nach §6 zu berücksichtigen.

Während die DüMV das Inverkehrbringen für Düngemittel im Allgemeinen vorgibt, regelt die Bioabfallverordnung BioAbfV (vom 28. April 2022 (BGBl. I S. 700)) den Umgang mit „Bioabfälle[n] und Gemische[n], die zur Verwertung als Düngemittel auf landwirtschaftlich, forstwirtschaftlich oder gärtnerisch genutzte[n] Böden aufgebracht“ werden.

In §3 sind die Anforderungen an die hygienisierende Behandlung beschrieben, um eine seuchen- und phytohygienische Unbedenklichkeit zu gewährleisten.

Nach §4 Anforderungen hinsichtlich der Schadstoffe und weiterer Parameter sind u.a. die Schwermetallgehalte von Blei, Cadmium, Chrom, Kupfer, Nickel, Quecksilber und Zink zu bestimmen und die formulierten Grenzwerte einzuhalten.

Zum Teil unterschiedliche Schadstoffe und zum Teil unterschiedliche Grenzwerte in den Verordnungen ergeben sich aus zum Teil verschiedenen Randbedingungen (s. Kap. 3). Nach §6 kann je nach Randbedingungen eine maximale Aufbringungsmenge von 30 Tonnen<sup>3</sup> Trockenmasse pro Hektar und drei Jahren zulässig sein.

Die Grenzwerte für Schadstoffe, die bei der Anwendung von Schwarzerde zu berücksichtigen sind, sind im Anhang (A.1) in Tab. A.1 aufgeführt.

Diese rechtlichen Grenzwerte, Bestimmungen und Anforderungen an den Einsatz von Schwarzerde in den Boden und die damit im Zusammenhang stehenden Aufwände werden bei der Ökobilanzierung der gesamten Prozesskette von der Herstellung bis zum Einsatz von Schwarzerde berücksichtigt.

### 2.3. Die Methode der Ökobilanz

Dieses Kap. stellt einen Überblick zur international standardisierten Methodik der Ökobilanzierung dar. Dabei wird insbesondere auf die grundlegenden Definitionen, Bestandteile und die Vorgehensweise bei einer Ökobilanz eingegangen.

#### 2.3.1. Definition

Die Ökobilanz (engl. Life Cycle Assessment (LCA)) ist eine Methode, um potenzielle Umweltwirkungen<sup>4</sup>, die im Verlauf des Lebensweges von Produkten (umfasst auch Dienstleistungen) entstehen, quantitativ zu bestimmen und zu bewerten. Dabei wird die gesamte Prozesskette

---

<sup>3</sup>In SI-Einheit (Internationales Einheitensystem): 30 Tonnen entsprechen 30.000 kg

<sup>4</sup>Umweltwirkungen - Sämtliche Einwirkungen die auf die abiotische und biotische natürliche Umwelt und den Menschen Einfluss nehmen

des Produktes von der Rohstoffentnahme über die Verarbeitung und Nutzung, dem Recycling bis zur Entsorgung abgebildet und bilanziert. Die Ergebnisse der Ökobilanz können u.a. dazu dienen, eine Verbesserung der Umwelteigenschaften eines Produktsystems in den verschiedenen Abschnitten des Lebensweges vorzunehmen und als Information von Entscheidungsträgern in der Industrie für die Produktentwicklung oder der Politik für die strategische Planung beitragen.

### 2.3.2. Methodischer Rahmen der Ökobilanz

Die Methode der Ökobilanz ist nach den Normen DIN ISO 14040, die die Grundsätze und Rahmenbedingungen umfasst und DIN ISO 14044, die die Anforderungen und Anleitungen beinhaltet, standardisiert und kann in vier Phasen unterteilt werden. Diese Phasen werden im Folgenden aufgeführt und die erforderlichen Arbeitsschritte beschrieben. Abb. 2.5 zeigt den nach DIN ISO 14040 beschriebenen Rahmen und die vier Phasen bei der Erstellung einer Ökobilanz.

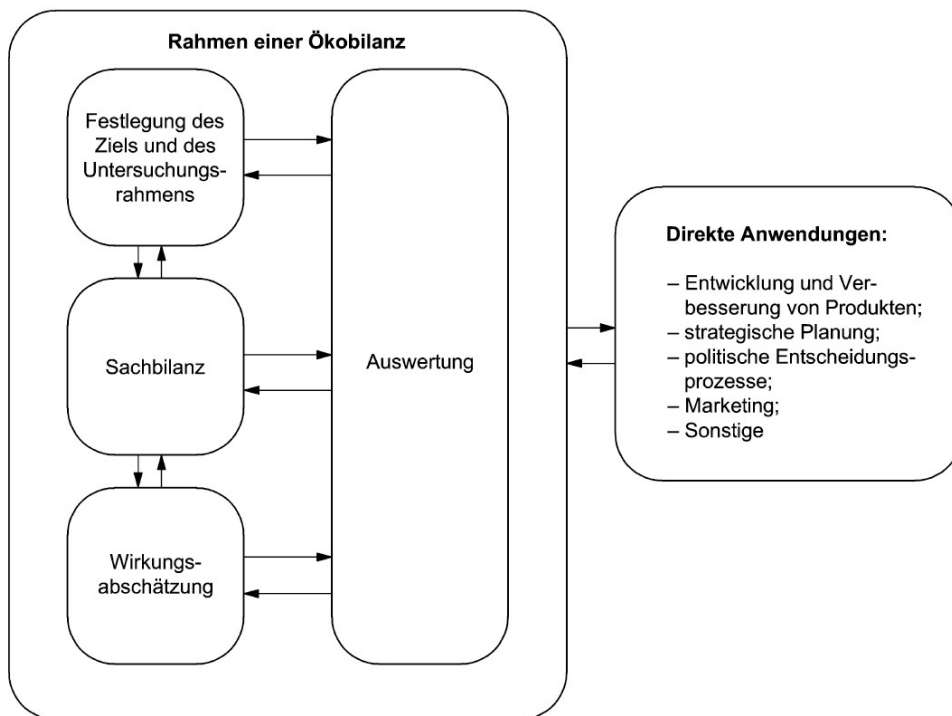


Abbildung 2.5.: Phasen einer Ökobilanz nach DIN ISO 14040.

#### 2.3.2.1. Zielsetzung und Festlegung des Untersuchungsrahmens

Die Grundlage bei der Erstellung einer Ökobilanz bildet die erste Phase mit der Zielsetzung und der Festlegung des Untersuchungsrahmens. Bei der Zielsetzung sind die Gründe zur Durchführung der Studie sowie die beabsichtigte Verwendung der daraus resultierenden Ergebnisse

eindeutig darzulegen. Außerdem findet bei der Festlegung des Untersuchungsrahmens die Definition der Systemgrenzen des zu untersuchenden Produkts sowie der funktionellen Einheit/en statt. Beim Festlegen der Systemgrenzen wird vorgegeben, welche Prozesse des Produktsystems berücksichtigt werden und welche Annahmen für die Wahl von Abschneidekriterien getroffen wurden.

Dies umfasst auch den zeitlichen und geographischen Untersuchungsrahmen. Zur umweltbezogenen Bewertung aller ermittelten Input- und Outputflüsse eines zu untersuchenden Produktsystems, wird eine Bezugsgröße definiert, die funktionelle Einheit (engl. functional unit (FU)), die die Funktion(en) des Produktes quantifiziert. Das heißt, diese Größe beinhaltet den vollständigen quantitativen Nutzen des Produktsystems und wird in physikalisch messbaren Einheiten angegeben. Die Festlegung der FU hat im direkten Zusammenhang zu der zuvor formulierten Zielsetzung und des Untersuchungsrahmens zu stehen.

Beim Vergleich von unterschiedlichen Produkten bspw. Papierhandtücher versus Lufttrocknersystem auf Basis der gleichen Funktion z. B. das Trocknen von Händepaaren und der gleichen funktionellen Einheit z. B. Trocknung von 1000 Händepaaren (funktionelle Einheit) sind die Festlegung unterschiedlicher Referenzflüsse für das jeweilige Produktsystem z. B. die notwendige Masse an Papiertüchern zur Trocknung von 1.000 Händepaaren sowie die entsprechend temperierte Luftstrommenge ( $\text{m}^3/\text{h}$ ) erforderlich.

### 2.3.2.2. Sachbilanz

Im Rahmen der Sachbilanz findet die Datenerhebung des zu untersuchenden Produkts und dessen Prozesskette in den dafür festgelegten Systemgrenzen über den gesamten Lebensweg statt. Zunächst werden zur Bestimmung der Input- und Outputflüsse Daten eines jeden Prozesses zur Massen- und Energiebilanz gesammelt, die die zuvor festgelegten Anforderungen des Untersuchungsrahmens erfüllen. Zusätzlich sind die belegten und transformierten Flächen jedes im System befindlichen Prozesses zu ermitteln. Diese Rohdaten werden dann im nächsten Schritt mithilfe von Berechnungsverfahren, Abschätzungen und Annahmen, die nachvollziehbar dokumentiert werden müssen, in ein Produktmodell umgewandelt, das aus vielen einzelnen Prozessmodulen besteht. Jedes Prozessmodul hat einen geeigneten Referenzfluss als Output z. B. *1 kg Stahl*, auf den die jeweiligen Input- und anderen Outputflüsse des Prozessmoduls und dessen funktionaler Zusammenhang normiert werden. Somit liefert die Phase der Erstellung der Sachbilanz auf Basis naturwissenschaftlicher Grundsätze die mathematische Grundlage für die Bilanzierung. Eine Besonderheit, die beim Auftreten von mehreren Produktflüssen als Output des Gesamtsystems notwendig wird, ist das Anwenden von Allokationsverfahren, um die Input- und Outputflüsse Prozessmoduls den verschiedenen Produktflüssen nach festgelegten Regeln (siehe DIN ISO 14044, Anhang D), z. B. entsprechend der Masse oder dem Exergiewert zuzuordnen.

In der Regel wird die Datenerhebung durch die Verwendung einer Sachbilanz-Datenbank z. B. von *ecoinvent Version 3.7.1* unterstützt, die bereits für viele Produkte z. B. zur Strom- und Wär-



meerzeugung, Herstellung von Werkstoffen aus Metallen, Kohlenwasserstoffen und Mineralien etc. eine Sachbilanz enthält. Im Anhang (Kap. A.2) ist ein kurzer Überblick zu den Bereichen, die die ecoinvent-Datenbank abdeckt, dargestellt.

Das Ergebnis der Sachbilanz des Produktlebensweges ist eine Input- und Outputbilanz des ausgehenden Produktflusses der definierten funktionellen Einheit sowie sämtlicher eingehender (z. B. Erze und Erdgas aus der Lagerstätte) und ausgehender Elementarflüsse (z. B. Emissionen in Luft, Wasser und Boden). Diese Elementarflüsse, die entweder der Umwelt ohne vorherige Behandlung durch den Menschen entnommen oder ohne abschließende Behandlung an die Umwelt abgegeben werden, bilden die Grundlage zur Ermittlung der potenziellen Umweltwirkungen im Rahmen der Wirkungsabschätzung, der nächsten Phase der Ökobilanz.

### 2.3.2.3. Wirkungsabschätzung

Auf Basis der Ergebnisse der Sachbilanz, die anhand der Elementarflüsse die Umwelteinflüsse ausweisen, werden bei der Wirkungsabschätzung die potenziellen Umweltwirkungen des Prozesssystems bestimmt und im Hinblick auf die Größe und Bedeutung bewertet. Die Sachbilanzergebnisse werden nach zuvor ausgewählten Wirkungskategorien, die relevante Umweltthemen wie z. B. den Klimawandel, die Ressourcenknappheit, die Biodiversität, die Flächenbelegung, die Human- und Ökotoxizität etc. abdecken, klassifiziert. In der Regel werden viele Umweltaspekte berücksichtigt, um ein möglichst vollständiges Bild über sämtliche Umweltwirkungen zu erhalten, weshalb häufig Wirkungsabschätzungsmethoden ausgewählt werden. Für nähere Details zu den verschiedenen methodischen Ansätzen der Wirkungsabschätzung und eine Übersicht zu Umweltindikatoren wird auf die folgende Literatur verwiesen [Buchgeister, 2012], [Fazio et al., 2018]. Für jede der Wirkungskategorien muss ein funktionaler Zusammenhang erstellt werden, der sich zur Operationalisierung der jeweiligen Veränderung des Umweltaspektes (Charakterisierung) eignet. Diese Charakterisierung wird auf der Grundlage messbarer Größen, den Wirkungsindikatoren, durchgeführt. Für den Klimawandel stammt der Wirkungsindikator aus dem vom IPCC erstellten Modell zur Erderwärmung, dessen Indikator auf Basis des Strahlungsantriebs von THG in der Atmosphäre in  $W/m^2$  gemessen wird. Dieser Effekt des Strahlungsantriebs lässt sich bei allen THG messen, wodurch sich ein relativer Bezug über das quantitative Ausmaß des Strahlungsantriebs zwischen den einzelnen THG herstellen lässt. Mit der Festlegung des THG  $CO_2$  mit dem Wirkungseffekt von 1 kg  $CO_2$ -Äquivalente pro 1 kg emittiertes  $CO_2$  als Referenz heranzuziehen, können die Wirkungseffekte anderer emittierter THG entsprechend in kg  $CO_2$ -Äquivalente umgerechnet werden. Für 1 kg emittiertes Methan ist der Wirkungseffekt 36,75 kg  $CO_2$ -Äquivalente hoch und für 1 kg emittiertes  $N_2O$  sind es 298 kg  $CO_2$ -Äquivalente. Diese Werte gelten für eine Verweildauer der THG von 100 Jahren in der Atmosphäre, die für die internationalen Klimaschutzabkommen herangezogen werden. Dies ist von Bedeutung, da der Wirkungseffekt von Methan bei einer Verweildauer von 20 Jahren auf 85 kg  $CO_2$ -Äquivalente steigt und daher immer stärker in den Fokus der Betrachtungen rückt.

### 2.3.2.4. Auswertung

In der letzten Phase werden die Ergebnisse aus der Sachbilanz und der Wirkungsabschätzung vor dem Hintergrund der Zielsetzung ausgewertet. Es findet die Identifizierung signifikanter Parameter statt, die einen wesentlichen Einfluss auf die Ökobilanz haben. Des Weiteren müssen die Vorgehensweise, Daten und Ergebnisse hinsichtlich ihrer Qualität und Zuverlässigkeit beurteilt werden. Dazu werden die Methoden der Vollständigkeitsprüfung, Sensitivitätsprüfung und Konsistenzprüfung herangezogen, die durch die Ergänzung einer Fehlerbetrachtung komplettiert werden. Im Anschluss daran werden die allgemeinen Schlussfolgerungen und Einschränkungen formuliert. Auf Grundlage dessen können dann Empfehlungen ausgesprochen werden, die im Zusammenhang mit der Zielsetzung und dem Untersuchungsrahmen der Ökobilanz stehen.

## 2.4. Wissensstand zur Ökobilanzierung der Schwarzerde

Dieses Kap. gibt einen Überblick zum aktuellen Stand der Wissenschaft zur Ökobilanzierung von Schwarzerde und deren Ergebnisse, um eine Einordnung der in dieser Arbeit erstellten Ökobilanzierung zu erhalten.

Ähnlich wie die Literatur zur Schwarzerde im Allgemeinen, verhält sich auch die Literatur zur Ökobilanzierung von Schwarzerde. Während es zahlreiche Ökobilanzierungen zur Herstellung und Anwendung insbesondere von Pflanzenkohle [Woolf et al., 2010], [Gaunt and Lehmann, 2008], [Yang et al., 2020], [Matušík et al., 2020] [Puettmann et al., 2020], [Bartzas and Komnitsas, 2017], [Peters et al., 2015], [Roberts et al., 2010], [Hersh and Mirkouei, 2019], [Papageorgiou et al., 2021], [Rajabi Hamedani et al., 2019], [Marzeddu et al., 2021] und zur Kompostierung [Martínez-Blanco et al., 2009], [Bartzas and Komnitsas, 2017], [Eymann et al., 2015], [Cadena et al., 2009], [Martínez-Blanco et al., 2010] gibt, ist die Anzahl an Studien zur Schwarzerde sehr überschaubar [Oldfield et al., 2018], [Stucki et al., 2019], [Jiang et al., 2021].

Zur besseren Unterscheidung und Abgrenzung bei der Beschreibung der folgenden Literaturstellen zur Ökobilanzierung von Schwarzerde, wird die zuvor eingeführte Terminologie zur Schwarzerde (s. Kap. 2.2.1) vorübergehend ausgesetzt und die Termini der einzelnen Artikel verwendet.

Jiang et al. [2021] arbeiteten den Vergleich zwischen der Anwendung von chemischem Dünger, Stallkompost und Pflanzenkohle-Stallkompost bezogen auf die Ernte von einer Tonne Weizen im Hinblick auf deren jeweilige Ökobilanz heraus. Das Erderwärmungspotenzial des Szenarios Stallkompost mit 10 % Pflanzenkohle-Zusatz konnte im Vergleich zum Szenario ohne Pflanzenkohle um 48,2 % reduziert werden und liegt bei 254 kg CO<sub>2</sub> pro kg Weizen.

Beim Vergleich von Torf mit Torfersatzprodukten bezüglich ihrer Umweltwirkungen haben Stucki et al. [2019] auch Pflanzenkohle-Kompost betrachtet. Die Herstellung von Pflanzenkohle aus

Gartenschnitt und Holzhackschnitzeln wurde dabei anhand der PYREG P500-Anlage der Firma *Verora GmbH* modelliert und der darauf folgende Kompostierungsprozess wurde aus der Vorgängerstudie von Eymann et al. [Eymann et al., 2015] (Grüngutkompostierung) übernommen und angepasst. Es zeigte sich eine Verbesserung des Erderwärmungspotenzials von 350 kg CO<sub>2</sub> pro m<sup>3</sup> Torf auf 48 kg CO<sub>2</sub> pro m<sup>3</sup> Pflanzenkohle-Kompost. Die Bilanzierung hinsichtlich der Anwendung und Wirkung des Pflanzenkohle-Kompostes wurde hier nicht betrachtet.

Die Studie von Oldfield et al. [2018] kommt dem Untersuchungsrahmen der Ökobilanz dieser Arbeit vermutlich am nächsten. Sie umfasst Feldstudien in drei Ländern mit unterschiedlichen Vorgehensweisen bei der Herstellung der Pflanzenkohle-Kompost-Substraten und unterschiedlichen Voraussetzungen bei der Anwendung (Bodentyp, Pflanzenart etc.). Pflanzenkohle wird aus Eichen-Restholz hergestellt und daraufhin entweder co-kompostiert oder mit reifem Kompost vermischt. Dabei wurde als Kompostiermaterial entweder Biomüll oder eine Mischung aus Oliventrester, Schafsdung und Grünschnitt verwendet. Die Substrate wurden dann alleine oder in Kombination mit mineralischem Dünger auf den Feldern appliziert. Bei der Bilanzierung der Prozessketten unter Berücksichtigung des Erderwärmungspotenzials haben sich eine Einspeicherung von 0,4 bis 11 kg CO<sub>2</sub> pro kg Frucht für Pflanzenkohle-Kompost-Substrate ergeben. Trotz der schlechteren Bilanz des Erderwärmungspotenzials im Vergleich zur isolierten Anwendung von Pflanzenkohle als auch von Kompost zeigt der Pflanzenkohle-Kompost das Potenzial einer NET auf.

Aus dem Literaturreview zur Ökobilanzierung von Schwarzerde ergibt sich, dass es zwar bereits Studien zu Pflanzenkohle-Komposten gibt, allerdings ohne dokumentierte Zusätze von Mineralstoffen wie Gesteinsmehl, ohne den Prozess der Erdenherstellung oder ohne den Begriff der (Roh-)Schwarzerde. Da Pflanzenkohle-Kompost in dieser Arbeit jedoch als (Roh-)Schwarzerde bezeichnet wird, kann von einer kompletten Neuheit des Themas dieser Arbeit nicht die Rede sein. Im deutschsprachigen Raum stellt diese Arbeit die bis dato einzige Ökobilanzierung von der Herstellung bis zum Einsatz von Schwarzerde dar.

## 3. Erstellung der Ökobilanz

In diesem Kap. wird das Vorgehen und die Durchführung bei der Ökobilanzierung der Prozesskette von der Herstellung bis zum Einsatz der Schwarzerde beschrieben. Es werden die zu Beginn festgelegten **Rahmenbedingungen** zur Zielsetzung, zu den FU und den Systemgrenzen vorgestellt und die Erstellung der darauf aufbauenden Sachbilanz erläutert. Dabei wird die Sachbilanz mit der **Prozessmodellierungssoftware openLCA** abgebildet, mit welcher auch die spätere Wirkungsabschätzung und Auswertung der Ergebnisse durchgeführt werden (Kap. 4).

### 3.1. Zielsetzung und Festlegung des Untersuchungsrahmens

In diesem Unterkapitel erfolgt die erste Phase zur Erstellung der Ökobilanz. Es werden die grundlegende Zielsetzung, die FU und die Systemgrenzen der untersuchten Prozesskette formuliert.

#### 3.1.1. Zielsetzung

Das Hauptziel der Ökobilanz ist die Bestimmung von potenziellen Umweltwirkungen im Hinblick auf die Erderwärmung, die im Zusammenhang mit der Herstellung und Nutzung von Schwarzerde stehen. Es wird der ökologische Fußabdruck (THG-Emissionen) der gesamten Prozesskette, von der Biomasseerzeugung über die Herstellung von Pflanzenkohle mittels Pyrolyse bis zur Nutzung der Schwarzerde in verschiedenen Nutzflächen berechnet und Haupteinflussgrößen bestimmt. Auf dieser Basis werden sowohl eine Empfehlung zur Schwarzerde und Ihrer Anwendung als NET ausgesprochen sowie mögliche Verbesserungen bei der Herstellung und Nutzung vorgeschlagen.

#### 3.1.2. Systemgrenze

Abb. 3.1 zeigt den Untersuchungsrahmen der Ökobilanz von der Herstellung bis zur Nutzung von Schwarzerde. Die Prozesskette innerhalb des Untersuchungsrahmens ist in fünf Prozessschritte *Biomasseerzeugung*, *Pyrolyse*, *Umwandlung zu Schwarzerde*, *Ausbringung* und *Nutzung* eingeteilt. Die Systemgrenzen des Untersuchungsrahmens sind auf den deutschsprachi-

### 3. Erstellung der Ökobilanz

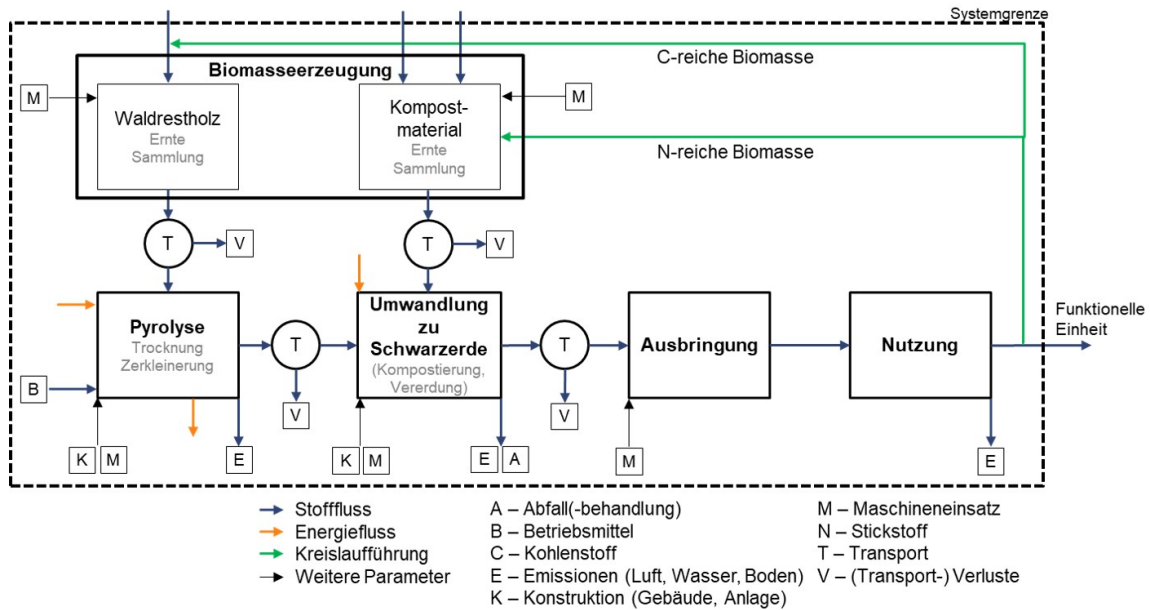
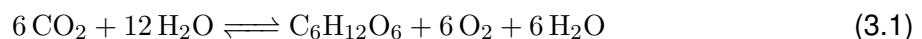


Abbildung 3.1.: Untersuchungsrahmen der Ökobilanz von der Herstellung bis zur Nutzung von Schwarzerde.

Neben den Stoff- und Energieflüssen sind weitere (indirekte) Parameter abgebildet, die bei der Ökobilanzierung ebenfalls berücksichtigt werden. Die Option der Kreislaufführung im Sinne der Kreislaufwirtschaft ist in „Grün“ dargestellt.

gen Raum festgelegt. Demnach werden bei der Datenerhebung bevorzugt Daten aus Deutschland aber auch aus der Schweiz und Österreich verwendet. Zum Pyrolyseprozess sind bspw. ausschließlich Anlagenhersteller und -betreiber aus dem deutschsprachigen Raum befragt worden. Der Anlagenbetrieb wird mit Daten für Deutschland modelliert. Dazu zählt u.a. der Strommix für Deutschland im Jahr 2018 (s. Kap. A.32), der für alle Prozesse innerhalb des Untersuchungsrahmens verwendet wird. Dieser Strommix wird ausgewählt, da das Jahr 2018 ohne die Auswirkungen von Covid-Maßnahmen, stark ansteigender Rohstoffpreise oder eines Krieges stellvertretend für eine hohe Stromnachfrage (hohe Auslastung der (Export-)Industrie und hohe Stromexportmenge ins europäische Verbundnetz) steht und durch die Tendenz der Zunahme an erneuerbaren Energien (EE) am Strommix als konservative Abschätzung einzuordnen ist. Ein konkreter zeitlicher Bezug des Untersuchungsrahmens wird aufgrund der vielen Datenquellen mit unterschiedlichen zeitlichen Bezügen nicht definiert. Dennoch werden möglichst aktuelle Daten von hoher Datenqualität verwendet. Für sämtliche Vorketten, z. B. der Herstellung von Anlagenkomponenten, Bauteilen und Betriebsmitteln, werden europäische Märkte angesetzt.

Beim natürlichen Prozess der Biomasseerzeugung wandeln die Pflanzen mittels Photosynthese, nach Gleichung 3.1,  $\text{CO}_2$  aus der Luft in Glucose um, dem Ausgangsmolekül bei der Bildung pflanzlicher Biomasse.



Als biogener Ausgangsstoff für die Pyrolyse wird ausschließlich Waldrestholz berücksichtigt. Dieses bildet diejenige Biomasse ab, die bei der Holzernte im Wald zurückbleibt, d.h. Äste, Laub, Verschnitt. Das Waldrestholz wird für den späteren Transport vorbereitet (Sammlung inklusive Rücken und Zuschnitt) und dann zur Pyrolyseanlage befördert. Der Prozessschritt der **Biomasseerzeugung** umfasst also die Entstehung, die Ernte und Sammlung der Biomasse. Alle Transportprozesse innerhalb der Prozesskette werden in der späteren Auswertung unter **Transporte** zusammengefasst.

Um den Feed-Anforderungen der Pyrolyseanlage gerecht zu werden, findet eine Zerkleinerung und Trocknung des Waldrestholzes zu Holzhackschnitzeln statt. Die Zerkleinerung und Trocknung wird in dem Prozessschritt der **Pyrolyse** zusammengefasst. Die beim Pyrolyseprozess entstehende Gasphase wird verbrannt und energetisch verwertet, während die erzeugte Pflanzenkohle, vor dem Hintergrund der stofflichen Verwertung, zur Kompostierungsanlage transportiert wird. Neben der Pflanzenkohle werden auch das Kompostiermaterial (kommunaler Grünschnitt und Biomüll), das Gesteinsmehl und weitere Mineralien zur Kompostierungsanlage befördert und vorbereitet. Bei der Kompostierung wird ein Teil des Ausgangsmaterials nicht vollständig verstoffwechselt, sodass dieser Bestandteil bspw. durch das Sieben des reifen Komposts getrennt wird. Dieser Siebrückstand (Grobgut) muss nicht entsorgt werden, sondern wird beim Aufsetzen eines neuen Kompostes dem Prozess zurückgeführt. Dabei liefert der mit Mikroorganismen aufgeladene Siebrückstand, die für den Kompostierungsprozess notwendigen Startkulturen. Der Prozessschritt der **Umwandlung zu Schwarzerde** umfasst den Kompostierungsprozess und die Erdenherstellung.

Die entstandene Schwarzerde wird daraufhin zum Kunden transportiert, welcher die Schwarzerde auf der Nutzfläche ausbringt. Dieser Vorgang wird mit dem Prozessschritt **Ausbringung** zusammengefasst. Die Prozesskette endet schließlich mit dem Prozessschritt der **Nutzung** im Boden. Da an diesem Punkt wieder neue Biomassen entsteht, kann die abgebildete Prozesskette auch als Kreislaufsystem im Sinne einer zirkulären Wirtschaft bezeichnet werden.

In der gesamten Prozesskette werden nicht nur die Material- und Energieaufwände und Emissionen berücksichtigt, die ausschließlich im direkten Bezug zu dem Betrieb/der Verarbeitung stehen, sondern auch die, die indirekt mit dem Betrieb zusammenhängen (Produktion der Betriebsmittel)(s. Abb. 3.1) oder als „Rucksack“ aus vorgelagerten Prozesse, wie z. B. der Metallverarbeitung, mitgebracht werden. Neben den vorgelagerten (engl. upstream) werden auch die nachgelagerten (engl. downstream) Prozesse in Form von Abfallströmen, -transporten und -behandlungen berücksichtigt. So wird das Ziel verfolgt, alle Aufwände, vom Abbau der Rohstoffe über deren Verarbeitung und die eigentliche Herstellung der Schwarzerde und ihre Anwendung bis hin zur Entsorgung der Materialien, in die Berechnung miteinzubeziehen.

#### 3.1.3. Funktionelle Einheiten

Da in dieser Arbeit die Anwendung von Schwarzerde auf unterschiedlichen Nutzflächen betrachtet wird und sich daraus verschiedene Prozesssysteme ergeben, werden zwei unter-

schiedliche FU definiert:

1. FU: Die Nutzung von **16,5 Tonnen Trockenmasse an Schwarzerde auf einem Hektar landwirtschaftlicher Fläche in drei Jahren** und
2. FU: Die Nutzung von **2,25 m<sup>3</sup> Schwarzerde zur Pflanzung eines neuen Stadtbaumes in drei Jahren.**

Bis zum Prozess der *Umwandlung zu Schwarzerde* sind die zugehörigen Prozesssysteme identisch, danach werden unterschiedliche Prozessketten mit verschiedenen Randbedingungen verfolgt.

Als biogenes Ausgangsmaterial für die Pyrolyse wird kohlenstoffreiche Biomasse (Waldrestholz) verwendet, die nach einem Zerkleinerungs- und Trocknungsprozess dem Pyrolysereaktor zugeführt wird. Das Feedmaterial muss dabei eine Korngröße  $< 60$  mm, einen Heizwert  $> 12$  MJ/kg Trockenmasse und einen Wassergehalt  $< 25$  M.-% aufweisen.

Um die rechtlichen Anforderungen bei einer Anwendung im Boden (s. Kap. 2.2.6) zu erfüllen, findet der Pyrolyseprozess bei Temperaturen  $> 450$  °C, atmosphärischem Druck und unter hohen Verweilzeiten (langsame Pyrolyse, s. Kap. 2.2.3.2) statt. Das dabei entstehende Pyrolysegas wird vollständig, inklusive kondensierbarer Gase, zur Erzeugung von Wärme und/oder Elektrizität verwendet.

Die Pflanzenkohle wird vor dem Kompostierungsprozess mit dem Kompostiermaterial, bestehend aus stickstoffreicher, pflanzlicher Biomasse wie z. B. Grünschnitt, kommunalem Biomüll, Altkompost/Siebresten etc., und dem Gesteinsmehl vermischt und nimmt dabei einen Anteil von 10 M.-% an der Gesamtmischung ein. Der Kompostierungsprozess wird durch regelmäßiges Wenden oder Belüften aerob geführt und dauert mindestens acht Wochen. Nicht vollständig verstoffwechseltes Kompostiermaterial wird durch Siebung von dem fertigen Kompost getrennt und beim Aufsetzen eines neuen Kompostes wiederverwendet. Etwa 10 vol.-% des Kompostes werden somit bei jedem Kompostierungsprozess entnommen. Die Siebreste dienen dabei als Trägermaterial für mikrobielle Starterkulturen, die zur Initiierung des nachfolgenden Kompostierungsprozess benötigt werden.

Der Prozess der Erdenherstellung wird durch die Zugabe von Mineralien wie z. B. Lehm, Sand, Ziegelsplitt etc. zu dem fertigen Kompost realisiert. Da für die städtische Anwendung nach dem Stockholm-Modell eine Mineralienzugabe nicht vorgesehen ist, unterscheiden sich die Prozessketten entsprechend der zwei definierten FU. Daher wird im Folgenden zunächst das Produktsystem der ersten FU und anschließend das der zweiten FU aufgeführt.

Die Schwarzerde wird auf der landwirtschaftlichen Nutzfläche mit einer Anwendungsrate von 16,5 Tonnen Trockenmasse pro Hektar einmal in drei Jahren ausgebracht (Berechnung der Anwendungsmenge in A.4 Tab. A.21) und mittels Pflügen in den Boden eingearbeitet. Als Effekte im Boden werden der weitere Abbau, die Auswaschung und Emission von Bestandteilen der Schwarzerde betrachtet.

Bei der Prozesskette, die in der Definition der zweiten FU einbegriffen ist, wird eine Pflanzgrube für den neuen Stadtbaum ausgehoben und anschließend mit einer Kombination aus Schwarzerde und Strukturmaterial wie z. B. Schotter verfüllt. Dabei wird pro neu-gepflanztem Stadtbaum  $2,25 \text{ m}^3$  (entspricht  $1080 \text{ kg}$  Frischmasse) Schwarzerde eingesetzt. Die Wirkung der Schwarzerde im Boden wird, wie für *FU 1*, mit der Auswaschung und Emission von Bestandteilen und dem Abbau der Schwarzerde über drei Jahre berücksichtigt.

## 3.2. Sachbilanz

Zur Quantifizierung der Stoff- und Energieflüsse, die als Input oder Output in dem zuvor definierten Untersuchungsrahmen auftreten, wird in Kap. 3.2.1 eine **Datenerhebung** durchgeführt. Die dabei gewonnenen Rohdaten werden bei der **Datenberechnung** in Kap. 3.2.2 umgerechnet und auf die spezifischen Referenzflüsse der Prozessmodule normiert. In Kap. 3.2.3 **Allokation** wird die Zuordnung der Input- und Outputströme einzelner Prozesse auf die jeweiligen Produkte und Nebenprodukte beschrieben.

### 3.2.1. Datenerhebung

Bei der Datenerhebung werden bevorzugt Primärdaten ermittelt, also solche Daten oder Messgrößen, die direkt vom Hersteller oder Betreiber von Anlagen zur Verfügung gestellt werden. Daher wird neben der Durchführung einer Literaturrecherche auch eine Nachfrage in Form eines Fragenkataloges (siehe Anhang A.3) bei Pyrolyseanlagenherstellern und -betreibern im deutschsprachigen Raum gestellt. Vorab wird der Einfluss des Pyrolyseprozesses auf die Gesamtumweltwirkung der Prozesskette als signifikant vermutet, was den besonderen Aufwand beim Stellen der Nachfrage und Auswertung der Antworten begründet.

Sofern keine geeigneten Primärdaten zur Verfügung standen, werden Sekundärdaten aus der Literatur, aus Internetrecherchen oder aus der *ecoinvent*-Datenbank Version 3.7.1. (*ecoinvent-db*) verwendet. Sekundärdaten stellen jene Daten dar, die eine Umrechnung der Primärdaten/Rohdaten, oftmals mithilfe weiterer Annahmen und Randbedingungen, beinhalten und daher zu größeren Ungenauigkeiten und Unsicherheiten (Fehlerrechnung) bei der Berechnung führen können.

Für diese Ökobilanz wird insbesondere auf die Datensätze aus der *ecoinvent-db* zu Werkstoffen, Konstruktion, Transport, Landwirtschaft, Strom und Wärme zurückgegriffen. Die, durch umfassende Dokumentation und Qualitätssicherung, etablierten Datensätze erlauben somit eine konsistente Berechnung der vollständigen Prozesskette.

Für die *Biomasseerzeugung* werden die vorhandenen Datensätze (*Landwirtschaft*) aus der *ecoinvent-db* verwendet, die geeignete Daten zur Entstehung von hölzerner Biomasse, deren Ernte und Sammlung liefern. Hierbei werden die Photosyntheseleistung von Pflanzen und die



Material- und Energieaufwände, zu denen u.a. der Kraftstoffbedarf und Maschineneinsatz bei der Waldarbeit zählen, berücksichtigt. Für alle Transportprozesse, die im Untersuchungsrahmen auftauchen, wird ebenfalls auf die Datensätze aus der ecoinvent-db zurückgegriffen und die Masse des zu befördernden Gutes sowie die zurückzulegende Distanz mit dem jeweiligen Transportmittel miteinbezogen. Material, das in einigen Transportprozessen zur Verpackung des Transportgutes benötigt wird, wird mithilfe von Literaturwerten abgeschätzt. Für Verluste des zu befördernden Gutes durch Verladen, Transport und Entladen werden ebenfalls Werte aus der Literatur angesetzt.

Bei der Vorbehandlung der Biomasse (Zerkleinerung und Trocknung) wird wiederum auf vorhandene Datensätze (Landwirtschaft) aus der ecoinvent-db zurückgegriffen. Zur Erhebung von Daten zum *Pyrolyseprozess* wird ein Fragenkatalog zusammengestellt, um primäre Informationen zu den Pyrolyseanlagen und Prozessen der verschiedenen Hersteller und Betreiber zu erhalten. Es werden insbesondere Daten angefragt zum Prozess und zur Anlage (Verfahrensfließschema, Prozessbedingungen, Reaktorsystem etc.), zur Massen- und Energiebilanz, zu Anforderungen, Zusammensetzungen und Eigenschaften der Input- und Outputgrößen (Biomasse, Pflanzenkohle, Luftemissionen durch Abgase etc.), zum Bedarf an Betriebsmitteln und Maschinen, die für den Anlagenbetrieb benötigt werden, zum Material- und Energieaufwand für Reparatur und Instandhaltung der Anlage, zur Konstruktion der Anlage (Menge und Art der verwendeten Materialien) und zum Flächenbedarf der Anlage (s. A.3). Dieser Fragenkatalog wird an 49 Unternehmen (Anlagenhersteller/-betreiber und Pflanzenkohlehersteller) versendet und von elf Unternehmen (*Biomaccon, Pyreg, Regenis, Carbon Technik Schuster, AWS Freiburg<sup>1</sup>, Finzelberg, Grossenbacher Grüngut, IWB<sup>2</sup>, Carbo-FORCE, Kaskad-E und ProE Bioenergie*) in unterschiedlichem Umfang bearbeitet und zurückgesendet. Rückfragen werden mit einigen Unternehmen telefonisch, per Schriftverkehr oder per Videokonferenz besprochen. Für die Fragen, die dabei nicht beantwortet werden konnten, wird eine Literaturrecherche durchgeführt. Hierbei werden insbesondere Daten recherchiert, um die Emissionen, die bei der Verbrennung der Pyrolysegase zur Wärmeenergieerzeugung entstehen, abzuschätzen und um einige, stark variierende Hersteller- und Betreiberangaben im Fragenkatalog mit Literaturwerten vergleichen und einordnen zu können.

Beim Prozess der *Umwandlung zu Schwarzerde* wird der Betrieb einer Kompostierungsanlage aus dem Datensatz der Abfallbehandlung der ecoinvent-db entnommen. Dieser wird hinsichtlich einer Zerkleinerung des zu kompostierenden Gutes (ecoinvent-db), der verwendeten Materialien und der bei der Kompostierung emittierten Gase (beides aus Literaturangaben) ergänzt und modifiziert (s. Kap. A.5). Dazu wird ebenfalls eine Literaturrecherche mit dem Fokus auf der Massen- und Energiebilanz sowie der Identifizierung und Quantifizierung der Outputgrößen bei der Kompostierung betrieben.

Das *Ausbringen der Schwarzerde* in die landwirtschaftliche Nutzfläche wird mit dem Betrieb eines Großflächenstreuer und das Einarbeiten mittels Pflug auf Basis der ecoinvent-db reali-

---

<sup>1</sup>AWSF - Abfallwirtschaft und Stadtreinigung Freiburg

<sup>2</sup>IWB - Industrielle Werke Basel

siert. Für die Anwendung in der städtischen Fläche wird der Betrieb eines Baggers und der zusätzliche Bedarf an Strukturmaterial (nach dem Stockholm-Modell) berücksichtigt.

Für die *Nutzung der Schwarzerde* im Boden wird der Abbau der Schwarzerde und der damit einhergehenden Emissionen in Luft, Wasser und Boden betrachtet. Dazu werden Werte aus Literatur für den Kohlenstoff-Abbau, die Stickstoff-Emissionen, die Phosphor-Emissionen und die Schwermetall-Emissionen verwendet.

#### 3.2.2. Datenberechnung

Bei der Datenberechnung werden die bei der Datenerhebung ermittelten Rohdaten insofern modifiziert, dass sie für die einzelnen Input- und Outputbilanzen der jeweiligen Prozessmodule verwendet werden können. Dazu werden Umrechnungsgrößen (Dichte, Heizwert etc.) herangezogen, Annahmen getroffen und Berechnungsverfahren aufgestellt. Grundvoraussetzung jeder Berechnung ist, dass das Gesetz zur Erhaltung der Masse und Energie in den einzelnen Prozessmodulen erfüllt wird. Die Erläuterungen zu der Datenberechnung werden im Folgenden exemplarisch für den Prozess der Holz-Zerkleinerung und -Trocknung vorgestellt. Die gesamte, umfassende Dokumentation und Erklärung der Datenberechnung inklusive der jeweiligen Input- und Outputbilanzen ist im Anhang dargelegt (s. A.5).

Beim **Pyrolyseprozess** der PX1500-Anlage der Firma Pyreg werden verschiedene Anforderungen an das Inputmaterial gestellt. Neben einem Wassergehalt < 20 M.-% und einem Heizwert > 10 MJ/kg (bei 80 M.-% Trockenmasse) wird auch eine Partikelgröße < 30 mm gefordert, weshalb ein Zerkleinerungs- und Trocknungsprozess vorgeschaltet ist. Der Zerkleinerungsprozess wird mit dem ecoinvent-Prozess „*wood chipping, industrial...*“ ohne weitere Modifikationen abgebildet.

Da die Firma IWB, als Betreiber einer PX1500 Anlage, auch den vorbehandelten Trocknungsprozess durchführt, können mit diesen Angaben [IWB, 2022] die vorhandenen Prozessen der ecoinvent-db überarbeitet und auf den spezifischen Untersuchungsrahmen dieser Arbeit angepasst werden. Dabei wird die Masse des (Band-)Trockners mit 10 Tonnen angenommen und auf dieser Basis sowie aus den Angaben zu den verbauten Materialien eines Bandrockners nach Dieckmann et al. [2016], die Input- und Outputflüsse der vorhandenen ecoinvent-Prozesse „*technical wood drying facility*“ und „*conveyor belt production*“ skaliert und modifiziert. Weiter wird auf Basis der IWB Angaben 17,2 Tonnen ((Leer-)Gesamtgewicht) für Schubbodencontainer („*intermodal shipping container*“) zur automatisierten Beschickung der Pyrolyseanlage, 9,3 Tonnen für Rohrleitungen, Halterungen und Komponenten der Holz-Zerkleinerung, 5,5 Tonnen für die gesamte Fördertechnik, 0,7 Tonnen für Wärmespeicher und 0,1 Tonnen für elektronische Bauteile angenommen. Reparatur- und Instandhaltungsaufwände, die über die gesamte Lebensdauer der Anlage anfallen, werden mit 1 M.-% der Gesamtmasse der Anlage berücksichtigt. Diese Annahme wird ebenso für alle weiteren Prozessmodule der Sachbilanz, bei denen ein unbekannter Instandhaltungsaufwand abzuschätzen ist, getroffen.

### 3. Erstellung der Ökobilanz

Es wird angenommen, dass die Zerkleinerungs- und Trocknungsanlage auf dem Betriebsgelände der Pyrolyseanlage steht. Die gesamte Betriebsfläche wird mit 550 m<sup>2</sup> angesetzt (IWB-Angabe), wovon die Pyrolyseanlage 91 m<sup>2</sup> beansprucht. Außerdem wird der Bau und Flächenbedarf einer Halle mit einer Fläche von 300 m<sup>2</sup> berücksichtigt (Annahme nach IWB-Angabe) und mit dem ecoinvent-Prozess „*building, hall steel construction*“ abgebildet. In diesem Prozess ist ein Betonfundament bereits inbegriffen, sodass für das gesamte Betriebsgelände, abzüglich der Halle, ein Betonfundament mit einer Fläche von 250 m<sup>2</sup> und 0,3 m Tiefe (nach Stenzel [2005]) berechnet wird. Um die Aufwände für die Konstruktion auf den Referenzfluss von 1 kg getrocknete Holzhackschnitzel zu beziehen, wird mit einem stündlichen Output-Durchsatz von 367,5 kg/h (bei 80 M.-% Trockenmasse) bei 7.500 jährlichen Betriebsstunden (IWB- und Pyreg-Angaben) über 50 Jahre (Lebensdauer nach den ecoinvent-Prozessen) gerechnet (Gl. 3.5). Mit dem errechneten Wert taucht die „*Herstellung Holz-Zerkleinerungs- und -Trocknungsanlage*“ im „*Prozess der Holz-Zerkleinerung und -Trocknung*“ auf, der den Betrieb der Anlage darstellt. Dessen Sachbilanz ist in Tab. 3.1 abgebildet.

Tabelle 3.1.: Sachbilanz: Prozess der Holz-Zerkleinerung und -Trocknung - Pyreg

Inputflüsse		
Waldrestholz, 50 % Trockenmasse, Standort Pyrolyseanlage	1,6	kg
electricity, high voltage	0,097	MJ
Herstellung Holz-Zerkleinerungs- und Trocknungsanlage	7,256E-09	Stück
Machine operation, 18,64 kW ≤ P ≤ 74,5 kW	4,082E-05	h
Nutzwärme aus Pyrolyseprozess	1,714	MJ
wood chipping, industrial	1,6	kg
Energieinhalt Waldrestholz 50 % Trockenmasse	14,772	MJ
Outputflüsse		
Holzhackschnitzel, 80 % Trockenmasse	1,0	kg
Energieinhalt Holzhackschnitzel, 80 % Trockenmasse	14,772	MJ
Verdunstetes Wasser	0,0006	m <sup>3</sup>
Energieverlust	1,484	MJ
Energieinhalt verdunstetes Wasser	1,555	MJ

Die Energie des Holzes (80 % TM) wird auf Basis der Massen- und Energiebilanz für den Pyrolyseprozess von Pyreg bestimmt (Gl. 3.2) und für die Berechnung (Gl. 3.3) des Energieinhalts des Holzes (50 % TM) verwendet. Anhand der Wasserverdunstung durch die Trocknung von 50 % auf 20 % TM wird die Masse für das einzusetzende Waldrestholz berechnet (Gl. 3.4). Zur Ermittlung des Strombedarfs der Trocknungsanlage wird die Differenz aus IWB (50 kW, Pyrolyse + Trocknung) und Pyreg (40 kW, Pyrolyse) zu 10 kW berechnet und diesen durch Division mit 367,5 kg/h (Output-Holzdurchsatz, 80 %TM) auf den Referenzfluss bezogen. Da in der Konstruktion der Anlage das gesamte Betriebsgelände enthalten ist, wird auch der Maschinenbedarf für den Abtransport der Pflanzenkohle diesem Prozess zugeordnet. Dieser berechnet sich aus 10 min Arbeitszeit (Annahme) pro Big Bag (1 Tonne Pflanzenkohle), dem Pflanzenkoh-

ledurchsatz (befeuchtete Pflanzenkohle, 90 kg/h) und dem Holzdurchsatz (367,5 kg/h) (Gl. 3.6). Der Wert für die Nutzwärme basiert auf dem Mittelwert der IWB-Angabe (100-250 kW), dem Pflanzenkohledurchsatz (trockene Pflanzenkohle, 72 kg/h) und dem Holzdurchsatz (367,5 kg/h) (Gl. 3.7). Durch die Abwärme aus dem Pyrolyseprozess ist damit kein weiterer Wärmestrom zur Trocknung des Holzes notwendig. Die verdunstete Wassermenge bei der Trocknung wird aus der Massenbilanz und mit der Dichte von flüssigem Wasser von 1.000 kg/m<sup>3</sup> errechnet (Gl. 3.8). Der Enthalpiestrom des verdunsteten Wassers wird auf Basis der Enthalpien von Wasser bei 1 bar und 100 °C (2.675,7 kJ/kg) und 20 °C (83,836 kJ/kg) ermittelt (Gl. 3.9) [Stephan and Mayinger, 2013]. Da durch den Trocknungsvorgang der absolute Wert für den chemischen Energieinhalt des Holzes konstant bleibt, entspricht der Energieinhalt der Holzhackschnitzel dem Energiegehalt des Waldrestholzes. Die im Prozess abgegebene Wärmemenge wird aus der Energiebilanz errechnet (Gl. 3.10).

$$H_{U,Holz}(80\% TM) = \frac{\dot{H}_{Holz,aus}}{\dot{M}_{Holz,aus}} \quad (3.2)$$

$$H_{U,Holz}(50\% TM) = H_U(80\% TM) \cdot \frac{0,5}{0,8} \quad (3.3)$$

$$\dot{M}_{Holz,ein} = \dot{M}_{Holz,aus} \cdot \frac{0,8}{0,5} \quad (3.4)$$

$$7,256E-09 \frac{Anlagen}{kg Holzoutput} = \frac{1}{50 a \cdot 7500 h/a \cdot 367 kg/h} \quad (3.5)$$

$$4,082E-05 \frac{h}{kg Pflanzenkohle} = 10 min \cdot \frac{1 h}{60 min} \cdot \frac{90 kg}{1000 kg} \cdot \frac{1}{367,5 kg/h} \quad (3.6)$$

$$1,714 \frac{MJ}{kg Pflanzenkohle} = \frac{175 kW}{72 kg/h} \cdot \frac{72 kg/h}{367,5 kg/h} \quad (3.7)$$

$$M_{ein} = M_{aus} \Leftrightarrow M_{Holz,ein} = M_{Holz,aus} + M_{Wasser,aus} \quad (3.8)$$

$$H_{Wasser,aus} = M_{Wasser,aus} \cdot (H_{Wasser,(g)}(100^\circ C) - H_{Wasser,(fl)}(20^\circ C)) \quad (3.9)$$

$$H_{ein} = H_{aus} \Leftrightarrow H_{Holz,ein} + H_{therm.} + H_{elektr.} = H_{Holz,aus} + H_{Wasser,aus} + H_{Verlust} \quad (3.10)$$

Die vollständige Erklärung und Dokumentation der Datenberechnung aller Prozessmodule des Untersuchungsrahmens sind im Anhang A.5 aufgeführt.

### 3.2.3. Allokation

In den beiden modellierten Produktsystemen zur Herstellung und Anwendung von Schwarzerde wird im Pyrolyseprozess, neben dem Zielprodukt *Pflanzenkohle*, auch Pyrolysegas erzeugt, das nachfolgend verbrannt und im Weiteren als thermische und/oder elektrische Energie genutzt wird. Da die Menge an erzeugter thermischer Energie aus der Verbrennung des Pyrolysegasen den Bedarf im Trocknungsprozess der Biomasse überschreitet, kann diese überschüssige thermische Energie für unterschiedliche energetische Nutzungen außerhalb des Produktsystems verwendet werden. Damit handelt es sich um ein Mehrproduktsystem. Das bedeutet,

die Ergebnisse an Input- und Outputflüssen der Sachbilanz sind entweder den entstehenden Produkten mittels einem Allokationsverfahren zuzuordnen oder es ist eine Erweiterung des Produktsystems vorzunehmen, um die Allokation zu vermeiden. Allokationsverfahren sind z. B. physikalische oder ökonomische Zuordnungen der Input- und Outputflüsse zu den Produktflüssen. Damit geht eine subjektive Einschätzung einher, die die Ergebnisse der Ökobilanz und die Schlussfolgerungen stark beeinflussen. Aus diesem Grund priorisiert die Norm zur Ökobilanz (DIN EN 14040 und 14044) das Vorgehen zur Vermeidung der Allokation, das allerdings andere Probleme mit sich bringt, z. B. die Auswahl, um welche energetischen Nutzungszwecke das Produktsystem erweitert wird, und damit den Aufwand für die Modellierung beträchtlich erhöht, der in dieser Arbeit nicht leistbar ist. Deshalb wird auch aus der Erkenntnis heraus, dass zur Nutzung der energetischen Produkte eine weitere Infrastruktur z. B. ein Wärmetauscher zur Einspeisung der thermischen Energie in eine Fernwärmeleitung bzw. ein Anschluss an das öffentliche Stromnetz erforderlich ist, ein konservativer Ansatz gewählt. Dieser Ansatz sieht vor, dass die zusätzlich erzeugten Energieprodukte im Ergebnis nicht berücksichtigt werden und in der Auswertung (vgl. Kap. 4.2) separat aufgeführt werden. Dies erfolgt mit der Berücksichtigung einer Gutschrift, die aus der überschüssigen Energiemenge und der Berechnung eines Referenzproduktsystems (Produktsystem, das die Erzeugung der entsprechenden Energieform abbildet und damit ein Maß für die emittierten THG in Bezug auf die Energiemenge ist) aus der ecoinvent-db berechnet wird (s. Erklärung in Kap. 4.2). Innerhalb der Sensitivitätsanalyse in Kap. 4.2.2 werden außerdem verschiedene Annahmen zur energetischen Nutzung getroffen, um aufzuzeigen, welche Verbesserungspotenziale vorhanden sind, wo Grenzen liegen und wie zukünftige Systeme aussehen können.

### 3.3. Prozessmodellierung in openLCA

Die Software **openLCA**<sup>3</sup> stellt eine Arbeitsumgebung dar, mit der Nachhaltigkeitsbewertungen und Ökobilanzen erstellt werden können. Es können u.a. Flüsse (Flows), Prozessmodule (Processes), Produktsysteme (Product systems) und Projekte (Projects) selbst erstellt oder durch importierte Sachbilanz-Datenbanken, wie z. B. *ecoinvent Version 3.7.1*, bereitgestellt werden. Abb. 3.2 zeigt einen Ausschnitt aus der *openLCA*-Software zu dem Prozess „Prozess der Holz-Zerkleinerung und -Trocknung“. In der Datenbank *ecoinvent\_371\_cutoff\_unit\_20210104* sind auf der linken Seite *Projekte* (Vergleich von Produktsystemen), *Produktsysteme* (Verknüpfung mehrerer Prozessmodule), *Prozesse* (Prozessmodule mit Input- und Outputflüssen/-bilanzen), *Flüsse* sowie *Indikatoren und Parametern* (Indicators and parameters) (u.a. Wirkungsabschätzungsmethoden und Definition von lokalen oder globalen Parametern) aufgelistet. Die Elemente dieser Kategorien erscheinen nach dem Öffnen in der oberen Bearbeitungsleiste und können eingesehen und modifiziert werden.

Für jeden Fluss eines Prozessmoduls werden die Ergebnisse der Datenberechnung, d.h. die auf den **Referenzfluss** normierten Daten, eingesetzt und die Input- und Outputbilanz jedes

---

<sup>3</sup>*openLCA - open Source*, freier, kostenloser Zugang, <https://www.openlca.org/download/>

### 3. Erstellung der Ökobilanz

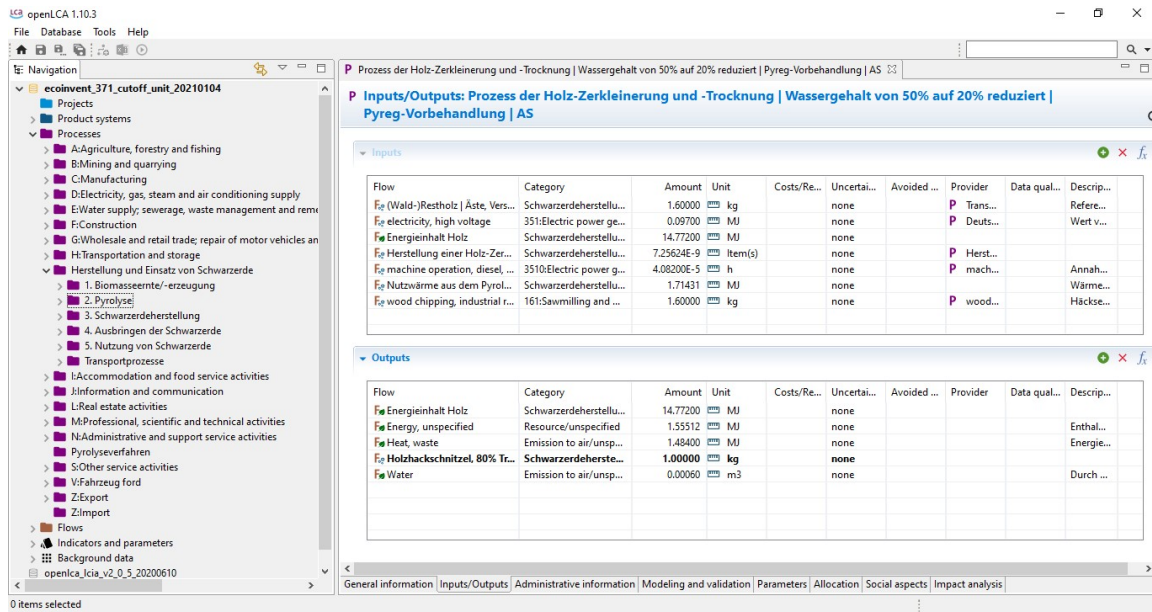


Abbildung 3.2.: Modellierungssoftware *openLCA Version 1.10.3*.  
Ausschnitt des Prozessmoduls „Prozess der Holz-Zerkleinerung und -Trocknung“

Prozessmoduls in Bezug zum Referenzfluss „Holzhackschnitzel, 80 % Trockenmasse“ erstellt (vgl. Abb. 3.2). Durch das Hinzufügen von Lieferprozessen (Provider) zu jedem Inputfluss und teilweise auch zu Outputflüssen (nachgelagerte Prozesse wie z. B. Abfallbehandlung) werden Prozessmodule miteinander verknüpft und können Produktsysteme erstellt werden. Für die landwirtschaftliche Nutzung von Schwarzerde ist ein solches Produktsystem in Form eines Modellgraphen in Abb. 3.3 dargestellt.

Ausgehend vom letzten Prozessmodul (Referenzprozess) des Produktsystems (hier die Nutzung/Effekte der Schwarzerde im Boden) kann das gesamte Produktsystem als Netzwerk aus Prozessmodulen aufgespannt werden. Jedes Prozessmodul ist dabei als Box dargestellt, die durch „Doppelklick“ die zugehörigen Input- und Output-Produktflüsse darstellt und bei der die vor- und nachgelagerten Prozesse durch das „+“ aufgeklappt und durch das „-“ eingeklappt werden können.

Neben der graphischen Darstellung kann auch die Berechnung des Produktsystems durchgeführt werden. Die Sachbilanz wird anhand der Menge des Referenzflusses des Referenzprozesses des Produktsystems berechnet. Auf Grundlage der Ergebnisse dieser Gesamt-Sachbilanz wird mittels Auswahl einer Wirkungsabschätzungsmethode die Umweltbelastung des Produktsystems berechnet. Diese beiden Berechnungsschritte erfolgen in der Software zusammen. Die Wirkungsabschätzung wird in Kap. 4.1 aufgegriffen und erläutert.

### 3. Erstellung der Ökobilanz

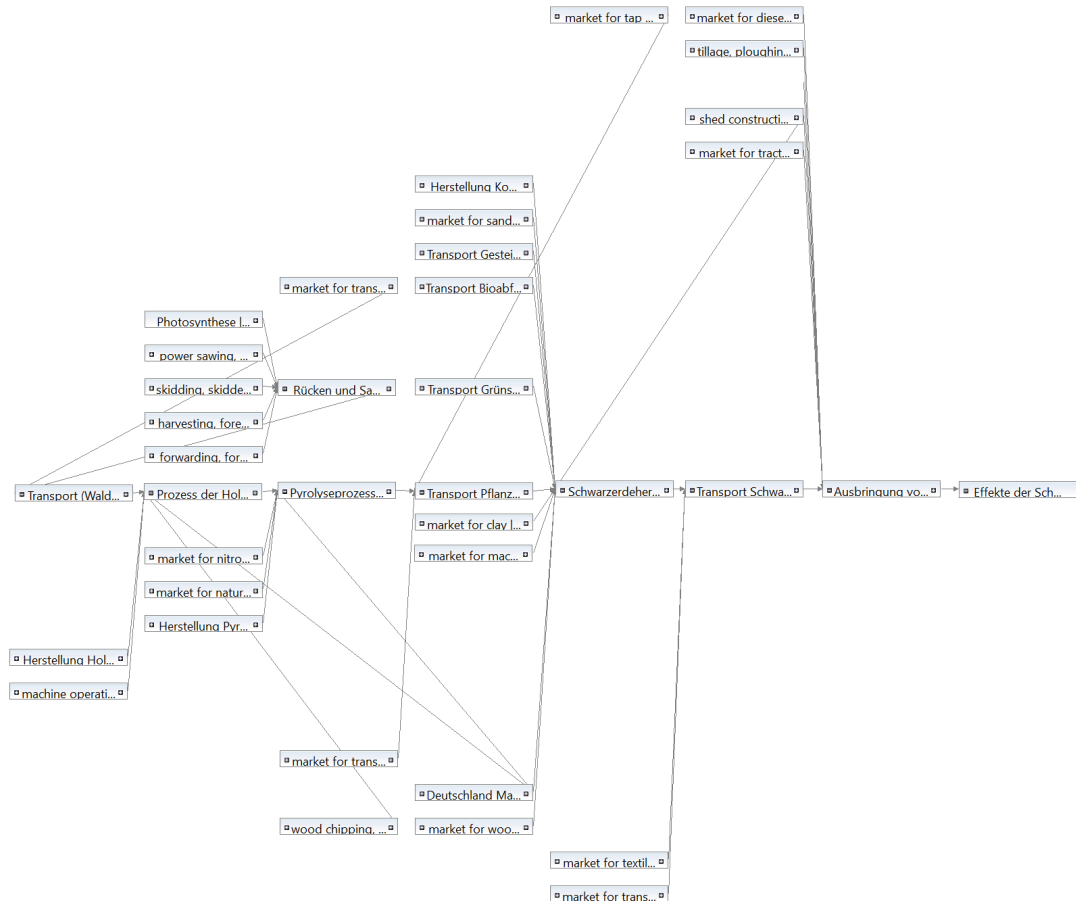


Abbildung 3.3.: Modellgraph in *openLCA*  
 Modellgraph des Produktsystems „Schwarzerdeanwendung in der landwirtschaftlichen Nutzfläche“

## 4. Ergebnisse

Dieses Kap. baut auf den zuvor ermittelten Sachbilanzergebnissen auf und umfasst die Kap. **4.1 Wirkungsabschätzung**, **4.2** und **4.3 Auswertung**, **4.4 Vollständigkeits- und Konsistenzprüfung**, **4.5 Fehlerbetrachtung** und **4.6 Diskussion und Empfehlungen**. Es werden insbesondere die Ergebnisse der Ökobilanz dargestellt, ausgewertet und in einer Sensitivitätsanalyse untersucht, die Validität und Genauigkeit der Berechnungen und der zugrundeliegenden Daten im Sinne einer Fehlerbetrachtung geprüft und darauf aufbauend eine Diskussion geführt und letztlich Empfehlungen ausgesprochen.

### 4.1. Wirkungsabschätzung

Zur Abschätzung der potenziellen Umweltwirkungen der Inputflüsse (Rohstoffe, Wasser, Energieträger, Flächenbelegung und -transformation) und Outputflüsse (stoffliche Emissionen in Boden, Wasser und Luft) der Sachbilanz wird die Wirkungsabschätzungsmethode *ILCD 2.0 Midpoint 2018* (International reference Life Cycle Data system ILCD) mit überarbeiteten Faktoren zur abiotischen Ressourcenknappheit („*Upgraded ADP factors of ILCD 2.0 Midpoint (JB)*“) verwendet. In dieser Methode werden die Input- und Outputflüsse 25 Wirkungskategorien (Klimawandel, Ressourcenknappheit, Human- und Ökotoxizität etc.) zugeordnet [Buchgeister and Hottenroth, 2021]. Der Fluss „*Carbon dioxide, non fossil*“, der in dieser Arbeit verwendet wird und nicht Teil dieser Methode ist, macht eine Modifizierung der Methode durch Hinzufügen des Flusses mit dem Charakterisierungsfaktor von  $1 \text{ kg CO}_2 - \text{Eq}$  in das Charakterisierungsmodell notwendig. Hinsichtlich der Auswirkungen auf das Erderwärmungspotenzial ist die Wirkungskategorie *Klimawandel* von Bedeutung. Wie in Kap. 2.3.2.3 beschrieben, wird diese Wirkungskategorie durch das Basisklimamodell mit 100 Jahren Verweilzeit nach dem IPCC (GWP100, Global Warming Potential; Stand 2013) und durch den Wirkungsindikator *Strahlungsantrieb* als globales THG-Potenzial mit dem Wirkungsfaktor  $\text{CO}_2$ -Äquivalent charakterisiert [Buchgeister and Hottenroth, 2021]. Der Wirkungseffekt beschreibt den Wert, der bei der Berechnung des Produktsystems für die betrachtete Wirkungskategorie berechnet wird.

THG mit Relevanz für diese Arbeit und ihre Charakterisierungsfaktoren sind in Tab. 4.1 dargestellt. Mit Ausnahme des Flusses „*CO<sub>2</sub>, Ressource (in Luft)*“ gehen die aufgeführten Flüsse mit positivem Vorzeichen als Charakterisierungsfaktor in die Berechnung ein. Das bedeutet, allen emittierten THG (positives Vorzeichen der THG-Emission) werden einem positiven und allen THG, die der Atmosphäre entnommen werden (negatives Vorzeichen der THG-Emission), werden einem negativen Vorzeichen des Charakterisierungsfaktors zugewiesen. In diesem



Untersuchungsrahmen wird der Atmosphäre mittels Photosynthese  $\text{CO}_2$  entnommen, was mit dem Charakterisierungsfaktor  $-1 \text{ kg CO}_2 - \text{Eq}$  für „ $\text{CO}_2$ , Ressource (in Luft)“ berücksichtigt wird. THG-Emissionen mit positivem Vorzeichen fördern die Erderwärmung und sind demnach nachteilig, während THG-Emissionen mit negativem Vorzeichen zur Reduzierung des Erderwärmungspotenzials beitragen und damit vorteilhaft einzuordnen sind. Da die Begriffe „negativ“ und „positiv“ in Bezug auf THG-Emissionen, Klimawandel, Kohlenstoffspeicherung etc. gegensätzliche Aussagen machen, wird zur Vorbeugung möglicher Unklarheiten und Verwechslungen eine rein mathematische Verwendung der beiden Begriffe angestrebt (Aussage über Vorzeichen eines Wertes).

Tabelle 4.1.: Charakterisierungsfaktoren des Erderwärmungspotenzials ausgewählter THG der Wirkungskategorie *Klimawandel*

Elementarflüsse (THG)	Charakterisierungsfaktor	Wirkungsfaktor
$\text{CO}_2$ , Emission	1	kg $\text{CO}_2$ -Eq
$\text{CO}_2$ , Ressource (in Luft)	-1	kg $\text{CO}_2$ -Eq
CO, Emission	1,57	kg $\text{CO}_2$ -Eq
$\text{CH}_4$ , Emission	36,75	kg $\text{CO}_2$ -Eq
$\text{N}_2\text{O}$ , Emission	298	kg $\text{CO}_2$ -Eq
$\text{SF}_6$ , Emission	26100	kg $\text{CO}_2$ -Eq

Für weitere Wirkungskategorien, deren Charakterisierungsmodelle und Wirkungsindikatoren nicht Schwerpunkt dieser Arbeit sind, ist an dieser Stelle auf Buchgeister and Hottenroth [2021] und Goedkopp et al. [2011] verwiesen.

Die Darstellung und Auswertung der Ergebnisse der Wirkungsabschätzung zum Klimawandel werden im folgenden Kap. behandelt. Obwohl das Ziel dieser Ökobilanz nur die Erfassung THG-Emissionen und die Bewertung des Erderwärmungspotenzials ist, werden durch die Software Ergebnisse von vielen weiteren Wirkungskategorien ausgewiesen. Da die Beschreibung der Charakterisierungsmodelle dieser Wirkungskategorien und deren Ergebnisauswertung den Aufwand für diese Arbeit übersteigt, werden keine Ergebnisse zu anderen Wirkungskategorien diskutiert.

## 4.2. Auswertung des Produktsystems der *FU 1*

In diesem Kap. werden die Ergebnisse für das Produktsystem (PS) der *FU 1* dargestellt und ausgewertet und Parameter (d.h. Flüsse, Prozessmodule, Prozesssysteme), die einen signifikanten Einfluss auf den Klimawandel haben, herausgearbeitet. Des Weiteren wird eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt, um den Einfluss verschiedener Parameter auf das Gesamtergebnis zu prüfen. Die Auswertung des PS der *FU 2* wird anschließend behandelt.

In Tab. 4.2 sind die Wirkungen der einzelnen Hauptprozessschritte und deren Summe auf den Klimawandel für die beiden PS der *FU 1 - Pyreg* und der *FU 1 - CTS* dargestellt. Da es zum

Tabelle 4.2.: Beiträge der einzelnen Prozessschritte an den THG-Emissionen der zwei PS zur *FU 1*

Untersuchungsrahmen Einheit	<i>FU 1</i> - Pyreg <i>kg CO<sub>2</sub> – Eq</i>	<i>FU 1</i> - CT-Schuster <i>kg CO<sub>2</sub> – Eq</i>
Biomasseerzeugung - Waldrestholz	-26550	-24951
Biomasseerzeugung - Kompostmaterial	-20665	-20665
Pyrolyse - Zerkleinerung und Trocknung	605	268
Pyrolyse - Pyrolyseprozess	9508	8152
Umwandlung zu Schwarzerde	30576	30576
Ausbringung	192	192
Nutzung	3549	3549
Transport	397	390
Gutschrift (Sz1-DE)	-3902	-3330
Summe (ohne Gutschrift)	-2389	-2486
Summe (mit Gutschrift)	-6291	-5816

Pyrolyseprozess zahlreiche Technologien und Konzepte gibt, wird die Auswertung der *FU 1* anhand des PS mit der modellierten Pyreg-Pyrolyseanlage (PX1500) und des PS mit der modellierten CTS-Pyrolyseanlage (CTS40) durchgeführt. Für die Nutzung von 16,5 Tonnen Trockenmasse an Schwarzerde in einem Hektar landwirtschaftlicher Fläche über drei Jahre werden die THG-Emissionen ohne Gutschrift zu  $-2.389 \text{ kg CO}_2 - \text{Eq}$  (Pyreg) und zu  $-2.486 \text{ kg CO}_2 - \text{Eq}$  (CTS) berechnet. Das negative Vorzeichen des Gesamtergebnisses bedeutet, dass durch die Nutzung von Schwarzerde summarisch THG der Atmosphäre entnommen werden und somit das Ergebnis als vorteilhaft und als NET einzustufen ist.

Der Prozessschritt der *Umwandlung zu Schwarzerde* verursacht mit  $30.576 \text{ kg CO}_2 - \text{Eq}$  die meisten nachteiligen THG-Emissionen für beide PS. Demgegenüber steht der Prozessschritt der *Biomasseerzeugung* mit der höchsten Aufnahme von THG ( $-47.215 \text{ kg CO}_2 - \text{Eq}$  für Pyreg und  $-45.617 \text{ kg CO}_2 - \text{Eq}$  für CTS) aus der Atmosphäre. Zudem unterscheiden sich auch die Werte der beiden PS im Prozessschritt der *Pyrolyse*, während für alle weiteren Prozessschritte keine Unterschiede bzw. beim Transport nur geringfügige Abweichungen auftreten. Die Unterschiede liegen vorwiegend an den verschiedenen Strombedarfsmengen der beiden Pyrolyseprozesse sowie der vorgeschalteten Holz-Zerkleinerungs- und -Trocknungsprozessen. Bezogen auf den Referenzfluss von  $1 \text{ kg Pflanzkohle}$  wird im CTS-PS der Strombedarf durch Eigenstromproduktion gedeckt und damit weniger THG emittiert. Aufgrund der höheren Pflanzkohleausbeute im CTS-PS wird gleichzeitig weniger Waldrestholz benötigt um  $1 \text{ kg Pflanzkohle}$  herzustellen. Dies reduziert zugleich die THG-Emissionen, die beim Transport des Waldrestholzes ausgestoßen werden. Da sich die dem Pyrolyseprozess nachfolgende Prozesskette für beide PS auf den Referenzfluss von  $1 \text{ kg Pflanzkohle}$  beziehen, weisen beide PS für die Prozessschritte *Umwandlung zu Schwarzerde*, *Ausbringung* und *Nutzung* die gleichen Mengen an THG-Emissionen auf. Als Ergänzung zur Tab. 4.3 sind in Abb. 4.1 die Beiträge der einzelnen Prozessschritte an den THG-Emissionen für die beiden PS der *FU 1* grafisch dargestellt.

## 4. Ergebnisse

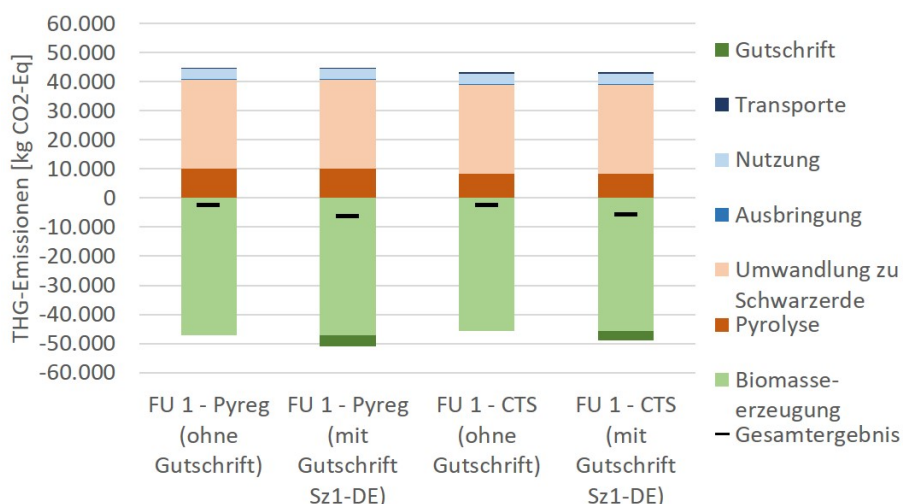


Abbildung 4.1.: Beiträge der Prozessschritte an den THG-Emissionen mit und ohne Gutschrift für die beiden PS der *FU 1*

In beiden PS entstehen nach der Verbrennung der Pyrolysegase Wärme und/oder Strom, die über die internen Bedarfe hinausgehen. Diese Überschussenergien betragen im Pyreg-PS 75.920 MJ thermisch und im CTS-PS 58.115 MJ thermisch plus 2.029 MJ elektrisch. Für diese im PS entstandenen energetischen Nebenprodukte werden Gutschriften mittels Referenzproduktsystemen berechnet, die die Erzeugung der entsprechenden Energieformen abbilden und ein Maß für die Reduktion an emittierten THG darstellen (s. Kap. 3.2.3). Hierzu werden die beiden ecoinvent-Prozesse „market for heat, district or industrial, natural gas...Europe without Switzerland“ als Referenzprodukt für thermische Energie und „Deutschland Markt high Voltage (2018) (JB)“ als Referenzprodukt für elektrische Energie (s. A.32) herangezogen. In Abb. 4.1 ist das Gutschrift-Szenario für beide PS als *Sz1-DE* gekennzeichnet. Mit den errechneten Gutschriften von  $-3.902 \text{ kg CO}_2 - \text{Eq}$  (Pyreg) und  $-3.329 \text{ kg CO}_2 - \text{Eq}$  (CTS) verbessern sich die Gesamtergebnisse auf  $-6.291 \text{ kg CO}_2 - \text{Eq}$  (Pyreg) und  $-5.816 \text{ kg CO}_2 - \text{Eq}$  (CTS). Die vergebene Gutschrift führt zu einer Verbesserung der gesamten Aufnahme an THG aus der Atmosphäre um die Faktoren 2,8 (Pyreg) und 2,5 (CTS) und drückt deren Potenzial aus. Im Detail zeigt das PS von Pyreg leichte Vorteile hinsichtlich des Absolutwertes von 8,2 % gegenüber CTS, während ohne diese Gutschrift der Absolutwert für CTS 4,1 % höher ist. Die Ursache dieses Zusammenhangs ist zum einen die höhere Pyrolysegasausbeute und die damit größere Menge an Überschussenergie bezogen auf 1 kg Pflanzenkohle im Pyrolyseprozess von Pyreg und zum anderen die verschiedenen Formen der energetischen Nebenprodukte (thermisch und/oder elektrisch) der beiden PS. Da im CTS-PS ein Teil der überschüssigen thermischen Energie mit (typischerweise) niedrigem Wirkungsgrad in Elektrizität umgewandelt wird, ist die erzeugte elektrische Energiemenge gering und entsprechend die Gutschrift kleiner. Weitere Szenarien mit anderen energetischen Referenzprodukten zur Gutschriftberechnung werden in Kap. 4.2.2 im Rahmen der Sensitivitätsanalyse durchgeführt.

Zur Einordnung der Ergebnisse der PS von Pyreg und CTS sind in Abb. 4.2 die Ergebnisse von Oldfield et al. [2018] (s. Kap. 2.4) vergleichend dargestellt. Obwohl ein absoluter Vergleich

der PS, wegen der unterschiedlichen Untersuchungsrahmen und Systemgrenzen von Oldfield et al. [2018] (s. Kap. 2.4) Einschränkungen aufweist, lassen sich unter Einbezug der Hauptunterschiede, die Ergebnisse in Teilen einordnen. Im Vergleich weist Oldfield et al. [2018] eine

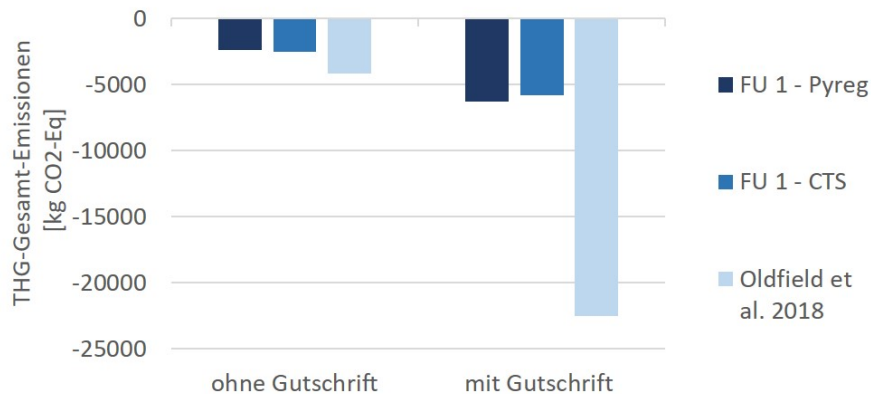


Abbildung 4.2.: Vergleich der Ergebnisse der beiden PS der *FU 1* mit dem PS aus Oldfield et al. [2018]

deutlich höhere Aufnahme von THG aus der Atmosphäre auf (4.167 kg CO<sub>2</sub> – Eq ohne Gutschrift und 22.500 kg CO<sub>2</sub> – Eq mit Gutschrift). Zwar liegen die Absolutwerte mit Faktoren von etwa 1,7 (ohne Gutschrift) bzw. 3,8 (mit Gutschrift) deutlich auseinander, allerdings befinden sich alle Werte in der gleichen Größenordnung. Diese Unterschiede erklären sich einerseits mit einer größeren Anwendungsmenge von PKK bzw. Schwarzerde (20 Tonnen Trockenmasse PKK pro Hektar und Jahr in Oldfield et al. [2018] und 16,5 Tonnen Trockenmasse Schwarzerde pro Hektar in drei Jahren im PS der *FU 1*). Dabei weist die Schwarzerde im Vergleich zur PKK aus Oldfield et al. [2018] nur einen PKK-Anteil von 80 M. – % auf, wodurch entsprechend weniger nachteilige THG-Emissionen entstehen. Zudem wird deutlich, dass Oldfield et al. [2018] nur eine jährliche Betrachtung vornimmt, während in der Arbeit ein dreijähriger Zyklus als funktionelle Einheit verwendet wird. Dadurch werden bei Oldfield et al. [2018] die quantitativ nachteiligen THG-Emissionen im zweiten und dritten Jahr nach der Anwendung nicht berücksichtigt. Andererseits führen die Gutschriften für den Ersatz von mineralischem NPK-Dünger<sup>1</sup> durch PKK und die Vermeidung der Deponierung von Biomüll in Oldfield et al. [2018] zu weiteren Vorteilen, was den Absolutwert für die Entnahme an THG aus der Atmosphäre noch stark erhöht (s. 4.2, rechte Seite). Die obigen Ausführungen machen deutlich, dass ein Vergleich mit den Ergebnissen von Oldfield et al. [2018] nur über eine Anpassung erfolgen kann, um den gleichen Untersuchungsrahmen mit gleicher FU und gleichen zeitlichen Bezügen sowie gleichen Systemgrenzen zu erhalten. Erst anschließend ist eine detaillierte Ergebnisanalyse zu den Untersuchungen in dieser Arbeit möglich.

<sup>1</sup>NPK-Dünger - Dünger aus Stickstoff (N), Phosphor (P) und Kalium (K)

### 4.2.1. Identifizierung signifikanter Parameter des PS der FU 1

In diesem Kap. werden Parameter (d.h. Prozessmodule und Flüsse), mit signifikantem Einfluss auf das Gesamtergebnis der beiden PS des FU 1 identifiziert und deren Wirkungseffekte herausgearbeitet.

Entlang der gesamten Prozesskette werden zum einen 46.733  $kg\ CO_2 - Eq$  (Pyreg) bzw. 44.676  $kg\ CO_2 - Eq$  (CTS) THG emittiert und zum anderen 48.881  $kg\ CO_2$  (Pyreg, 52.713  $kg\ CO_2$  mit Gutschrift) bzw. 47.112  $kg\ CO_2$  (CTS, 50.442  $kg\ CO_2$  mit Gutschrift) der Atmosphäre entnommen. In Tab. 4.3 ist die Aufteilung der THG-Beiträge auf die einzelnen Prozesse (Prozessmodule), die nennenswert zu den jeweiligen Hauptprozessschritten beitragen, zur Identifizierung signifikanter Prozesse dargestellt.

Tabelle 4.3.: Prozessmodule mit nennenswertem Beitrag an den THG-Emissionen der beiden PS der FU 1

Bezeichnung Prozessmodul	THG-Emissionen	THG-Emissionen
	(Pyreg)	(CTS)
	$kg\ CO_2 - Eq$	$kg\ CO_2 - Eq$
Photosynthese, Mischholz	-44187	-42541
Schwarzerdeherstellung	29210	29210
Pyrolyseprozess	8088	8090
Photosynthese, $CO_2$ in Obst und Gemüse	-4294	-4294
Effekte der Schwarzerde	3549	3549
Stromerzeugung (Braunkohle)	896	200
Stromerzeugung (Steinkohle)	347	78
Maschinenbetrieb, Diesel, $\geq 74,57\ kW$	318	318
Skidder-/Seilschlepper-Betrieb	287	276
Kettensäge-Betrieb	282	272
Abwasseraufbereitung (Bioöl-Raffinerie)	189	182
Weichholz-Forstwirtschaft	-120	-114
Positive THG-Emissionen	46733	44676
Negative THG-Emissionen (ohne Gutschrift)	-48811	-47112
Gutschrift (Sz1-DE)	-3902	-3330
Negative THG-Emissionen (mit Gutschrift)	-52713	-50442

Die relevante THG-Entnahme entstammt hauptsächlich der *Photosynthese* zur Erzeugung der Biomasse. Dieser gesamte Beitrag kann zu 62 % (60 % für CTS) dem Waldrestholz und zu 38 % (40 %) dem Grünschnitt aufgeteilt werden. Die Photosynthese von  $CO_2$  in Obst und Gemüse führt zur Kohlenstoffspeicherung im Biomüll, der Einsatzstoff der Kompostierung ist. Diese Photosynthese trägt zu mehr als 8 % zur Aufnahme an THG aus der Atmosphäre bei. Der Prozess der *Umwandlung zu Schwarzerde*, der durch das Prozessmodul *Schwarzerdeherstellung* abgebildet wird, verursacht durch den Kohlenstoffabbau des Grünschnitts und Biomülls (und der Pflanzenkohle in geringem Maße) bei der Kompostierung die höchsten THG-Emissionen. Weitere Prozessmodule mit signifikantem Einfluss für das Pyreg-PS sind der *Pyrolyseprozess*, dort entstehen THG-Emissionen durch das Verbrennen der Pyrolysegase, und der Prozess *Effekte der Schwarzerde*, der durch den Abbau der organischen Substanz der Schwarzerde im Boden

beiträgt. Die *Stromerzeugung durch Braunkohle* weist bereits einen deutlich geringeren Einfluss auf, wie die Höhe des Strombedarfs im PS insgesamt (1.824 kg CO<sub>2</sub> – Eq im Pyreg-PS und 338 kg CO<sub>2</sub> – Eq im CTS-PS). Im CTS-PS besteht gar kein Bezug zu externem Strom für den Prozessschritt der Pyrolyse, sodass das Prozessmodul *Stromerzeugung durch Braunkohle* im Unterschied zum Pyreg-PS nur geringfügig zum Gesamtabolutwert der THG-Emissionen beiträgt.

Tab. 4.4 zeigt die einzelnen Beiträge der spezifischen THG am Wirkungsabschätzungsergebnis. Hierbei wird zwischen fossiler und nicht-fossiler Herkunft unterschieden. An der Aufnahme von THG aus der Atmosphäre in die Biomasse ist ausschließlich CO<sub>2</sub> beteiligt, dass bei der Photosynthese als Kohlenstoff gespeichert wird. Zu den positiven Absolutwerten an THG-Emissionen tragen in der Reihenfolge die THG CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O und CH<sub>4</sub> signifikant bei. In Anbetracht der positiven Absolutwerte hat CO<sub>2</sub> trotz des höheren THG-Potenzials von N<sub>2</sub>O (Faktor 296) und CH<sub>4</sub> (Faktor 36,75) die größte Bedeutung in dem PS. Dagegen sind 41.758 kg CO<sub>2</sub> – Eq

Tabelle 4.4.: Beiträge verschiedener THG an den THG-Emissionen (FU 1)

Fluss	THG-Emissionen	THG-Emissionen
	(Pyreg)	(CTS)
	kg CO <sub>2</sub> – Eq	kg CO <sub>2</sub> – Eq
CO <sub>2</sub> , in Luft	-48811	-47112
CO <sub>2</sub> , nicht-fossil	35792	35604
CO <sub>2</sub> , fossil	4486	2899
N <sub>2</sub> O, nicht-fossil	3471	3466
N <sub>2</sub> O, fossil	39,0	23,8
CH <sub>4</sub> , nicht-fossil	2488	2334
CH <sub>4</sub> , fossil	303	208
CO, nicht fossil	7,69	9,44
CO, fossil	96,2	90,4
SF <sub>6</sub>	6,3	5,22
Positive THG-Emissionen	46733	44676

bzw. 41.413 kg CO<sub>2</sub> – Eq (CTS) nicht-fossiler Natur und entstammen größtenteils aus dem mikrobiellen Abbau organischer Materialien. Beim Vergleich der beiden PS ist der Unterschied zwischen den fossilen THG-Emissionen (52 % in Bezug auf THG-Emissionen im CTS-PS) absolut sowie relativ größer als der Unterschied zwischen den nicht-fossilen THG-Emissionen (1 % in Bezug auf THG-Emissionen im CTS-PS). Daher haben in diesem spezifischen PS die biologischen Umwandlungsprozesse (*Umwandlung zu Schwarzerde*) eine hohe Signifikanz. Andererseits werden die fossilen THG-Emissionen im wesentlichen direkt oder indirekt durch den Pyrolyseprozess verursacht, dem daher eine große Bedeutung zugesprochen wird.

#### 4.2.2. Sensitivitätsanalyse des PS der FU 1

Die **Sensitivitätsanalyse** (bzw. **Sensitivitätsprüfung**) bestimmt die Einfüsse verschiedener signifikanter, kritischer oder unsicherer Parameter auf das Endergebnis. Durch Variation dieser

Parameter in einem vorgegebenen Unsicherheitsbereich und gleichzeitigem Konstant-Halten aller anderen Einflussgrößen, wird die Auswirkung dieser Änderung auf das Endergebnis, d.h. die Absolutwerte an THG-Emissionen oder THG-Aufnahme, aufgezeigt. Im Folgenden werden die entsprechenden Auswirkungen verschiedener Einflussparameter auf das PS der *FU 1* betrachtet. Da der Prozess *Photosynthese, Mischholz* den größten Einfluss (höchster Absolutwert in beiden PS) auf die THG-Emissionen hat, wird zunächst die Sensitivität des PS hinsichtlich des Photosyntheseprozesses geprüft. Im Prozess wird die aus der Atmosphäre entnommene Menge an  $CO_2$  ( $-44.187 \text{ kg } CO_2 - Eq$  (Pyreg-PS)) als Einflussparameter im Unsicherheitsbereich von  $\pm 10\%$  variiert. In Abb. 4.3 sind die Ergebnisse dargestellt.

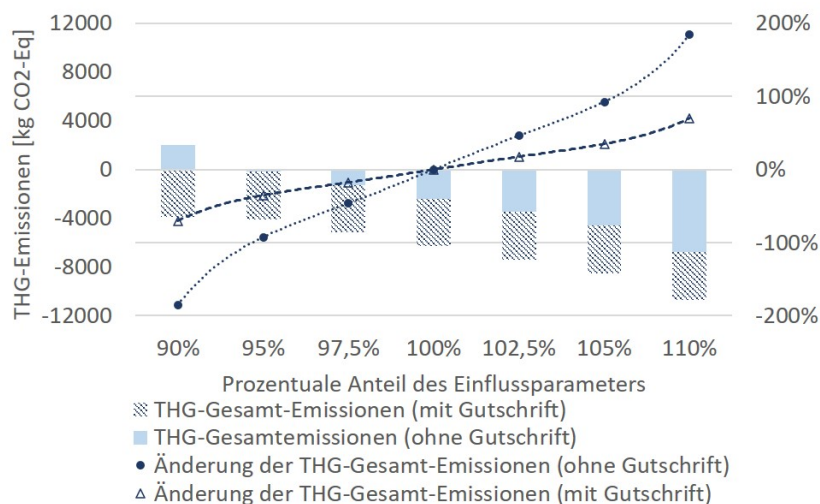


Abbildung 4.3.: Sensitivität des Pyreg-PS der *FU 1* in Bezug auf die THG-Emissionen des Prozesses *Photosynthese, Mischholz*

Auf der Abszisse ist der prozentuale Anteil des Einflussparameters (d.h. THG-Emissionen im Prozessmodul der *Photosynthese, Mischholz*) und auf der Primär-Ordinate die THG-Emissionen mit negativem und positivem Vorzeichen aufgetragen. Die relative Änderung der THG-Emissionen ist auf der Sekundär-Ordinate aufgeführt und wird nach Gleichung 4.1 berechnet:

$$Relative \text{ \u00c4nderung} = \frac{Differenz \text{ aus berechnetem Wert und Referenzwert}}{Referenzwert} \quad (4.1)$$

Als Referenzwert wird dabei das Ergebnis ohne Variation des Einflussparameters verwendet (d.h. negativer Wert der THG-Emissionen f\u00fcr das Pyreg-PS der *FU 1*;  $-2.389 \text{ kg } CO_2 - Eq$  (ohne Gutschrift) bzw.  $-6.289 \text{ kg } CO_2 - Eq$  (mit Gutschrift)). Im Diagramm findet sich dieser Referenzwert bei dem prozentualen Anteil des Einflussparameters von  $100\%$  wieder und \u00e4u\u00dfer sich durch eine relative \u00c4nderung der THG-Emissionen um  $0\%$ . Die relative \u00c4nderung des Gesamtergebnisses um  $185\%$  bei Variation des Einflussparameters um  $10\%$  zeigt wie sensitiv das PS darauf reagiert und welchen Einfluss der Photosyntheseprozess aus\u00fcbt.

Der Prozess *Umwandlung zu Schwarzerde* wird wegen des hohen Aussto\u00dfes an THG-Emissionen (d.h.  $29.210 \text{ kg } CO_2 - Eq$ ) ebenfalls im Rahmen einer Sensitivit\u00e4tsanalyse untersucht.

Dabei werden die THG-Emissionen aus dem Prozess um  $\pm 20\%$  variiert und die Auswirkungen auf das Gesamtergebnis analysiert. Die Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse für das Pyreg-PS sind in Abb. 4.4 dargestellt. Die Ergebnisse für das Pyreg-PS fallen identisch für das CTS-PS aus (vgl. Kap. 4.2.1, Tab. 4.3) und sind in Abb. 4.4 dargestellt.

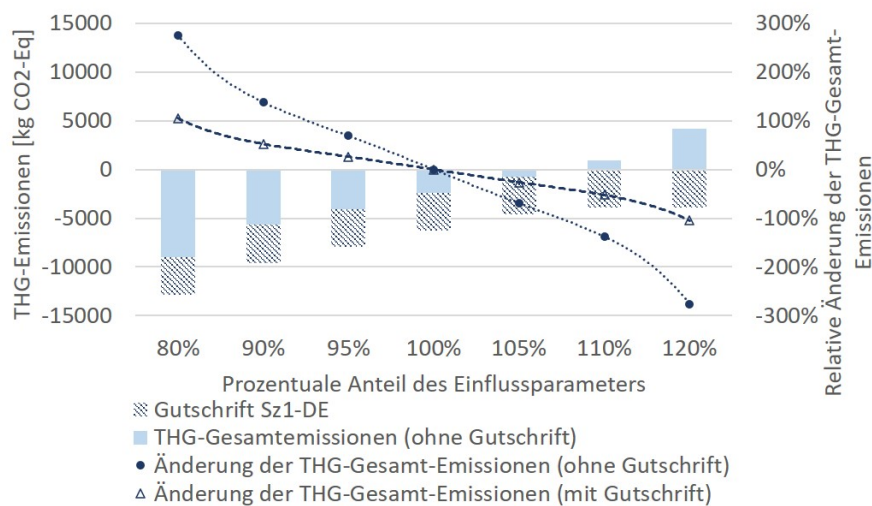


Abbildung 4.4.: Sensitivität des Pyreg-PS der *FU 1* in Bezug auf die THG-Emissionen beim Prozess der *Umwandlung zu Schwarzerde*

Schon bei einer geringfügigen Änderung von 5 % des Absolutwertes der THG-Emissionen im Prozess *Umwandlung zu Schwarzerde* ändert sich das Gesamtergebnis (ohne Gutschrift) um 69 % (mit Gutschrift 26 %). Eine Variation des Einflussparameters um 20 % bewirkt in etwa eine Verdreifachung (276 % ohne Gutschrift (105 % mit Gutschrift)) des Absolutwertes der THG-Emissionen. Dies verdeutlicht den großen Einfluss des Prozesses *Umwandlung zu Schwarzerde*.

Auch der *Pyrolyseprozess* verursacht mit  $9.508 \text{ kg CO}_2 - \text{Eq}$  (Pyreg) bzw.  $8.152 \text{ kg CO}_2 - \text{Eq}$  (CTS)<sup>2</sup> einen hohen Beitrag an den gesamten THG-Emissionen. Daher wird dieser Prozess für eine Sensitivitätsanalyse herangezogen. Zudem liegen größere Unterschiede zwischen den beiden modellierten PS der *FU 1* vor, die bei einer Analyse von Interesse sind. Abb. 4.5 zeigt das Ergebnis der Sensitivitätsanalyse für beide PS der *FU 1* ohne (a)) und mit (b)) Gutschrift.

Bei Änderung des Einflussparameters (THG-Emissionen bei der Pyrolyse) um 20 % ändert sich das Gesamtergebnis um 79 % (Pyreg) bzw. 66 % (CTS). Bei Erhöhung der Unsicherheit wird der Unterschied zwischen den relativen Änderungen der THG-Emissionen der beiden PS (Abb. 4.5 a)) stets größer. Damit reagiert das Pyreg-PS stärker auf die Änderung des Einflussparameters als das CTS-PS. Das Pyreg-PS erreicht zudem schneller vorteilhaftere Ergebnisse als das CTS-PS, sofern der Einflussparameter im vorteilhaften Unsicherheitsbereich ( $< 100\%$ ,

<sup>2</sup>Um den Unterschied zwischen den beiden Pyrolyseprozessen zu berücksichtigen werden neben den direkten THG-Emissionen auch die indirekten THG-Emissionen betrachtet, die z. B. mit dem Strombedarf einhergehen. Ohne die indirekten Emissionen sind die THG-Emissionen der beiden Pyrolyseprozesse nahezu identisch und ein Vergleich wäre nicht erkenntnisreich.



## 4. Ergebnisse

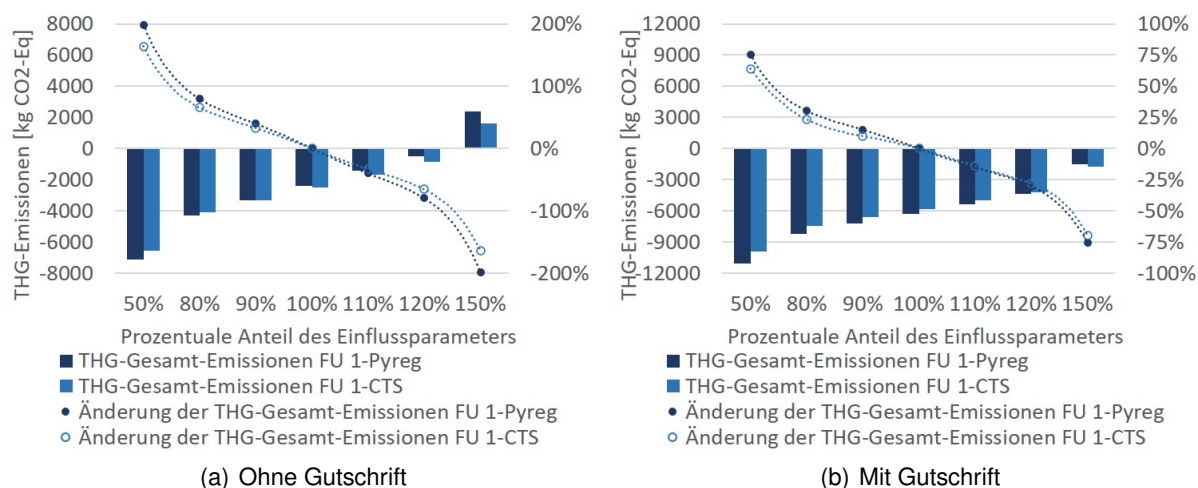


Abbildung 4.5.: Sensitivität des Pyreg-PS und des CTS-PS der *FU 1* in Bezug auf die THG-Emissionen im Zusammenhang mit dem Prozess der *Pyrolyse*, a) ohne Gutschrift und b) mit Gutschrift

geringerer Ausstoß an THG-Emissionen) variiert wird. Die Ursache ist vor allem der externe Strombedarf im Pyreg-PS, der mit größer werdender Unsicherheit des Einflussparameters einen größer werdenden Unterschied zum CTS-PS bewirkt.

Unter Einbezug der Gutschrift (Abb. 4.5 b)) und der Variation des Einflussparameters um 20 % ändert sich das Gesamtergebnis um 30 % (Pyreg) bzw. 23 % (CTS). Da im Pyreg-PS eine höhere Pyrolysegasausbeute auftritt, werden größere Mengen an überschüssiger thermischer Energie erzielt und entsprechend höhere Gutschriften berechnet. Diese gleichen den Effekt des externen Strombedarfs auf den Unterschied zwischen den beiden PS aus, sodass beide PS ähnlich stark auf die Änderung des Einflussparameters reagieren.

Der Prozess der Nutzung der Schwarzerde nimmt ebenfalls einen nennenswerten Anteil an den THG-Emissionen ein. Gleichzeitig erfordert die Unsicherheit in der Datengrundlage und Datenberechnung (s. Kap. 4.4) eine besondere Beachtung. Abb. 4.6 zeigt die Sensitivität der gesamten THG-Emissionen für das Pyreg-PS bei Variation des Einflussparameters (d.h.  $3.549 \text{ kg CO}_2\text{-Eq}$  THG-Emissionen beim Abbau der Schwarzerde im Boden) in einem Unsicherheitsbereich von 50 % bis 150 % bezogen auf den Referenzzustand (100 %). Das CTS-PS wird aus zuvor beschriebenem Grund (s. Sensitivitätsanalyse zum Prozess der *Umwandlung zu Schwarzerde*) nicht separat aufgeführt.

Eine Abweichung des Einflussparameters um 50 % bewirkt eine Änderung der THG-Emissionen um 80 % ohne Gutschrift (30 % mit Gutschrift). Bei Erhöhung des Einflussparameters um etwa +60 % werden positive Absolutwert für die gesamten THG-Emissionen berechnet. Damit lässt sich sagen, dass für die THG-Emissionen beim Abbau der Schwarzerde ein großer Unsicherheitsbereich (+60 %) gilt, indem das Gesamtergebnis vorteilhaft ist und der Einsatz von Schwarzerde als NET angesehen werden kann.

Sämtliche Aussagen zur Unsicherheit der Gesamtergebnisse hängen stark davon ab, ob eine

## 4. Ergebnisse

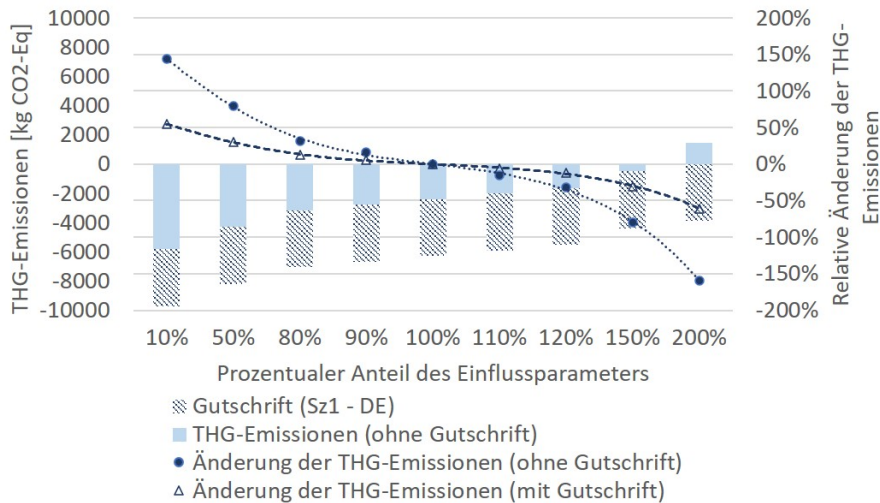


Abbildung 4.6.: Sensitivität des Pyreg-PS der *FU 1* in Bezug auf die THG-Emissionen beim Prozess der *Nutzung*

Gutschrift berücksichtigt wird oder nicht. Ohne den Einbezug einer Gutschrift wird das Gesamtergebnis bspw. bereits bei geringfügiger Erhöhung (8 %) der THG-Emissionen beim Prozess der *Umwandlung zu Schwarzerde* zu positiven Absolutwerten für die gesamten THG-Emissionen berechnet. Zur Einordnung und Bewertung dieser Unsicherheit wird der Prozess der *Umwandlung zu Schwarzerde* bei der Fehlerbetrachtung in Kap. 4.5 im Hinblick auf die Qualität der verwendeten Daten und der Datenberechnungsmethode genauer betrachtet.

Um auch die Sensitivität der Gesamtergebnisse der beiden PS der *FU 1* hinsichtlich der Gutschriften zu bestimmen, werden neun verschiedene Szenarien verglichen (s. Abb. 4.7). Dabei werden *Worst-Case*- und *Best-Case*-Szenarien betrachtet und gleichzeitig Ausblicke auf zukünftige Szenarien (erhöhter Anteil an nachwachsenden Rohstoffen als Energieträger und an EE) gegeben. Szenario *Sz1-DE* wurde bereits in Kap. 4.2 beschrieben und stellt damit das

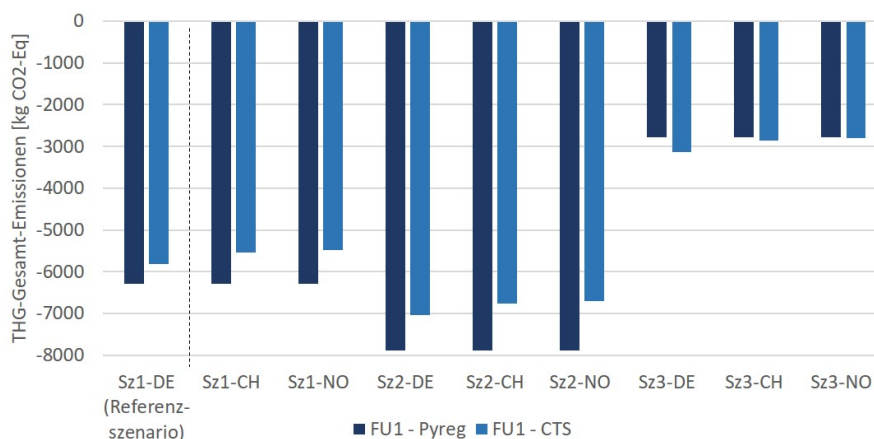


Abbildung 4.7.: Sensitivität des Pyreg-PS und des CTS-PS der *FU 1* in Bezug auf die Gutschrift

Referenzszenario dar. Die Gutschrift aus dem zweiten Szenario *Sz2* berechnet sich aus dem ecoinvent-Prozess „*heat production, natural gas, at boiler ... < 100 kW, heat, central or small-*

*scale...Europe without Switzerland*“. Da der Prozess eine dezentrale, kleine Anlage abbildet, geht mit ihm eine größere Gutschrift ( $-5.494 \text{ kg CO}_2 - Eq$ ) einher. Das Gegenteil ist im dritten Szenario Sz3 der Fall, in dem ein ecoinvent-Prozess herangezogen wird, der die Erzeugung thermischer Energie aus der Verbrennung von Biomethan darstellt („*heat production, biomethane, at boiler ... < 100 kW, heat, central or small-scale...Europe without Switzerland*“). Durch die Verwendung nachwachsender Rohstoffe zur Energiegewinnung wird der Gutschrift ein geringer Wert beigemessen ( $-401 \text{ kg CO}_2 - Eq$ ). Da sich die Gutschriften der beiden PS der FU 1 unterschiedlich berechnen und zusammensetzen, wird neben dem Pyreg-PS auch das CTS-PS betrachtet. Darum wird auch die Gutschrift für die elektrische Energie in drei Szenarien berücksichtigt. Diese drei Szenarien repräsentieren die Strommixe der Länder Deutschland (DE), Schweiz (CH) und Norwegen (NO) und werden mit den Sachbilanzen der ecoinvent-Prozesse „*Deutschland Markt high Voltage (2018) (JB)*“ (s. Kap. 4.2), „*electricity, high voltage, production mix... - CH*“ (2017) und „*electricity, high voltage, production mix... - NO*“ (2017) berechnet. Aufgrund des größten fossilen Anteils am Strommix ist die Gutschrift für das deutsche Szenario am größten und die Gutschrift für das norwegische Szenario entsprechend am niedrigsten.

Da im Pyreg-PS keine elektrische Energie erzeugt wird, weist das PS folglich keine Sensitivität gegenüber den drei Strommix-Szenarien auf, sondern ausschließlich auf die Wärmeszenarien (vgl. Abb. 4.7). Wie zu erwarten fällt das Ergebnis für Szenario Sz2-DE (dezentrale, kleine Anlage zur Wärmeerzeugung und deutscher Strommix) mit  $-7.624 \text{ kg CO}_2 - Eq$  im Vergleich zu den anderen Szenarien am besten aus. Dagegen schneidet das Szenario Sz3-NO mit  $-2.531 \text{ kg CO}_2 - Eq$  am schlechtesten ab. Durch die Verwendung von überwiegend nachwachsenden Rohstoffen und EE, trägt die Gutschrift nur geringfügig zur Verbesserung des Ergebnisses ohne Gutschrift bei. Die Szenarien für den schweizerischen und norwegischen Strommix sind als Ausblick für den zukünftigen deutschen Strommix mit einem angestrebten geringeren fossilen Anteil anzusehen. Zwar geht der Einfluss des Strommixes für die Ergebnisse des CTS-PS aus dem Diagramm deutlich hervor, allerdings dominiert die Gutschrift durch die Wärme. Demnach ist vorwiegend die Zusammensetzung der Netzwärme, an der sich die Wärme-Gutschrift orientiert, für die zukünftige Entwicklung ausschlaggebend.

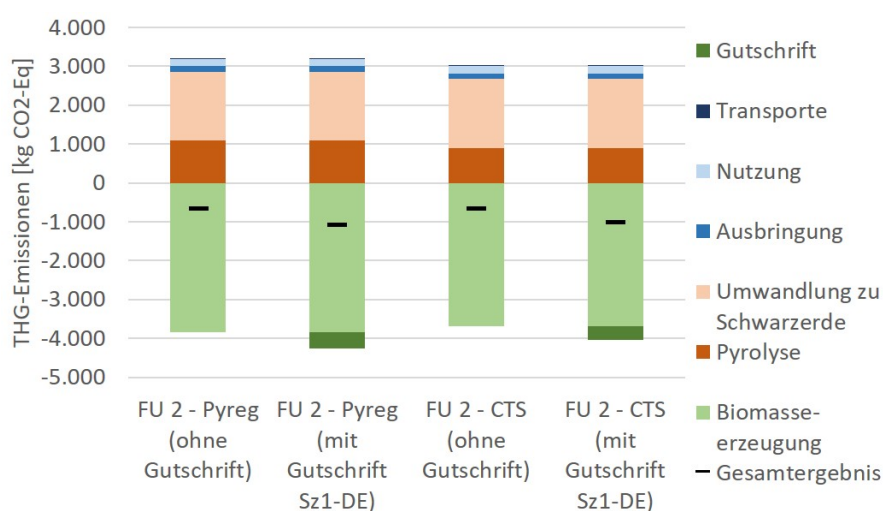
### 4.3. Auswertung des PS der FU 2

Der Nutzung von Schwarzerde bei der Pflanzung eines Stadtbaumes (Wirkung von Schwarzerde in drei Jahren) hat mit  $-639 \text{ kg CO}_2 - Eq$  (Pyreg) und  $-650 \text{ kg CO}_2 - Eq$  (CTS) eine ebenfalls vorteilhafte und THG-aufnehmende Wirkung. Der Prozessschritt der *Umwandlung zu Schwarzerde* trägt mit  $1.777 \text{ kg CO}_2 - Eq$  den höchsten THG-Ausstoß bei und die Summe der THG-Emissionen der Prozesse der Biomasseerzeugung mit  $-3.846 \text{ kg CO}_2 - Eq$  (Pyreg) bzw.  $-3.674 \text{ kg CO}_2 - Eq$  (CTS) hat den größten Beitrag an den aufgenommenen THG.

Abb. 4.5 zeigt die Beiträge der einzelnen Prozessschritte an den THG-Emissionen für die beiden PS der FU 2.

Tabelle 4.5.: Beiträge der einzelnen Prozessschritten an den THG-Emissionen der zwei PS zur *FU 2*

Untersuchungsrahmen Einheit	<i>FU 2</i> - Pyreg <i>kg CO<sub>2</sub> - Eq</i>	<i>FU 2</i> - CTS <i>kg CO<sub>2</sub> - Eq</i>
Biomasseerzeugung - Waldrestholz	-2856	-2684
Biomasseerzeugung - Kompostmaterial	-990	-990
Pyrolyse - Zerkleinerung und Trocknung	65	29
Pyrolyse - Pyrolyseprozess	1022	876
Umwandlung zu Schwarzerde	1777	1777
Ausbringung	135	135
Nutzung	187	187
Transport	22	21
Gutschrift (Sz1-DE)	-419	-358
Summe (ohne Gutschrift)	-639	-650
Summe (mit Gutschrift)	-1057	-1008

Abbildung 4.8.: Beiträge der Prozessschritte an den THG-Emissionen mit und ohne Gutschrift für die beiden PS der *FU 2*

Aufgrund des hohen Anteils an Pflanzenkohle in der Schwarzerde für städtische Anwendungen trägt der Pyrolyseprozess im PS der *FU 2* stärker zu den THG-Emissionen bei als im PS der *FU 1* (vgl. Abb. 4.8 mit Abb. 4.1). Dies zeigt insbesondere das Pyreg-PS, in dem der Pyrolyseprozess mehr THG-Emissionen nach sich zieht als der modellierte Pyrolyseprozess im CTS-PS (keine THG-Emissionen durch externen Strombedarf (s. Kap. 4.2)). Außerdem trägt das Ausbringen der Schwarzerde im PS der *FU 2* im Vergleich zum PS der *FU 1* zu einem größeren Teil an den THG-Emissionen bei, annähernd so groß wie der Beitrag für die Nutzung.

Trotz der aufgeführten Unterschiede sind die Beträge im PS der *FU 2* denen der PS der *FU 1* sehr ähnlich. Insbesondere gibt es keine Unterschiede in der Reihenfolge der Prozessschritte nach den Anteilen an den THG-Emissionen.

### 4.3.1. Identifizierung signifikanter Parameter des PS der FU 2

Analog zur *FU 1* wird die Identifizierung signifikanter Parameter für die *FU 2* durchgeführt. Die zugehörigen Erklärungen finden sich in Kap. 4.2.1. Bei der Nutzung von Schwarzerde zur Pflanzung eines neuen Stadtbaumes werden im gesamten PS 3.336  $kg\ CO_2 - Eq$  (Pyreg) bzw. 3.143  $kg\ CO_2 - Eq$  (CTS) THG emittiert und 3.975  $kg\ CO_2 - Eq$  (Pyreg, 4.394  $kg\ CO_2 - Eq$  mit Gutschrift) bzw. 3.793  $kg\ CO_2 - Eq$  (CTS, 4.151  $kg\ CO_2 - Eq$  mit Gutschrift) der Atmosphäre entnommen. Tab. 4.6 zeigt die Beiträge an THG-Emissionen der einzelnen Prozesse für die beiden PS der *FU 2*. Die Prozesse der *Photosynthese*, *Mischholz*, *Umwandlung zu Schwarzerde*, *Pyrolyse*, *Photosynthese*, *CO<sub>2</sub> in Obst und Gemüse* und *Effekte der Schwarzerde* haben einen signifikanten Anteil an den THG-Emissionen. Im Pyreg-PS trägt außerdem der Prozess der *Stromerzeugung (Braunkohle)* in signifikantem Maße zu den THG-Emissionen bei. Der

Tabelle 4.6.: Prozessmodule mit nennenswertem Beitrag an den THG-Emissionen der beiden PS der *FU 2*

Prozessmodul	THG-Emissionen	THG-Emissionen
	Pyreg	CTS
	$kg\ CO_2 - Eq$	$kg\ CO_2 - Eq$
Photosynthese, Mischholz	-3747	-3571
Schwarzerdeherstellung	1721	1721
Pyrolyseprozess	869	869
Photosynthese, CO <sub>2</sub> in Obst und Gemüse	-206	-206
Effekte der Schwarzerde	187	187
Stromerzeugung (Braunkohle)	87	12
Stromerzeugung (Steinkohle)	34	5
Baumaschinenbetrieb, Diesel	29	29
Skidder-/Seilschlepper-Betrieb	24	23
Kettensäge-Betrieb	24	23
Abwasseraufbereitung (Bioöl-Raffinerie)	16	15
Wärme- und Stromerzeugung (Erdgas)	14	2
Betrieb Hydraulik-Bagger	13	13
LKW-Transport	12	12
Positive THG-Emissionen	3336	3143
Negative THG-Emissionen (ohne Gutschrift)	-3975	-3793
Gutschrift (Sz1-DE)	-419	-358
Negative THG-Emissionen (mit Gutschrift)	-4394	-4151

Vergleich der Verteilungen der THG-Emissionen auf die einzelnen Prozesse des PS der *FU 2* mit dem PS der *FU 1* (s. Tab. 4.3) zeigt ähnliche Verhältnisse. Insbesondere die Prozesse mit signifikantem Anteil an den THG-Emissionen sowie die Reihenfolge dieser Prozesse nach deren Anteil an den THG-Emissionen sind identisch. Tab. 4.7 stellt dar, welche THG in welcher Menge in den beiden PS der *FU 2* auftreten und welche THG-Emissionen fossilen und welche nicht-fossilen Ursprungs sind. Es ist zu erkennen, dass CO<sub>2</sub> den Großteil der THG-Emissionen ausmacht und die N<sub>2</sub>O- und die CH<sub>4</sub>-Emissionen in geringerem Maße zu den THG-Emissionen beitragen. Darüber hinaus wird deutlich, dass die THG-Emissionen größtenteils nicht-fossilen

Tabelle 4.7.: Beiträge verschiedener THG an den THG-Emissionen (*FU 2*)

Fluss	THG-Emissionen	THG-Emissionen
	Pyreg	CTS
	<i>kg CO<sub>2</sub> – Eq</i>	<i>kg CO<sub>2</sub> – Eq</i>
CO <sub>2</sub> , in Luft	-3980	-3797
CO <sub>2</sub> , nicht-fossil	2505	2485
CO <sub>2</sub> , fossil	454	294
N <sub>2</sub> O, nicht-fossil	201	201
N <sub>2</sub> O, fossil	5,67	3,66
CH <sub>4</sub> , nicht-fossil	135	133
CH <sub>4</sub> , fossil	25	17,3
CO, nicht fossil	0,58	0,77
CO, fossil	8,38	7,77
SF <sub>6</sub>	0,61	0,52
Positive THG-Emissionen	3336	3143

Ursprungs sind.

Im Vergleich zum PS der *FU 1* sind Unterschiede zu erkennen, deren Ursache hauptsächlich der größere Anteil an Pflanzenkohle in der Schwarzerde ist. Damit geht ein größerer Beitrag des Pyrolyseprozesses an den gesamten THG-Emissionen einher. Auch der Prozessschritt *Ausbringung* hat einen größeren Beitrag an den gesamten THG-Emissionen. Diese Unterschiede führen allerdings zu keinen Änderungen der Reihenfolge der signifikanten Parameter und damit auch zu keinen weiteren Erkenntnissen als die im PS der *FU 1* (Kap. 4.2.1).

#### 4.3.2. Sensitivitätsanalyse des PS der *FU 2*

Die beiden PS *FU 1* und *FU 2* gleichen sich in der Aufteilung der THG-Emissionen auf die Prozessschritte (Tab. 4.2 und 4.2). Durch den höheren Pflanzenkohlegehalt in der Schwarzerde für die städtische Anwendung ist der Anteil des Pyrolyseprozesses höher. Gleiches gilt für das Ausbringen der Schwarzerde bei der städtischen Anwendung (Aufwand für Bagger) im Vergleich zur landwirtschaftlichen Ausbringung (Aufwand für Verteilen und Pflügen). Beide Prozesse haben dadurch zwar größere Anteile an den THG-Emissionen, allerdings wirkt sich dies nicht auf die identifizierten, signifikanten Prozesse bzw. die Reihenfolge hinsichtlich deren Anteile am Gesamtergebnis (Tab. 4.3 und 4.6) aus. Eine Sensitivitätsanalyse zum PS der *FU 2* würde eine etwas höhere Sensitivität des Gesamtergebnisses gegenüber dem Pyrolyseprozess und der Ausbringung und folglich etwas geringere Sensitivitäten gegenüber den anderen Einflussparametern aufzeigen. Allerdings würden keine weiteren, über die bei der Sensitivitätsanalyse des PS der *FU 1* bereits herausgearbeiteten, Erkenntnisse gewonnen und somit keine weiterführenden Aussagen getroffen werden. Aus diesem Grund wird für das PS der *FU 2* auf die Durchführung einer Sensitivitätsanalyse verzichtet und mit den beschriebenen Unterschieden zum PS der *FU 1* auf die Sensitivitätsanalyse in Kap. 4.2.2 verwiesen.

#### 4.4. Vollständigkeits- und Konsistenzprüfung

Zur Beurteilung der Ökobilanz wird die **Vollständigkeit** geprüft, d.h. ob alle relevanten Prozesse und Input- und Outputgrößen innerhalb des Untersuchungsrahmens bei der Erstellung der Ökobilanz berücksichtigt werden. Dazu wird zunächst aus verfahrenstechnischer Sicht herausgearbeitet, welche Prozesse notwendig sind, um die einzelnen Produkte der untersuchten Produktsysteme mit ihren spezifischen Eigenschaften und Rahmenbedingungen herzustellen bzw. umzuwandeln. Außerdem werden bei der Betrachtung der einzelnen Prozessmodule zahlreiche (Literatur-)Recherchen durchgeführt, mit dem Ziel, eine umfassende Übersicht der notwendigen Input- und Outputgrößen zu erhalten und bei Bedarf Ergänzungen vorzunehmen. Da jedem Prozess das thermodynamische Prinzip des Masse- und Energieerhaltes zu Grunde liegt, wird zu jedem Prozessmodul eine Massen- und Energiebilanz durchgeführt. Bei sich nicht schließenden Massen- oder Energiebilanzen werden weitere Recherchen betrieben, um fehlende Input- und Outputgrößen zu identifizieren, oder die zu Grunde liegenden Datenberechnungen überprüft. Diese Herangehensweise bewirkt eine iterative Überarbeitung jedes Prozessmoduls, wodurch das jeweilige Prozessmodell immer näher an den tatsächlichen Prozess (Realität) herangeführt wird. Kein Modell kann die Realität zu 100 % abbilden. Deshalb ergibt die Vollständigkeitsprüfung, dass in der Ökobilanz alle relevanten, insbesondere im Hinblick auf die THG-Emissionen inklusive der Entnahme aus der Atmosphäre, Input- und Outputflüsse mit bestem Wissen und Gewissen identifiziert und bei der Erstellung der Sachbilanz berücksichtigt werden.

Die Beurteilung der unterschiedlichen Daten und Methoden findet im Hinblick auf die gleiche Genauigkeit und Konsequenz bei deren Verwendung bei der **Konsistenzprüfung** statt. In dieser Ökobilanz sind Unterschiede in der Konsistenz der verwendeten Daten und Methoden vorzufinden. Während für die Prozessschritte innerhalb des Untersuchungsrahmens der Strombedarf dem Stromerzeugungsmix für 2018 in Deutschland (Modell nach J. Buchgeister auf Basis der Erhebungen des BDEW<sup>3</sup> und BMWi<sup>4</sup>) zugeordnet wird, wird für alle vorgelagerten und nachgelagerten Prozesse ein für jedes Prozessmodul, individuell vorgegebener Strommix verwendet. Aufgrund des umfangreichen Prozessnetzwerks (>10.000 Prozessmodule), das die Prozessschritte des Untersuchungsrahmens aufspannen, würde eine individuelle Überarbeitung der entsprechenden Prozessmodule einen erheblichen Mehraufwand bei lediglich geringfügigem Nutzen mit sich bringen (vgl. signifikante Parameter in Kap. 4.2.1). Hierbei wäre dann auch der Orts- und Zeitbezug zu berücksichtigen, sprich ein lokal und zeitlich angepasster Strommix. Der lokale Strombedarf innerhalb des Untersuchungsrahmens wird mit dem zuvor erwähnten Strommix-Modell zwar abgebildet, allerdings wird eine zeitliche Anpassung nicht vorgenommen. Da der Strommix aufgrund äußerer Einflüsse wie z. B. Wetter, Covid-Maßnahmen, Krieg etc. in den letzten drei Jahren großen Schwankungen unterlag, ist die Verwendung des Stromerzeugungsmixes 2020 mit einem, im Vergleich zum Strommix 2021, höheren EE-Anteil wegen einer deutlich geringeren Stromnachfrage ungeeignet. Aus diesen

---

<sup>3</sup>Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V. (2019)

<sup>4</sup>Bundesministerium für Wirtschaft (2019)

Gründen wurde auf den Stromerzeugungsmix aus 2018 zurückgegriffen, da für dieses Jahr sowohl ein hoher Strombedarf der (Export-)Industrie als auch der Haushalte und weiterer Sektoren zu decken war und externe Ereignisse nur geringfügig Einfluss genommen haben.

Außerdem ist die Datenqualität der entstehenden Emissionen beim Abbau organischer Substanzen nicht einheitlich. Dies rührt aus der Verfügbarkeit der Daten. Während zahlreiche Studien existieren, die Messwerte zu den Emissionen von Abbauprodukten des Pflanzkohlekompostes bei der Kompostierung bereitstellen, sind derzeit keine Studien bekannt, die die Emissionen von Abbauprodukten der Schwarzerde im Boden beschreiben. Aus diesem Grund werden für die Kompostierung Messdaten zu den CO<sub>2</sub>- und CH<sub>4</sub>-Emissionen verwendet, und für die Nutzung der Schwarzerde im Boden werden die Kohlenstoffabbauraten von gelagerter Schwarzerde und die Emissionsverteilung von Torf-Schwarzerde-Substraten genutzt. Da der Abbau der Schwarzerde im Boden ein relevanter Prozess innerhalb des Untersuchungsrahmens ist, die dabei entstehenden THG-Emissionen einen signifikanten Bestandteil der Gesamtemissionen ausmachen, und die Wissenschaft noch keine verwertbaren Messdaten liefert, ist diese Vorgehensweise zur Abschätzung der Emissionswerte bei der Verwendung und Berechnung der Daten zu vertreten. Die mit diesen Daten bzw. diesem Berechnungsmodell einhergehenden Unsicherheiten wurden in Kap. 4.2.2 untersucht und deren Einfluss auf die Sensitivität des Gesamtergebnisses als gering eingeordnet.

#### 4.5. Fehlerbetrachtung

Bei der Datenberechnung und Erstellung der Prozessmodule wird durch konservative Annahmen versucht, das Endergebnis richtungssicher zu erhalten und die Aussagekraft zu stärken. So werden bspw. Aufwände für das Rücken und Sägen des Waldrestholzes berücksichtigt, obwohl es üblich ist, diese Prozessaufwendungen allein dem verwendeten Stammholz z.B. für Möbel zu zurechnen. Dieser Aufwand für das Rücken und die Sammlung des Waldrestholzes sowie des Grünschnittes führen für das Pyreg-PS der *FU 1* zu  $1.310 \text{ kg CO}_2 - Eq$  an THG-Emissionen. Dies zeigt, welche Bedeutung diese konservativen Vorgehensweise für die Aussagekraft der gesamten THG-Emissionen besitzt.

Zum Teil werden Werte zu den Emissionen einer P500-Anlage zur Abbildung des Pyrolyseprozesses einer PX1500-Anlage (beides Pyreg) verwendet. Da die P500-Anlage das Vorgängermodell ist und einige Verbesserungen bei der PX1500-Anlage zu einer verbesserten Prozessführung und -kontrolle führen, sind die verwendeten Werte als konservativ einzuschätzen. Aufgrund mangelnder Datenlage hinsichtlich der Rauchgas-/Abgas-Dichte ist auch die Umrechnung dieser Werte fehlerbehaftet. Einerseits sind die Zustandsgrößen (Temperatur und Druck) des Rauchgases, bei dem die Konzentrationen gemessen werden bzw. bei dem das Rauchgas aus der Anlage austritt, nicht genau bekannt, und andererseits ist die Rauchgasdichte stark abhängig von diesen Zustandsgrößen und der ebenfalls unbekanntem Rauchgas-



zusammensetzung. Allerdings werden die Emissionen von CO<sub>2</sub>, dem einzigen<sup>5</sup> THG im Pyrolyseprozess mit signifikantem Einfluss (s. Kap. 4.2.1), auf Basis von Literaturwerten berechnet, die keine Umrechnung mit der Rauchgasdichte bedürfen. Da ein möglicher Fehler, durch die Verwendung einer ungeeigneten Rauchgasdichte, sich somit nicht auf das Ergebnis der THG-Emissionen auswirkt, bedarf es hier keiner zusätzlichen Sensitivitätsanalyse. Des Weiteren wird der Konstruktionsaufwand für die Pyrolyseanlage zwar anhand der Gesamtmasse berechnet, allerdings lässt dies großen Spielraum bei der Auswahl der Art und Menge der einzelnen Materialien insbesondere von Metallwerkstoffen zu und ist dementsprechend mit einer hohen Unsicherheit verbunden. Da auch hier der Einfluss auf die THG-Emissionen nicht signifikant ist, ist eine weitere Betrachtung erst notwendig, wenn weitere Wirkungskategorien (z. B. Ressourcenknappheit etc.) untersucht werden sollen.

Die Rohdaten zu den kumulierten THG-Emissionen bei der Kompostierung aus Vandecasteele et al. [2016] sind bezogen auf die Grundfläche der Kompostmiete. Mit dem Abbau des Kompostmaterials ändert sich neben der Masse auch das Volumen und somit auch die Grundfläche der Kompostmiete. Zur Umrechnung dieser Rohdaten wird aufgrund fehlender Angaben zur Verringerung der Grundfläche während der Kompostierung mit der Grundfläche der Miete zum Startpunkt der Kompostierung gerechnet, wodurch die THG-Emissionen bei der Kompostierung sehr konservativ abgeschätzt werden (s. Berechnungshinweis in A.4 zu Tab. A.18). Da das PS sehr sensitiv auf den Prozess der *Umwandlung zu Schwarzerde* reagiert (Kap. 4.2.2), würde sich eine entsprechende Annahme zur Verringerung der Kompost-Grundfläche äußerst vorteilhaft auswirken und das Gesamtergebnis um einige Faktoren verbessern.

Zur Berechnung der Inputflüsse wird der Massenverlust bei der Kompostierung herangezogen. Da der Massenverlust des frisch angesetzten Kompost-Materials wesentlich höher ist als der der Pflanzenkohle, wird er dem Kompostmaterial zugerechnet. Dadurch wird der Bedarf an Grünschnitt bzw. Bioabfall zu hoch und der Bedarf an Pflanzenkohle zu niedrig angesetzt. Die Verteilung der negativen THG-Emissionen haben allerdings gezeigt, dass, trotz des deutlich geringeren Anteils der Pflanzenkohle bei der Co-Kompostierung (10 M.-% Pflanzenkohle, 85 M.-% Kompostmaterial und 5 M.-% Gesteinsmehl)), die vorgelagerten THG-Emissionen der Pflanzenkohle niedriger (größerer negativer Wert) sind als für das Kompostmaterial (s. Kap. 4.2). Damit würde bei einem höheren Pflanzenkohle-Bedarf auch das Endergebnis vorteilhafter (geringere THG-Emissionen) werden.

Da bei der Schwarzerde-Anwendung auf der landwirtschaftlichen Fläche neben der Einarbeitung der Schwarzerde weitere Arbeitsvorgänge (z. B. Ausbringen von weiterem Dünger, Bodenauflockerung etc.) notwendig sind, können diese auch miteinander kombiniert werden. Damit wäre eine Allokation des Pflügens möglich. In der Sachbilanz wird jedoch das Pflügen vollständig der Schwarzerde zugeordnet und damit konservativ abgeschätzt.

Für die Strombedarfe innerhalb der Prozesskette wird der Stromerzeugungsmix in Deutschland für 2018 verwendet (s. A.32). Da die Entwicklungen des Strommixes in Deutschland zu

---

<sup>5</sup>CO tritt ebenfalls als THG auf und muss mithilfe der Rauchgasdichte berechnet werden, allerdings ist der Anteil der CO-Emissionen an den THG-Emissionen bei der Pyrolyse nicht signifikant

höheren Anteilen an EE geht (u.a. durch die im KSG verfassten Ziele zur Reduktion der THG-Emissionen und Koalitionsvertrag der Regierung sieht 80 % EE-Anteil bis 2030 vor), ist die Verwendung des weniger aktuellen Strommixes als konservativ einzuordnen.

Die Fehlerbetrachtung zeigt, dass in allen Fällen, in denen Annahmen statt Messwerte zur Berechnung der Daten verwendet wurden, konservative Abschätzungen, die vermutlich zu Lasten eines Schwarzerde-Einsatzes gehen, getroffen wurden. Somit ist ein möglicher Vorwurf einer zu vorteilhaften Auslegung der Datenberechnung zugunsten der Schwarzerde nicht begründet.

Bei der Berechnung der Gutschrift sind keine Aufwände für die Infrastruktur berücksichtigt, die zur Nutzung der überschüssigen Energien benötigt wird (Kap. 3.2.3. Würde man diese Aufwände berücksichtigen, würde sich die neu errechnete Gutschrift für die thermische Energie vermutlich stärker verringern als die Gutschrift für die elektrische Energie, da das Stromnetz mit kleineren Infrastrukturen leichter zugänglich ist und somit für geringere THG-Emissionen sorgt. Aufgrund der Allokation der mit dem Stromnetz im Zusammenhang stehenden, Input- und Outputflüssen auf viele verschiedenen „Produktflüsse“ (Verbraucher, z. B. Haushalte, Industrie etc., oder Erzeuger von Strom, z. B. Haushalte (Photovoltaik), Windkraftanlagen) wären die Aufwände zu Ungunsten der Gutschrift für die elektrische Energie niedriger als für die thermische Energie.

### 4.6. Diskussion und Empfehlungen

Zur Einordnung des NET-Potenzials der Schwarzerdeanwendung in der Landwirtschaft und für Stadtbäume in Deutschland wird das Pyreg-PS in zwei Szenarien betrachtet. In Deutschland werden 11,7 Millionen Hektar als Ackerfläche genutzt<sup>6</sup>. Wird auf dieser gesamten Fläche Schwarzerde angewendet, können knapp 28 Millionen Tonnen CO<sub>2</sub>-Eq an THG (74 Mio. Tonnen CO<sub>2</sub>-Eq mit Gutschrift) in drei Jahren eingespart werden. Damit kann ein Großteil der in der deutschen Landwirtschaft jährlich (2021) emittierten 61 Mio. Tonnen CO<sub>2</sub>-Eq<sup>7</sup> ausgeglichen werden. Mit Einrechnung der Gutschriften und auf ein Jahr bezogen (ca. 25 Mio. Tonnen CO<sub>2</sub>-Eq mit Gutschrift) ließen sich ca. 3 % der gesamten jährlichen THG-Emissionen aus dem Jahr 2021 in Deutschland reduzieren.

Zur Betrachtung des THG-Einsparungspotenzials einer Schwarzerdeanwendung für neugepflanzte Stadtbäume dient die Stadt Karlsruhe als Maßstab. Bei etwa 900 Neupflanzungen pro Jahr<sup>8</sup> können knapp 575 Tonnen an CO<sub>2</sub>-Eq (951 Tonnen CO<sub>2</sub>-Eq mit Gutschrift) eingespart werden. Würde man das Karlsruher Szenario (300.000 Einwohner<sup>9</sup>) auf ganz Deutschland

---

<sup>6</sup>Deutscher Bauernverband - <https://www.bauernverband.de/themendossiers/ackerbau/themendossier/ackerbau-in-deutschland>

<sup>7</sup>Umweltbundesamt (2021) - <https://www.umweltbundesamt.de/presse/pressemitteilungen/treibhausgasemissionen-stiegen-2021-um-45-prozent>

<sup>8</sup>Stadt Karlsruhe - <https://www.karlsruhe.de/b3/freizeit/gruenflaechen/baeume.de>

<sup>9</sup>Stadt Karlsruhe - <https://www.karlsruhe.de/b4/stadtentwicklung/statistik/kennzahlen.de>

(83,2 Mio Einwohner <sup>10</sup> bei 77,5 % <sup>11</sup> Stadtbevölkerung) beziehen, könnten 124.000 Tonnen an CO<sub>2</sub>-Eq (204.000 Tonnen CO<sub>2</sub>-Eq mit Gutschrift) jährlich reduziert werden.

Voraussetzung für die Anwendung von Schwarzerde in großem Maßstab ist das Potenzial an nachhaltig produzierter Biomasse für die Herstellung von Schwarzerde, das im Rahmen einer Bedarfsanalyse evaluiert werden muss, da viele Nutzungskonkurrenzen vorliegen. Genauso ist die Verfügbarkeit an Pyrolyseanlagen (Menge an Pflanzenkohle) ein entscheidender Faktor bei der Realisierung einer großangelegten Schwarzerde-Anwendung. Eine positive Entwicklung des Marktes ist durch zunehmende Zulassungen an Pyrolyseanlagen zur Pflanzenkohle-Herstellung (nach dem EBC-Zertifikat) und durch Skalierung zu größeren Anlagen zu beobachten [Schmidt and Hagemann, 2021], [PYR, 2022]. Nach Schmidt and Hagemann [2021] müssten weltweit 400.000 industrielle Pyrolyseanlagen bis zum Jahr 2050 in Betrieb sein, um 240 Milliarden Tonnen CO<sub>2</sub>-Eq (entspricht 30 % des THG-Budgets zur Beschränkung der globalen Erderwärmung auf 2°C) in Pflanzenkohle zu binden. Eine Verwendung der Pflanzenkohle zur Schwarzerdeherstellung in dem Maßstab würde diese THG-Reduktion verstärken und gleichzeitig zahlreiche weitere Sekundäreffekte mit sich bringen. Auch wenn diese Sekundäreffekte schwer messbar sind und daher überwiegend qualitativ beschrieben werden, ist deren Nutzen u.a. als Ökosystemdienstleistung, zur Resistenz von Ökosystemen und zur Stärkung der Ernährungssouveränität von Vorteil.

Im berechneten Pyreg-PS der *FU 1* sind von 48.811 *kg CO<sub>2</sub> – Eq* an THG, die in der Biomasse „gespeichert“ sind, nur noch 2.389 *kg CO<sub>2</sub> – Eq* THG (6.291 *kg CO<sub>2</sub> – Eq* mit Gutschrift) in einem Hektar mit Schwarzerde angereicherter landwirtschaftlicher Fläche nach drei Jahren gespeichert. Demnach verblieben nur knapp 5 % (13 % mit Gutschrift) in der Schwarzerde. Das könnte einen Vorwurf mangelnder Effektivität der Schwarzerde als NET aufbringen. Vielmehr werden genauere Daten in späteren Untersuchungen vermutlich zeigen, dass sämtliche Belastungen (positive THG-Emissionen) an zu hohen Mengen dem Schwarzerde-Einsatz zugerechnet wurden, und das Gesamtergebnis für die Schwarzerde daher günstiger aussieht als hier berechnet (s. Kap. 4.5). Des Weiteren wird unbehandelte Biomasse in natürlichen Ökosystemen schnell abgebaut (mit einzelnen Ausnahmen wie z. B. dem natürlichen Inkohlungsprozess von Biomasse [Quicker and Weber, 2016]) und trägt im Gegensatz zur Schwarzerde nicht stabil über mehrere Jahrhunderte und Jahrtausende zur Kohlenstoffspeicherung bei (Kap. 2.2.5). Für gewöhnlich wird die konventionelle Kompostierung zur Stabilisierung der Biomasse durchgeführt. Beim Vergleich der Herstellung von Schwarzerde mit der konventionellen Kompostierung liegt der Unterschied hauptsächlich in der Last, die die Herstellung der Pflanzenkohle nach sich zieht und dem Nutzen der Stabilisierung sowie der Verringerung der entstehenden THG beim Abbau der organischen Substanz. Zur Einordnung der Ergebnisse dieser Arbeit und zur Verdeutlichung der Vorteile einer Schwarzerdeanwendung ist eine Gegenüberstellung mit einem konventionellen Produktsystem zu empfehlen.

Die Auswertung der Ergebnisse der Wirkungsabschätzung zeigt, dass die THG-Emissionen

---

<sup>10</sup>Statista (2021) - <https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Bevoelkerung/Bevoelkerungsstand/inhalt.html>

<sup>11</sup>Statista (2020) - <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/662560/umfrage/urbanisierung-in-deutschland/>

für beide FU ein negatives Vorzeichen aufweisen, also THG-entziehend sind, und damit die Anwendung von Schwarzerde sowohl für die landwirtschaftliche als auch für die städtische Anwendung als NET bewertet werden kann. Berücksichtigt man eine mögliche Gutschrift durch die Auskopplung von überschüssig produzierter thermischer und/oder elektrischer Energie, werden deutlich negativere (also günstigere) Werte durch einen höheren Entzug an THG aus der Atmosphäre erreicht. Die Berechnungen dieser Gutschriften sind exemplarisch und erfüllen nicht die Anforderungen der DIN EN 14040 und 14044 (s. Kap. 3.2.3) und werden deshalb zur Einordnung des potenziellen Effektes einer möglichen Gutschrift herangezogen. Zum Treffen genauerer Aussagen bedarf es weiterer Prozesse, Bedingungen und Spezifizierungen, wie z. B. Art des Brennstoffes (Erdgas, Öl, Kohle etc.), Berücksichtigung der Aufwände für die erforderliche Infrastruktur etc. Dieser Umfang überschreitet die Kapazität dieser Arbeit. Deshalb sollte eine Erweiterung des Untersuchungsrahmens und Produktsystems erfolgen, um im Rahmen einer weiteren Arbeit diese Fragestellungen zu behandeln. Der Überschussstrom im CTS40-Prozessmodell reicht bspw. aus, um den Strombedarf im Prozess der *Umwandlung zu Schwarzerde* zu decken. Deswegen sollte zum Aufzeigen weiterer Potenziale auch die Möglichkeit der Integration der Nebenprodukte (Wärme, Strom oder sogar Biokraftstoffe auf Basis des Pyrolyseöls/-gases) in Prozesse innerhalb des bisherigen Produktsystems untersucht werden.

Zur Verringerung der Emissionen von CO<sub>2</sub>, dem THG mit dem größten Anteil der THG-Emissionen im gesamten Untersuchungsrahmen, stellt die CCS-Methode (*Carbon Capture and Storage*) eine Möglichkeit dar. So könnte das CO<sub>2</sub> zur Synthese verschiedener chemischer Energieträger genutzt werden (Methanisierung, Methanolsynthese, Fischer-Tropsch-Synthese etc.) oder in geeigneten Lagern gespeichert werden. Die teilweise stoffliche Verwendung des Pyrolysegases anstatt der rein energetischen Nutzung ist eine weitere Möglichkeit zur Reduzierung oder Vermeidung von THG. Es könnte ein Teil des Pyrolysegases zur Wärmebereitstellung für die Pyrolyse und die Trocknung des Holzes verwendet werden und ein anderer Teil, z. B. die kondensierbare, ölige Fraktion, zur Herstellung eines Bioöls.

Sofern es möglich ist, werden in der Ökobilanz Daten, Annahmen und Bedingungen für die Berechnung verwendet, die für den deutschsprachigen Raum gelten. Gleichzeitig werden möglichst aktuelle Daten oder Daten, die den gleichen Zeitraum repräsentieren, verwendet. Der gleiche Orts- und Zeitbezug lässt sich nicht ausnahmslos realisieren, was eine Einschränkung der spezifischen Aussagen darstellt. Darüber hinaus ist eine Aussage weder allgemein- noch endgültig und bezieht sich auf die festgelegten FU. Bei der Verwendung der Aussage sollten stets die Abweichungen durch lokale und zeitliche Gegebenheiten berücksichtigt werden.

In Folgearbeiten sollten die Prozesse einer „üblichen“ Kompostierung ohne Schwarzerde und einer konventionellen und auch Bio-Landwirtschaft ohne Schwarzerde-Einsatz mit den Prozessen der Schwarzerde-Herstellung und ihres -Einsatzes vergleichend berechnet werden. Dann dürften die Ergebnisse der Schwarzerde-Verwendung in Bezug auf ihre THG-Emissionen noch deutlich günstiger ausfallen als hier berechnet. Daher sind solche Untersuchungen zur Validierung möglicher Potenziale zu empfehlen. Auch eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

der Schwarzerde sollte in einem nächsten Schritt stattfinden, um eine Schwarzerde-Anwendung in einem monetär-dominierten System bewerten zu können.

## 5. Zusammenfassung & Ausblick

Die Arbeit befasst sich mit der Methode der Ökobilanz (standardisiert nach den Normen DIN ISO 14040 und DIN ISO 14044). Nach dem Lebenszyklusansatz, den diese Ökobilanz verfolgt, werden alle Input- und Outputflüsse, die entlang der Prozesskette von der Herstellung bis zur Anwendung von Schwarzerde auftreten, identifiziert und deren Auswirkung auf die Umwelt quantifiziert. Ziel der Arbeit ist die Bestimmung der Treibhausgas-Emissionen (THG-Emissionen), die mit der Herstellung und Anwendung der Schwarzerde für zwei Untersuchungsrahmen (Anwendung von Schwarzerde in der Landwirtschaft und für Stadtbäume) einhergehen. Darauf aufbauend wird eine Aussage im Hinblick auf das Erderwärmungspotenzial und die Verwendung von Schwarzerde als Negative Emissions-Technologie (NET) gemacht.

Die Prozesskette von der Herstellung bis zur Nutzung von Schwarzerde wird in die fünf Prozessschritte *Biomasseerzeugung, Pyrolyse, Umwandlung zu Schwarzerde, Ausbringung* und *Nutzung* aufgeteilt (Kap. 3.1). Zur Quantifizierung der THG-Emissionen wurden Daten aus vorhandenen Datenbanken, Literaturrecherchen und direkt von Herstellern und Betreibern erhoben. Aus der Datenberechnung ergibt sich die Sachbilanz, die mithilfe einer standardisierten Wirkungsabschätzungsmethode des IPCC-Klimamodells ausgewertet wird. Die resultierenden Ergebnisse zu den THG-Emissionen liefern Aussagen zum Erderwärmungspotenzial der Herstellung und Anwendung von Schwarzerde für die zwei betrachteten Untersuchungsrahmen, der Anwendung von Schwarzerde in der Landwirtschaft (*funktionelle Einheit (FU 1)*) und für Stadtbäume (*FU 2*).

Für die Anwendung von 16,5 Tonnen Trockenmasse Schwarzerde auf einem Hektar landwirtschaftlicher Fläche in drei Jahren (*FU 1*) werden  $-2.389 \text{ kg CO}_2 - \text{Eq}$  an THG berechnet (Kap. 4.2). Demnach werden der Atmosphäre mehr als zwei Tonnen an THG entnommen, sodass die Herstellung und Anwendung von Schwarzerde eine NET darstellt. Eine zusätzliche Gutschrift durch die überschüssig produzierte thermische Energie, die aus dem Pyrolyseprozess ausgekoppelt werden kann, verbessert das Ergebnis auf  $-6.291 \text{ kg CO}_2 - \text{Eq}$ . Wird der modellierte Pyrolyseprozess (nach Pyreg) hinsichtlich des Anlagenbaus, der Pyrolysetechnologie und der Betriebsweise modifiziert (Pyrolyseprozess nach CT-Schuster), berechnen sich die Ergebnisse zu  $-2.486 \text{ kg CO}_2 - \text{Eq}$  (ohne Gutschrift) bzw.  $-5.816 \text{ kg CO}_2 - \text{Eq}$  (mit Gutschrift).

Für die Nutzung von 1.080 kg Schwarzerde bei der Pflanzung eines neuen Stadtbaumes über drei Jahre (*FU 2*) werden  $-639 \text{ kg CO}_2 - \text{Eq}$  (ohne Gutschrift) und  $-1.058 \text{ kg CO}_2 - \text{Eq}$  an THG (mit Gutschrift) berechnet (Kap. 4.3). In den untersuchten Produktsystemen (*FU 1* und *FU 2*) verursacht der Abbau des Kompostmaterials im Prozess der *Umwandlung zu Schwarzerde* die meisten positiven THG-Emissionen, gefolgt von den positiven THG-Emissionen im Prozess

der *Pyrolyse*, die vorwiegend mit der Verbrennung der Pyrolysegase und dem Strombedarf für die Anlage im Zusammenhang stehen. Die negativen THG-Emissionen innerhalb der Prozesskette kommen durch die Entnahme von CO<sub>2</sub> aus der Atmosphäre während der Photosynthese zustande, was zur Minderung des THG-Ausstoßes und der damit verbundenen Erderwärmung erwünscht ist.

Aufgrund der Ergebnisse der beiden Produktsysteme ist die Anwendung von Schwarzerde im Hinblick auf die Reduktion der THG im Sinne des Bundes-Klimaschutzgesetzes als NET zu empfehlen. Eine ausgedehnte Schwarzerdeanwendung als Teil einer nationalen THG-Reduktions-Strategie könnte neben der Entnahme von THG aus der Atmosphäre eine Lösung weiterer, ernstzunehmender Problematiken wie z. B. der fortschreitenden Bodendegradation, der Ernährungssouveränität etc. darstellen.

Zur Beurteilung der Ergebnisse und den zugrundeliegenden Daten und Berechnungen hinsichtlich Sensitivität (Kap. 4.2.2), Vollständigkeit und Konsistenz (Kap. 4.4) werden entsprechende Prüfungen durchgeführt. Diese werden durch eine Fehlerbetrachtung ergänzt (Kap. 4.5). Diese zeigt auf, dass alle Unsicherheiten bei der Datenberechnung durch konservative Abschätzungen berücksichtigt werden. Daher beruht das richtungssichere Ergebnis auf einem robusten Berechnungsmodell über den gesamten Lebenszyklus. Vielmehr werden genauere Daten in folgenden Untersuchungen vermutlich zeigen, dass sämtliche Belastungen (positive THG-Emissionen) hier in zu hohen Mengen der Schwarzerde-Anwendung zugerechnet wurden und das Gesamtergebnis für die Schwarzerde daher günstiger ausfällt als hier berechnet. Aufgrund mangelnder Datenlage betrachtet diese Arbeit lediglich die Kohlenstoffspeicherung in der Schwarzerde, die stabilisierende und THG-reduzierende Wirkung der Schwarzerde auf den Abbau von organischem Material und die Gutschrift für die überschüssig produzierte Energiemengen. Alle weiteren Effekte wie z. B. die Verbesserung der Bodenfruchtbarkeit, der Ertragssteigerung, der Resistenz gegenüber Extremwetterereignissen (Starkregen, Trockenperioden etc.), der biophysikalischen Funktion und Biodiversität von Ökosystemen etc., [Quicker and Weber, 2016], [Kammann et al., 2016], [Godlewska et al., 2017] sind in der Regel entweder nicht umfassend präzise im Detail belegt oder nicht ausreichend quantitativ beschrieben. Diese weisen auf ein zusätzliches Potenzial zur Steigerung der Entnahme von THG aus der Atmosphäre hin.

Zur Verbesserung des Produktsystems sind verschiedene Möglichkeiten wie z.B. die *Carbon Capture and Storage*-Technologie (CCS-Technologie) gekoppelt mit einer chemischen Synthese (z. B. Methanol-Synthese, Fischer-Tropsch-Synthese etc.) und die Nutzung des Pyrolysegas zum Teil für energetische Zwecke (z.B. Wärmebedarf beim Trocknungsprozess, Strombedarf etc.) und zum Teil für eine stoffliche Weiterverwendung (z.B. Bioöl etc.) denkbar. Eine Erweiterung des bestehenden Untersuchungsrahmens, z. B. um die zuvor genannten Prozesse bzw. Produktsysteme, würde sowohl Beschränkungen als auch weitere Potenziale des gesamten Untersuchungsrahmens aufzeigen.

Diese Arbeit legt den Fokus auf die THG-Emissionen und das Erderwärmungspotenzial. Gleichzeitig liefert die erstellte Ökobilanz auch die Ergebnisse weiterer Wirkungskategorien, i.e. Ab-

bau der Ozonschicht, menschliche Gesundheit, Versauerung, Eutrophierung, Ressourcenknappheit uvm. Damit kann auch eine Bewertung des Einsatzes der Schwarzerde im Hinblick auf die zuvor thematisierte Bodendegradierung und Ernährungssouveränität erfolgen. Eine vernünftige Bewertung weiterer Umweltwirkungen ist sehr umfangreich und im Rahmen dieser Arbeit nicht möglich gewesen. Da der Schutz unserer Umwelt über die Betrachtung von THG-Emissionen und Maßnahmen zu ihrer Vermeidung hinausgeht, ist die Betrachtung weiterer Umweltwirkungen in einer weiterführenden Arbeit notwendig. Außerdem muss in einem weiteren Schritt eine ökonomische Analyse der untersuchten Prozesskette durchgeführt werden, um die Wirtschaftlichkeit einer Schwarzerde-Anwendung zu prüfen.

Des Weiteren ist auf Basis dieser Arbeit zum Einsatz von Schwarzerde in der Landwirtschaft ein Vergleich mit einem konventionellen landwirtschaftlichen Produktsystem zu empfehlen. Hierbei ließe sich der Einbezug weiterer Gutschriften wie z. B. der Ersatz von energieintensivem mineralischem Dünger auf Basis von fossilem Erdgas durch Schwarzerde ermöglichen, da diese zu nennenswerten Verbesserungen und zu deutlich höheren Entnahmen von THG aus der Atmosphäre führen (Kap. 4.2) [Oldfield et al., 2018].



# Literaturverzeichnis

Informationsblatt V2.20 - Filtermittel aus Poröskeramik, 1984.

Persönliche Kommunikation mit Herrn Linke der Firma Carbon Technik Schuster GmbH, 2022.

Persönliche Kommunikation mit Herrn Vögelin der Firma Industrielle Werke Basel IWB, 2022.

Persönliche Kommunikation mit Herrn Reichardt der Firma Pyreg GmbH, 2022.

G. Agegnehu, A. M. Bass, P. N. Nelson, B. Muirhead, G. Wright, and M. I. Bird. Biochar and biochar-compost as soil amendments: effects on peanut yield, soil properties and greenhouse gas emissions in tropical north queensland, australia. *Agriculture, ecosystems & environment*, 213:72–85, 2015.

G. Agegnehu, A. K. Srivastava, and M. I. Bird. The role of biochar and biochar-compost in improving soil quality and crop performance: A review. *Applied soil ecology*, 119:156–170, 2017.

M. Altermann, J. Rinklebe, I. Merbach, M. Körschens, U. Langer, and B. Hofmann. Chernozem—soil of the year 2005. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 168(6):725–740, 2005.

F. Anderson and M. Iqbal. Food sovereignty - now! - a guide to food sovereignty. 2018.

E. Azzi. *Biochar systems across scales in Sweden: An industrial ecology perspective*. PhD thesis, KTH Royal Institute of Technology, 2021.

G. Bartzas and K. Komnitsas. Life cycle analysis of pistachio production in greece. *Science of the Total Environment*, 595:13–24, 2017.

M. P. Bernal, J. A. Albuquerque, and R. Moral. Composting of animal manures and chemical criteria for compost maturity assessment. a review. *Bioresource technology*, 100(22):5444–5453, 2009.

H. P. Blume, G. W. Brümmer, R. Horn, E. Kandeler, I. Kögel-Knabner, R. Kretzschmar, K. Stahr, B. M. Wilke, S. Thiele-Bruhn, and G. Welp. Scheffer/Schachtschabel. *Lehrbuch der Bodenkunde*, 16, 2010.

J. Buchgeister. Übersicht über Umweltindikatoren, Modelle und Methoden der Umweltwirkungsabschätzung in der Ökobilanzierung. *Umw Med Ges*, 24(1):12–21, 2012.

- J. Buchgeister and H. Hottenroth. Vorgehensweise und Auswahl der Nachhaltigkeitsindikatoren im Rahmen des InNOSys-Projekts. 2021.
- E. Cadena, J. Colón, A. Artola, and X. Sánchez, A. and Font. Environmental impact of two aerobic composting technologies using life cycle assessment. *The international journal of life cycle assessment*, 14(5):401–410, 2009.
- Y. Cao, X. Wang, Z. Bai, D. Chadwick, T. Misselbrook, S. G. Sommer, W. Qin, and L. Ma. Mitigation of ammonia, nitrous oxide and methane emissions during solid waste composting with different additives: a meta-analysis. *Journal of Cleaner Production*, 235:626–635, 2019.
- J. S. Cha, S. H. Park, S.C. Jung, C. Ryu, J.K. Jeon, M.C. Shin, and Y.K. Park. Production and utilization of biochar: A review. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 40:1–15, 2016.
- H. Chen, S. K. Awasthi, T. Liu, Y. Duan, X. Ren, Z. Zhang, A. Pandey, and M. K. Awasthi. Effects of microbial culture and chicken manure biochar on compost maturity and greenhouse gas emissions during chicken manure composting. *Journal of Hazardous Materials*, 389:121908, 2020.
- C. H. Chia, B. P. Singh, S. Joseph, E. R. Graber, and P. Munroe. Characterization of an enriched biochar. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 108:26–34, 2014.
- M. Claußen, D. Stammer, J. Oßenbrügge, R. Seifert, C. Möllmann, J. Scheffran, J. Behrens, I. Hense, J. Hartmann, and F. Feser. Der Ozean ist kein Wasserglas. 2010.
- G. Cornelissen, N. R. Pandit, P. Taylor, B. H. Pandit, M. Sparrevik, and H. P. Schmidt. Emissions and char quality of flame-curtain "kon tiki" kilns for farmer-scale charcoal/biochar production. *PLoS one*, 11(5):e0154617, 2016. doi: 10.1371/journal.pone.0154617.
- C. Dieckmann, H. Hartmann, M. Kaltschmitt, and J. Ressel. Transport, Trocknung, Konservierung und Lagerung. In *Energie aus Biomasse*, pages 493–578. Springer, 2016.
- G. Dunst. Die Bio Schwarzerde (Terra Preta) - Herstellung, o.J. URL <https://www.youtube.com/watch?v=-zzqTospN8g&t=50s> (2022-06-03).
- E. Eckmeier, R. Gerlach, E. Gehrt, and M. W. I. Schmidt. Pedogenesis of chernozems in central europe—a review. *Geoderma*, 139(3-4):288–299, 2007.
- E. Eliot. The science of composting. 2017.
- B. Embren. Planting urban trees with biochar. *The Biochar Journal*, pages 44–47, 2016.
- E. Epstein. Industrial composting. *Environmental engineering and facilities management. New York: Taylor and Francis Group*, 2011.
- L. Eymann, A. Mathis, M. Stucki, and S. Amrein. Torf und Torfersatzprodukte im Vergleich: Eigenschaften, Verfügbarkeit, ökologische Nachhaltigkeit und soziale Auswirkungen. 2015.

- S. Fazio, V. Castellani, S. Sala, E. M. Schau, M. Secchi, L. Zampori, and E. Diaconu. Supporting information to the characterisation factors of recommended of life cycle impact assessment methods. *New models and differences with ILCD. EUR*, 28888, 2018.
- D. Fischer and B. Glaser. Synergisms between compost and biochar for sustainable soil amelioration. *Management of organic waste*, 1, 2012.
- K. Friede, C. Krüger, F. Worzyk, J. Ellfeldt, and K. Terytze. Biologische Eigenschaften von Biokohlekomposten und deren Wirkungen auf die Lebensraumfunktion von Böden, 2015.
- J. L. Gaunt and J. Lehmann. Energy balance and emissions associated with biochar sequestration and pyrolysis bioenergy production. *Environmental science & technology*, 42(11): 4152–4158, 2008. ISSN 0013-936X. doi: 10.1021/es071361i.
- GESTIS-Stoffdatenbank. Gefahrstoffinformationssystem der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung. URL [http://www.dguv.de/ifa/stoffdatenbank/\(2022-06-09\)](http://www.dguv.de/ifa/stoffdatenbank/(2022-06-09)).
- B. Glaser and J. J. Birk. State of the scientific knowledge on properties and genesis of anthropogenic dark earths in central amazonia (terra preta de índio). *Geochimica et Cosmochimica acta*, 82:39–51, 2012.
- B. Glaser, L. Haumaier, G. Guggenberger, and W. Zech. The 'terra preta' phenomenon: a model for sustainable agriculture in the humid tropics. *Naturwissenschaften*, 88(1):37–41, 2001.
- B. Glaser, K. Wiedner, S. Seelig, H.P. Schmidt, and H. Gerber. Biochar organic fertilizers from natural resources as substitute for mineral fertilizers. *Agronomy for Sustainable Development*, 35(2):667–678, 2015.
- Lauterbach Verfahrenstechnik GmbH. Modul RGAS - Stoffwerte und Zusammensetzung von Rauchgasen. URL [https://lv-soft.net/softwareprodukte/verfahrenstechnik/verbrennung/stoffwerte-und-zusammensetzung-von-rauchgasen-rgas\(2022-06-09\)](https://lv-soft.net/softwareprodukte/verfahrenstechnik/verbrennung/stoffwerte-und-zusammensetzung-von-rauchgasen-rgas(2022-06-09)).
- P. Godlewska, H. P. Schmidt, Y. S. Ok, and P. Oleszczuk. Biochar for composting improvement and contaminants reduction. a review. *Bioresource Technology*, 246:193–202, 2017.
- M. Goedkopp, Heijungs. R., M. Huijbregts, O. Jolliet, M. Margni, and A. De Schryver. Recommendations for life cycle impact assessment in the european context-based on existing environmental impact assessment models and factors (international reference life cycle data system-ilcd handbook). 2011.
- R. T. Haug. *The practical handbook of compost engineering*. Routledge, 1993.
- B. Hebenstreit and E. Käßler. Lebenszyklusanalyse der Strom-und Wärmeerzeugung einer Holzvergassungsanlage inklusive Nahwärmenetz. 2017.
- B. Hersh and A. Mirkouei. Life cycle assessment of pyrolysis-derived biochar from organic wastes and advanced feedstocks. In *International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference*, volume 59223, page V004T05A014. American Society of Mechanical Engineers, 2019.

- R. Hirschler. ecoinvent—eine konsistente, transparente und qualitätsgesicherte Hintergrunddatenbank für Ökobilanzen & Co. *Chemie Ingenieur Technik*, 10(83):1590–1596, 2011.
- IPCC. Ipcc factsheet - what is the ipcc, 2021.
- S. F. Jane, G. J.A. Hansen, B. M. Kraemer, P. R. Leavitt, J. L. Mincer, R. L. North, R. M. Pilla, J. T. Stetler, C. E. Williamson, R. I. Woolway, et al. Widespread deoxygenation of temperate lakes. *Nature*, 594(7861):66–70, 2021.
- Z. Jiang, H. Zheng, and B. Xing. Environmental life cycle assessment of wheat production using chemical fertilizer, manure compost, and biochar-amended manure compost strategies. *Science of The Total Environment*, 760:143342, 2021.
- C. Kammann, B. Glaser, and H. P. Schmidt. Combining biochar and organic amendments. *Biochar in European soils and agriculture: science and practice*, 1:136–60, 2016.
- C. Kammann, J. Ippolito, N. Hagemann, N. Borchard, M. L. Cayuela, J. Estavillo, T. Fuertes-Mendizabal, S. Jeffery, J. Kern, J. Novak, et al. Biochar as a tool to reduce the agricultural greenhouse-gas burden—knowns, unknowns and future research needs. *Journal of Environmental Engineering and Landscape Management*, 25(2):114–139, 2017.
- D. P. Keller, A. Lenton, E. W. Littleton, A. Oschlies, V. Scott, and N. E. Vaughan. The effects of carbon dioxide removal on the carbon cycle. *Current climate change reports*, 4(3):250–265, 2018.
- M. Kranert, R. Gottschall, C. Bruns, and G. Hafner. Energy or compost from green waste?—an evaluation regarding co2 aspects. In *Second international symposium on energy from biomass and waste*, 2008.
- R. Lal, T. livari, and J. M. Kimble. *Soil degradation in the United States: extent, severity, and trends*. CRC Press, 2003.
- V. Lévesque, P. Rochette, N. Ziadi, M. Dorais, and H. Antoun. Mitigation of co2, ch4 and n2o from a fertigated horticultural growing medium amended with biochars and a compost. *Applied Soil Ecology*, 126:129–139, 2018.
- D. K. Maheshwari. *Composting for sustainable agriculture*, volume 3. Springer, 2014.
- J. Martínez-Blanco, P. Muñoz, A. Antón, and J. Rieradevall. Life cycle assessment of the use of compost from municipal organic waste for fertilization of tomato crops. *Resources, Conservation and Recycling*, 53(6):340–351, 2009.
- J. Martínez-Blanco, J. Colón, X. Gabarrell, X. Font, A. Sánchez, A. Artola, and J. Rieradevall. The use of life cycle assessment for the comparison of biowaste composting at home and full scale. *Waste Management*, 30(6):983–994, 2010.
- S. Marzeddu, A. Cappelli, A. Ambrosio, M. A. Décima, P. Viotti, and M. R. Boni. A life cycle assessment of an energy-biochar chain involving a gasification plant in italy. *Land*, 10(11):1256, 2021.

- V. Masson-Delmotte, P. Zhai, H.-O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J.B.R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M.I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, and T. Waterfield. Summary for policymakers - an ipcc special report on the impacts of global warming of 1.5 °c above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty. 2018.
- V. Masson-Delmotte, P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S Berger, N Caud, Y Chen, L Goldfarb, MI Gomis, et al. Climate change 2021: the physical science basis. *Contribution of working group I to the sixth assessment report of the intergovernmental panel on climate change*, page 2, 2021.
- J. Matušík, T. Hnátková, and V. Kočí. Life cycle assessment of biochar-to-soil systems: A review. *Journal of Cleaner Production*, 259(4):120998, 2020. ISSN 09596526. doi: 10.1016/j.jclepro.2020.120998.
- L. Meyer. *Exergiebasierte Untersuchung der Entstehung von Umweltbelastungen in Energieumwandlungsprozessen auf Komponentenebene: Exergoökologische Analyse*. PhD thesis, Technische Universität Darmstadt, 2006.
- E. Nkonya, A. Mirzabaev, and J. Von Braun. *Economics of land degradation and improvement—a global assessment for sustainable development*. Springer Nature, 2016.
- T. L. Oldfield, N. Sikirica, C. Mondini, G. López, P. J. Kuikman, and N. M. Holden. Biochar, compost and biochar-compost blend as options to recover nutrients and sequester carbon. *Journal of environmental management*, 218:465–476, 2018. doi: 10.1016/j.jenvman.2018.04.061.
- L. Paetsch, D. Lohr, J. Burmeister, R. Brandhuber, E. Meinken, and M. Wiesmeier. Wirkung karbonisierter organischer Reststoffe (Pyrolyse und hydrothermale Kohle) auf die Bodenfruchtbarkeit. *Institut für Ökologischen Landbau, Bodenkultur und Ressourcenschutz*, 2018.
- A. Papageorgiou, E. S. Azzi, A. Enell, and C. Sundberg. Biochar produced from wood waste for soil remediation in sweden: Carbon sequestration and other environmental impacts. *The Science of the total environment*, 776:145953, 2021. doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.145953.
- J. F. Peters, D. Iribarren, and J. Dufour. Biomass pyrolysis for biochar or energy applications? a life cycle assessment. *Environmental science & technology*, 49(8):5195–5202, 2015. ISSN 0013-936X. doi: 10.1021/es5060786.
- M. Puettmann, K. Sahoo, K. Wilson, and E. Oneil. Life cycle assessment of biochar produced from forest residues using portable systems. *Journal of Cleaner Production*, 250:119564, 2020.
- P. Quicker and K. Weber. Biokohle. *Herstellung, Eigenschaften und Verwendung von Biomassekarbonisaten*, 2016.

- S. Rajabi Hamedani, T. Kuppens, R. Malina, E. Bocci, A. Colantoni, and M. Villarini. Life cycle assessment and environmental valuation of biochar production: Two case studies in Belgium. *Energies*, 12(11):2166, 2019.
- K. G. Roberts, B. A. Gloy, S. Joseph, N. R. Scott, and J. Lehmann. Life cycle assessment of biochar systems: estimating the energetic, economic, and climate change potential. *Environmental science & technology*, 44(2):827–833, 2010. ISSN 0013-936X. doi: 10.1021/es902266r.
- A. Saer, S. Lansing, N. H. Davitt, and R. E. Graves. Life cycle assessment of a food waste composting system: environmental impact hotspots. *Journal of Cleaner Production*, 52:234–244, 2013.
- M. Sánchez-García, J.A. Albuquerque, M. A. Sánchez-Monedero, A. Roig, and M.L. Cayuela. Biochar accelerates organic matter degradation and enhances n mineralisation during composting of poultry manure without a relevant impact on gas emissions. *Bioresource technology*, 192:272–279, 2015.
- H. P. Schmidt. Pflanzenkohle. *Ithaka Journal*, 1(2011):75–82, 2011a.
- H. P. Schmidt. Wege zu Terra Preta–Aktivierung von Pflanzenkohle. *ithaka journal*, 2011: 28–32, 2011b.
- H. P. Schmidt and N. Hagemann. 400.000 Pyrolyseanlagen zur Rettung des Klimas - Notwendigkeit und Grenzen des exponentiellen Wachstums von Klimatechnologien. *Ithaka-Journal 2021, Arbaz, Switzerland*, pages 436–442, 2021. ISSN 1663-0521.
- H. P. Schmidt, P. Taylor, A. Eglise, and C. Arbaz. Kon-tiki flame curtain pyrolysis for the democratization of biochar production. *Biochar J*, 1:14–24, 2014a.
- H. P. Schmidt, T. Bucheli, C. Kammann, B. Glaser, S. Abiven, and J. Leifeld. European biochar certificate-guidelines for a sustainable production of biochar. 2016.
- H.P. Schmidt, C. Kammann, C. Niggli, M. W.H. Evangelou, K. A. Mackie, and S. Abiven. Biochar and biochar-compost as soil amendments to a vineyard soil: Influences on plant growth, nutrient uptake, plant health and grape quality. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 191: 117–123, 2014b.
- H.P. Schmidt, B.H. Pandit, G. Cornelissen, and C.I. Kammann. Biochar-based fertilization with liquid nutrient enrichment: 21 field trials covering 13 crop species in Nepal. *Land Degradation & Development*, 28(8):2324–2342, 2017.
- H.P. Schmidt, N. Hagemann, F. Abächerli, J. Leifeld, and T. Bucheli. Pflanzenkohle in der Landwirtschaft. Hintergründe zur Düngertilassung und Potentialabklärung für die Schaffung von Kohlenstoff-Senken, 2021a.

- H.P. Schmidt, Hagemann N., F. Abächerli, Leifeld J., and Bucheli T. Pflanzenkohle in der Landwirtschaft : Hintergründe zur Düngertilassung und Potentialabklärung für die Schaffung von Kohlenstoff-Senken. *Agroscope Science*, pages 1–71, 2021b.
- L. Schubert. Stadtbäume für die Zukunft: Beurteilung der Eignung von einheimischen und fremdländischen Baumarten im urbanen Raum und Ermittlung ihrer Kühlleistung sowie ihrer Trockenstressverträglichkeit mithilfe baumphysiologischer Messungen. 2021.
- S. Shackley, G. Ruysschaert, K. Zwart, and B. Glaser. Biochar in european soils and agriculture. *Science and practice*, 2016.
- W. Sombroek, D. Kern, T. E. Rodrigues, M. da S. Cravo, T. J. Cunha, W. Woods, and B. Glaser. Terra preta and terra mulata: pre-columbian amazon kitchen middens and agricultural fields, their sustainability and their replication. In *Embrapa Amazônia Oriental-Artigo em anais de congresso (ALICE)*. In: Symposium Anthropogenic Factors of Soil Formation, 18.; World Congress, 2002.
- Sonnenerde GmbH. „Riedlingsdorfer Schwarzerde“. URL [https://www.sonnenerde.at/fileadmin/user\\_upload/Produkte/Produktbilder/sonnenerde\\_riedlingsdorfer\\_schwarzerde\\_haende.jpg\(2022-05-16\)](https://www.sonnenerde.at/fileadmin/user_upload/Produkte/Produktbilder/sonnenerde_riedlingsdorfer_schwarzerde_haende.jpg(2022-05-16)).
- E. Sørmo, L. Silvani, G. Thune, H. Gerber, H.P. Schmidt, A. B. Smebye, and G. Cornelissen. Waste timber pyrolysis in a medium-scale unit: Emission budgets and biochar quality. *The Science of the total environment*, 718:137335, 2020. doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.137335.
- G. Stenzel. Beton-Bodenplatten für Hallen und Freiflächen. *Beton- und Stahlbetonbau*, 100(4): 2, 2005.
- K. Stephan and F. Mayinger. *Thermodynamik. Grundlagen und technische Anwendungen: Band 1: Einstoffsysteme*, volume 1. Springer-Verlag, 2013.
- M. Stucki, S. Wettstein, A. Mathis, and S. Amrein. Erweiterung der Studie "Torf und Torfersatzprodukte im Vergleich": Eigenschaften, Verfügbarkeit, ökologische Nachhaltigkeit und soziale Auswirkungen. 2019.
- K. Terytze, R. Wagner, R. Schatten, K. Rößler, and N. König. Endbericht zum Forschungsvorhaben - Schließung von Kreisläufen durch Energie-und Stoffstrommanagement bei Nutzung der Terra-Preta-Technologie im Botanischen Garten im Hinblick auf Ressourceneffizienz und Klimaschutz-Modellprojekt Urban farming "(TerraBoGa). 2015.
- B. Vandecasteele, T. Sinicco, T. D'Hose, T. V. Nest, and C. Mondini. Biochar amendment before or after composting affects compost quality and n losses, but not p plant uptake. *Journal of Environmental Management*, 168:200–209, 2016.
- R. Wagner, K. Rößler, R. Schatten, N. König, and K. Terytze. Biokohle und Biokohlekomposte im Botanischen Garten Berlin Dahlem, 2015.

- R. Wagner, U. Weiß, B. Schemel, and K. Terytze. Verwertung von Gemüse-und Grünschnittabfällen zur Herstellung von Pflanzenkohlesubstraten für ein klimafreundliches Gärtnern: Modellprojekt in der Berufsbildung für nachhaltige Entwicklung. 2021.
- C. Werner, H. P. Schmidt, D. Gerten, W. Lucht, and C. Kammann. Biogeochemical potential of biomass pyrolysis systems for limiting global warming to 1,5 °C. *Environmental Research Letters*, 13(4):044036, 2018.
- G. Wernet, C. Bauer, B. Steubing, J. Reinhard, E. Moreno-Ruiz, and B. Weidema. The ecoinvent database version 3 (part i): overview and methodology. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 21(9):1218–1230, 2016.
- K. Wiedner, J. Schneeweiß, M. A. Dippold, and B. Glaser. Anthropogenic dark earth in northern germany—the nordic analogue to terra preta de indio in amazonia. *Catena*, 132:114–125, 2015.
- D. Woolf, J. E. Amonette, F. A. Street-Perrott, J. Lehmann, and S. Joseph. Sustainable biochar to mitigate global climate change. *Nature communications*, 1:56, 2010. doi: 10.1038/ncomms1053.
- S. Wu, H. He, X. Inthapanya, C. Yang, L. Lu, G. Zeng, and Z. Han. Role of biochar on composting of organic wastes and remediation of contaminated soils—a review. *Environmental Science and Pollution Research*, 24(20):16560–16577, 2017.
- R. Xiao, M. K. Awasthi, R. Li, J. Park, S. M. Pensky, Q. Wang, J. J. Wang, and Z. Zhang. Recent developments in biochar utilization as an additive in organic solid waste composting: A review. *Bioresource Technology*, 246:203–213, 2017.
- X. Yang, D. Han, Y. Zhao, R. Li, and Y. Wu. Environmental evaluation of a distributed-centralized biomass pyrolysis system: A case study in shandong, china. *The Science of the total environment*, 716:136915, 2020. doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.136915.
- S. Zhao, S. Schmidt, W. Qin, J. Li, G. Li, and W. Zhang. Towards the circular nitrogen economy - a global meta-analysis of composting technologies reveals much potential for mitigating nitrogen losses. *The Science of the total environment*, 704:135401, 2020. doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.135401.



# A. Anhang

## A.1. Rechtliche Vorgaben zu Schadstoffgehalten

Wie in Kap. 2.2.6 beschrieben müssen die, in den BBodSchV, BioAbfV und DüMV formulierten, Grenzwerte zu Schadstoffen bei einer Schwarzerde-Anwendung eingehalten werden. Während die BioAbfV und DüMV Grenzwerte zu den Schadstoffgehalten in der Schwarzerde vorgeben, gelten die Grenzwerte in der BBodSchV für den Boden, in den die Schwarzerde eingebracht ist. Diese Grenzwerte müssen berücksichtigt werden, sofern die BioAbfV und die DüMV keine Vorgaben zu den in der BBodSchV beschriebenen Schadstoffen machen. In der BBodSchV wird zwischen drei Wirkungspfaden unterschieden:

- Boden - Mensch,
- Boden - Nutzpflanze und
- Boden - Grundwasser

für die wiederum jeweils unterschiedliche Grenzwerte gelten (Tab. A.1).

Tabelle A.1.: Rechtliche Vorgaben zu Schadstoffgehalten in der Schwarzerde bzw. im Boden

Schadstoff	Einheit	Wert	Rechtsverordnung (und Geltungsbereich)
Arsen	mg/kg TM	40	DüMV
Blei	mg/kg TM	150	DüMV und BioAbfV
Cadmium	mg/kg TM	1,5	DüMV und BioAbfV
Chrom	mg/kg TM	100	BioAbfV
Chrom (Cr <sup>VI</sup> )	mg/kg TM	2	DüMV
Kupfer	mg/kg TM	100	BioAbfV
Nickel	mg/kg TM	50	BioAbfV
Quecksilber	mg/kg TM	1	DüMV und BioAbfV
Zink	mg/kg TM	400	BioAbfV
Thallium	mg/kg TM	1	DüMV
PFT <sup>1</sup>	mg/kg TM	0,1	DüMV
Summe Dioxine und dl-PCB <sup>2</sup>	ng/kg TM	40	DüMV
Benzo(a)pyren	mg/kg TM	1	Prüfwert aus BBodSchV für Acker (Nutzpflanze)
Benzo(a)pyren	mg/kg TM	10	Prüfwert aus BBodSchV für Parkfläche (Mensch)

<sup>1</sup>Perfluorierte Tenside

<sup>2</sup>dl-PCB - dioxinähnliche polychlorierte Biphenyle; gemessen in WHO-TEQ (World Health Organization - Toxic equivalency factor)

## A. Anhang

---

Antimon	ug/L	10	Prüfwert aus BBodSchV (Grundwasser)
Kobalt	ug/L	50	Prüfwert aus BBodSchV (Grundwasser)
Molybdän	ug/L	50	Prüfwert aus BBodSchV (Grundwasser)
Selen	ug/L	10	Prüfwert aus BBodSchV (Grundwasser)
Cyanid, gesamt	ug/L	50	Prüfwert aus BBodSchV (Grundwasser)
Cyanid, gesamt	mg/kg TM	50	Prüfwert aus BBodSchV für Parkfläche (Mensch)
Cyanid, leicht freisetzbar	ug/L	10	Prüfwert aus BBodSchV (Grundwasser)
Fluorid	ug/L	750	Prüfwert aus BBodSchV (Grundwasser)
Mineralöl-KW <sup>3</sup>	ug/L	200	Prüfwert aus BBodSchV (Grundwasser)
Leichtfl. arom. KW	ug/L	20	Prüfwert aus BBodSchV (Grundwasser)
Benzol	ug/L	1	Prüfwert aus BBodSchV (Grundwasser)
Leichtfl. Halogen-KW	ug/L	10	Prüfwert aus BBodSchV (Grundwasser)
Aldrin	ug/L	0,1	Prüfwert aus BBodSchV (Grundwasser)
Aldrin	mg/kg TM	10	Prüfwert aus BBodSchV für Parkfläche(Mensch)
DDT <sup>4</sup>	ug/L	0,1	Prüfwert aus BBodSchV (Grundwasser)
DDT	mg/kg TM	200	Prüfwert aus BBodSchV für Parkfläche(Mensch)
Phenole	ug/L	20	Prüfwert aus BBodSchV (Grundwasser)
PCB	ug/L	0,05	Prüfwert aus BBodSchV (Grundwasser)
PCB	mg/kg TM	2	Prüfwert aus BBodSchV für Parkfläche(Mensch)
PAK	ug/L	0,2	Prüfwert aus BBodSchV (Grundwasser)
Naphthalin	ug/L	2	Prüfwert aus BBodSchV (Grundwasser)
Zinn	ug/L	40	Prüfwert aus BBodSchV (Grundwasser)
Hexachlorbenzol	mg/kg TM	20	Prüfwert aus BBodSchV für Parkfläche(Mensch)
Hexachlorcyclohexan	mg/kg TM	25	Prüfwert aus BBodSchV für Parkfläche(Mensch)
Pentachlorphenol	mg/kg TM	250	Prüfwert aus BBodSchV für Parkfläche(Mensch)
Dioxine/Furane	ng/kg TM	200	Maßnahmenwert aus BBodSchV für Parkfläche(Mensch)

---

Prüfwerte sind Werte, bei deren Überschreiten im Einzelfall geprüft werden muss, ob dadurch schädliche Bodenveränderungen hervorgerufen werden. Der Maßnahmenwert gibt den Wert an, bei dessen Überschreitung von einer schädlichen Bodenveränderung auszugehen ist.

## A.2. Erklärung zur ecoinvent-Datenbank

Abb. A.1 zeigt die Bereiche, zu denen die ecoinvent-Datenbank Datensätze bereitstellt. Dabei werden die Datensätze der einzelnen Bereiche von verschiedenen Schweizer Institutionen (Empa<sup>5</sup>, Various Consultants, PSI<sup>6</sup>, ESU-services<sup>7</sup>, agroscope (ART), Doka und ETHZ<sup>8</sup>), die

---

<sup>3</sup>KW - Kohlenwasserstoffe

<sup>4</sup>DDT - Dichlordiphenyltrichlorethan

<sup>5</sup>Empa - Eidgenössische Materialprüfungs- und Versuchsanstalt für Industrie, Bauwesen und Gewerbe

<sup>6</sup>PSI - Paul-Scherrer Institut

<sup>7</sup>ESU - Energie-Stoffe-Umwelt

<sup>8</sup>ETHZ - Eidgenössische Technische Hochschule Zürich

zusammen das *ecoinvent-Zentrum* bilden, bearbeitet, verwaltet und standardisiert und qualitätsgesichert zusammengeführt [Hischier, 2011]. Diese umfangreiche und bereits etablierte Datenbank bietet daher die Möglichkeit, umfassende und konsistente Ökobilanzen anzufertigen [Wernet et al., 2016].

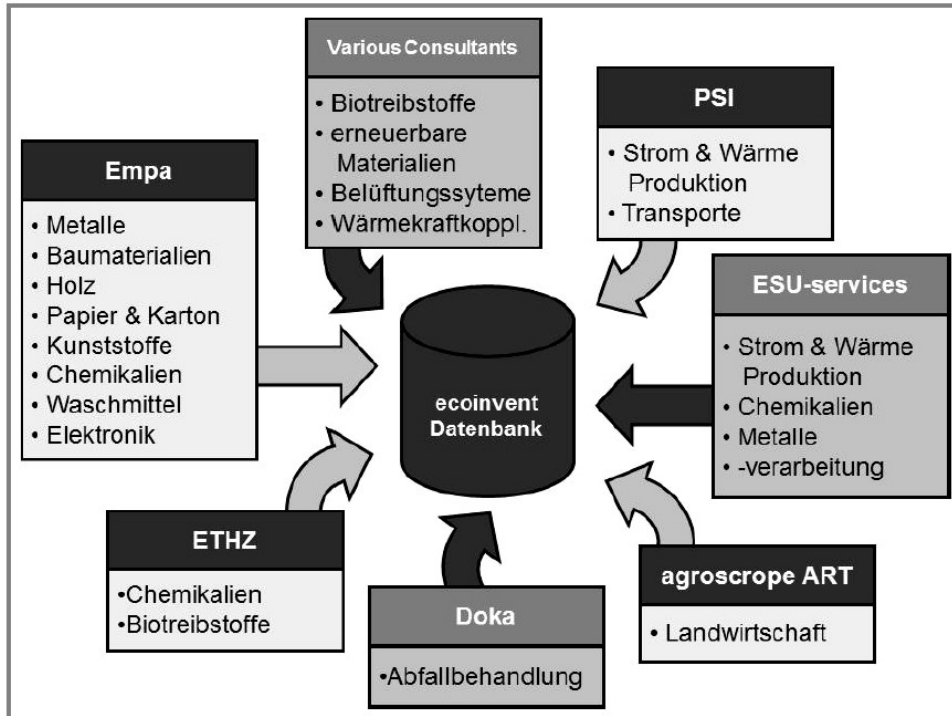


Abbildung A.1.: Bereiche die von der ecoinvent-Datenbank abgedeckt werden [Hischier, 2011].

### A.3. Fragenkatalog

Im Folgenden sind die ausgefüllten Fragenkataloge der Firmen Pyreg, IWB und CT-Schuster abgebildet. Die dort gemachten Angaben stellen neben den Informationen aus den persönlichen Gesprächen mit den Kontaktpersonen der jeweiligen Firmen eine wichtige Datenquelle dar. Ziel bei der Erstellung des Fragenkataloges war es insbesondere Verständnis zum Anlagenaufbau und Anlagenbetrieb sowie der Pyrolysetechnologie, Informationen zu den Anforderungen an die verschiedenen Input- und Outputgrößen, Betriebsdaten zur Erstellung der Massen- und Energiebilanz und Daten zur Konstruktion und den Reparatur- und Instandhaltungsaufwänden zu bekommen.

Abbildung A.2.: Fragenkatalog - Pyreg



### Masterarbeit von Alexander Schneider

„Ökobilanz zu Herstellung und Einsatz von anthropogener Schwarzerde für Grünflächen, Stadtbäume und Landwirtschaft“

### am KIT Karlsruher Institut für Technologie

Fragenkatalog an Hersteller/Betreiber von Pyrolyseanlagen zu Größen/Daten, die zur Ökobilanzierung des Pyrolyseprozesses benötigt werden

Datum: 13.01.2022

Für Nachfragen stehen wir gerne zur Verfügung:

- Alexander Schneider: [uxhlu@student.kit.edu](mailto:uxhlu@student.kit.edu) (Verfasser)
- Jens Buchgeister: [jens.buchgeister@kit.edu](mailto:jens.buchgeister@kit.edu) (Betreuer), KIT, ITAS
- Dr. Armin Siepe: [siepe@posteo.de](mailto:siepe@posteo.de) (Betreuer), Büro SchwarzErde Karlsruhe

Die im Folgenden aufgeführten Fragen hinsichtlich des Pyrolyseprozesses werden im Rahmen einer Ökobilanzierung von der Herstellung bis zum Einsatz von Schwarzerde, in der die Pyrolyse ein wichtiger Prozessschritt darstellt, benötigt. Wünschenswert sind reale Betriebsdaten, die sich auf einen ein- oder mehrjährigen Anlagenbetrieb beziehen, oder Studien-/Experimentaldaten.

Falls bspw. PDF-Dateien o.Ä. zur Beantwortung herangezogen werden, bitte im zugehörigen Antwortfeld ein Verweis auf diese Datei angeben.

Fragenkatalog		
Nr.	Fragen	Antwort
1	Ein Verfahrensfließschema/Blockfließschema und/oder eine Listung aller Prozessschritte der Pyrolyseanlage	Siehe angehängte Datei
2	Feedstock-Zusammensetzung (Immediat- und Elementaranalyse)	49,6 % Kohlenstoff 2,22 % Asche 85 % Trockensubstanz 5,95 % Wasserstoff

3	Feedstock-Heizwert	18,4 MJ/kg
4	Feedstock-Anforderungen (maximaler Wassergehalt, minimaler Heizwert, sonstige Anforderungen wie Korngrößen-Bereich etc.)	Mind. 10 MJ/kg Heizwert Mind. 80 % Trockensubstanz Kleiner 30 mm Partikelgröße Schütt- und Rieselfähigkeit
5	Aufwand bei Beschicken und Entleeren (Dauer, Personalbedarf; Apparaturen inkl. Energie- und Materialaufwand)	i.d.R. automatisierte Input-Beschickung und Output-Lagerung
6	Verweilzeit im Reaktor	15 bis 20 Minuten
7	Pyrolyse-Temperatur im Regelbetrieb	600-800 Grad Celsius
8	Reaktortyp und Betriebsmodus (Batch, Semi-Batch, kontinuierlich)	Kontinuierlicher Prozess
9	Dauer beim Anfahren bis zum Regelbetrieb und ggf. beim „Runterfahren“ inkl. Energie- und Materialbedarf, eingesetzte Apparate	450 kW Brennkammer für 10-12 Stunden mit Gas zu betreiben, um Reaktoren aufzuheizen
10	Durchsatz der Anlage	300 kg/h PX1500
11	Personalbedarf für Betrieb	4 Stunden pro Anlage und Tag
12	Lebensdauer der Anlage (Zeitraum, durchgesetzte Produktmenge)	Erste Anlage seit 2011 in Betrieb Tracking bei Anlagenbetreiber
13	Jährliche Betriebsstunden (inkl. Wartungen, Störfälle, Rüstzeiten, geplante Arbeits-/Standtage etc.)	7.500 Betriebsstunden pro Jahr (86 % Verfügbarkeit)
14	Akkumulation oder Austrag des Abriebs in der Asche im Produkt	Vollständige Abförderung der Pflanzenkohle inkl. Asche. Zusätzlich automatisierte Reinigung des Prozessgasfilters mit Inertgas
15	Wartungs- und Instandhaltungsaufwand der Anlage sowie einzelner Apparate und Ersatzteile über die Lebensdauer (Regelintervalle, Checkheft); Energie- und Materialaufwand für Reparaturen	Ca. 5 % pro Jahr bezogen auf die Investitionskosten der Anlage. Quartalsweise Systemcheck (inkl. Reinigung)
16	Heizbedarf des Reaktors und sonstiger Verbraucher	Ca. 400 kg Gas pro Anlagenstart
17	Strombedarf des Reaktors und sonstiger Verbraucher	40 kW für die PX1500
18	Bedarf weiterer Betriebsmittel (Maschinenöl, Kraftstoff für Arbeitsmaschinen wie z.B. Stapler, Inertgas, Wasser, Verbrennungsluft/Sauerstoff etc.)	Wasser zum Ablöschen der Kohle Stickstoff zum Reinigen des Prozessgasfilter (PSA-kann an Anlage integriert werden)

		Minimal tolerierte Menge an Sauerstoff im Prozess selbst und später in der Brennkammer
19	Verwendung des Synthesegases (Stoff- und/oder Energieströme z.B. zur Reaktorbeheizung, zur Trocknung des Feeds, als externe Nutzwärme, zur Stromerzeugung, als Brennstoff, zur chemischen Synthese etc.)	Vollständige Verbrennung des Synthesegases. Wärmeüberschuss kann thermisch (Heißwasser oder Dampf) oder elektrisch genutzt werden.
20	Gesamtmasse und Flächenbedarf der Anlage	Ca. 60 Tonnen, 91 m <sup>3</sup> ,
21	Art und Gewichtsmenge der in der Anlage verbauten Apparaten sowie falls möglich Angaben zu Massenanteilen der Materialien (Edelstahl, Aluminium, Kupfer, Beton etc.)	Siehe angehängtes LV
22	Heizbedarf, Strombedarf, Wasserbedarf und Art und Menge der verbauten Materialien der/des Gebäude/s, in der sich die Pyrolyseanlage und das Büro befinden	40 kW elektrisch 150 m <sup>3</sup> /a 4.700 kg Gas/a
23	Flächenbedarf für das Betriebsgelände (Lagerhalle, Gebäude für Anlage und Büro etc.)	Keine Angaben möglich
24	Produktaufteilung (Anteil der Pflanzenkohle, des Pyrolysegases und gegebenenfalls des Pyrolyseöls und Wassers)	60 % Pyrolysegas 40 % Pflanzenkohle
25	(Elementar-)Analyse/Zusammensetzung der Pflanzenkohle	Siehe angehängte Analyse
26	(Elementar-)Analyse/Zusammensetzung des Pyrolysegases und/oder des Rauchgases / der Abluft (und gegebenenfalls des Pyrolyseöls und Wassers)	
27	Schadstoffgehalte in der Pflanzenkohle (PAK, Schwermetalle etc.)	Keine Schadstoffe vorhanden, sofern Biomasse sauber genug
28	Schadstoffgehalte im Pyrolysegas/Rauchgas (und gegebenenfalls im Pyrolyseöl und Wasser)	Einhaltung der weltweiten Emissionsgrenzwerte
29	Physikalisch-chemische Eigenschaften der Pflanzenkohle (die bspw. im Rahmen einer Zertifizierung nach EBC-Kriterien bestimmt werden müssen)	Siehe 25
30	Menge und Zusammensetzung des Abwassers	Keine zu entsorgenden Stoffe

31	Frage an Anlagenhersteller: Name oder Kontakt relevanter Anwender/Betreiber Ihrer Pyrolyseanlagen zur Herstellung von Schwarzerde/Terra Preta	Sonnenerde Bionero (siehe Referenzliste)
32	Frage an Anlagenbetreiber: Stellt Ihr Unternehmen Schwarzerde/Terra Preta her?	Nein, reiner Anlagenhersteller. Schwesterfirma NovoCarbo produziert und vermarktet Pflanzkohle
33	Frage an Anlagenbetreiber: Name oder Kontakt von Herstellern von Schwarzerde/Terra Preta, die Ihre Pflanzkohle beziehen	Siehe 32.
Weitere wichtige Parameter aus Ihrer Sicht		
34		
35		
36		
37		
38		
39		
40		
Kommentar/Anmerkungen		

Abbildung A.3.: Fragenkatalog - IWB



**Masterarbeit von Alexander Schneider**

„Ökobilanz zu Herstellung und Einsatz von anthropogener Schwarzerde für Grünflächen, Stadtbäume und Landwirtschaft“

**am KIT Karlsruher Institut für Technologie**

Fragenkatalog an Hersteller/Betreiber von Pyrolyseanlagen zu Größen/Daten, die zur Ökobilanzierung des Pyrolyseprozesses benötigt werden

Datum: 13.01.2022

Für Nachfragen stehen wir gerne zur Verfügung:

- Alexander Schneider: [uxhlu@student.kit.edu](mailto:uxhlu@student.kit.edu) (Verfasser)
- Jens Buchgeister: [jens.buchgeister@kit.edu](mailto:jens.buchgeister@kit.edu) (Betreuer), KIT, ITAS
- Dr. Armin Siepe: [siepe@posteo.de](mailto:siepe@posteo.de) (Betreuer), Büro SchwarzErde Karlsruhe

Die im Folgenden aufgeführten Fragen hinsichtlich des Pyrolyseprozesses werden im Rahmen einer Ökobilanzierung von der Herstellung bis zum Einsatz von Schwarzerde, in der die Pyrolyse ein wichtiger Prozessschritt darstellt, benötigt. Wünschenswert sind reale Betriebsdaten, die sich auf einen ein- oder mehrjährigen Anlagenbetrieb beziehen, oder Studien-/Experimentaldaten.

Falls bspw. PDF-Dateien o.Ä. zur Beantwortung herangezogen werden, bitte im zugehörigen Antwortfeld ein Verweis auf diese Datei angeben.

Fragenkatalog		
Nr.	Fragen	Antwort
1	Ein Verfahrensfließschema/Blockfließschema und/oder eine Listung aller Prozessschritte der Pyrolyseanlage	Ja, vorhanden
2	Feedstock-Zusammensetzung (Immediat- und Elementaranalyse)	Laboranalyse Landschaftspflegeholz ausgesiebt
3	Feedstock-Heizwert	Abhängig von Aussiebung und Alter des Landschaftspflegeholzes sowie vom Zugemischten Anteil Waldholz.



4	Feedstock-Anforderungen (maximaler Wassergehalt, minimaler Heizwert, sonstige Anforderungen wie Korngrößen-Bereich etc.)	50 % maximale Feuchte, dann Vortrocknung auf 20 % Feuchte für Pyreg Pflanzenkohleanlage, sowie Vorzerkleinerung auf <30 mm
5	Aufwand bei Beschicken und Entleeren (Dauer, Personalbedarf; Apparaturen inkl. Energie- und Materialaufwand)	Vollautomatische Anlage bis auf tägliche Kontrollgänge und Einstellarbeiten, Betriebsaufwand inkl. Biomasseannahme in Schubbodencontainer und Kohle BigBags 2 m3 einlagern 25 % Stelle.
6	Verweilzeit im Reaktor	15 min
7	Pyrolyse-Temperatur im Regelbetrieb	600-750 °C
8	Reaktortyp und Betriebsmodus (Batch, Semi-Batch, kontinuierlich)	Kontinuierlicher Schneckenreaktor äußerlich beheizt durch Abgas des Pyrolysegasbrenners.
9	Dauer beim Anfahren bis zum Regelbetrieb und ggf. beim „Runterfahren“ inkl. Energie- und Materialbedarf, eingesetzte Apparate	Kaltstart mit Aufheizen durch Erdgasbrenner bis Biomassezufuhr: 12h
10	Durchsatz der Anlage	300 kg/h Trockensubstanz
11	Personalbedarf für Betrieb	Siehe 5
12	Lebensdauer der Anlage (Zeitraum, durchgesetzte Produktmenge)	Unbekannt, Wirtschaftlichkeitsrechnung läuft über 20 Jahre
13	Jährliche Betriebsstunden (inkl. Wartungen, Störfälle, Rüstzeiten, geplante Arbeits-/Standtage etc.)	6500 h/a wegen Anbindung an Fernwärmenetz, wo Sommerdeckung besteht durch Müllverbrennung
14	Akkumulation oder Austrag des Abriebs in der Asche im Produkt	Abrieb wovon? Es gibt keine Ascherückstände, nur Wärme und Kohle.
15	Wartungs- und Instandhaltungsaufwand der Anlage sowie einzelner Apparate und Ersatzteile über die Lebensdauer (Regelintervalle, Checkheft); Energie- und Materialaufwand für Reparaturen	Nur Plandaten für Pyreg ca. 60 TEUR/a Unterhaltsarbeiten und Material. Zusätzlich Aufwände für die Restanlage.
16	Heizbedarf des Reaktors und sonstiger Verbraucher	Reaktor ca. 150 kW von den 750 kW Brenner, ergibt 600 kW Nutzwärmeleistung, davon 100-250 kW für die Vortrocknung
17	Strombedarf des Reaktors und sonstiger Verbraucher	Gesamtanlage ca. 50 kW im Mittel
18	Bedarf weiterer Betriebsmittel (Maschinenöl, Kraftstoff für Arbeitsmaschinen wie z.B. Stapler, Inertgas, Wasser, Verbrennungsluft/Sauerstoff etc.)	Stickstoffgenerator für Pyreg Prozessgasfilterreinigung, Start-Erdgas oder für Temperaturhaltung bis 400 kW.

19	Verwendung des Synthesegases (Stoff- und/oder Energieströme z.B. zur Reaktorbeheizung, zur Trocknung des Feeds, als externe Nutzwärme, zur Stromerzeugung, als Brennstoff, zur chemischen Synthese etc.)	FLOX-Brenner im Pyreg-System
20	Gesamtmasse und Flächenbedarf der Anlage	550 m <sup>2</sup> Flächenbedarf, Schätzung 200 t für Anlagen und Peripherie
21	Art und Gewichtsmenge der in der Anlage verbauten Apparaten sowie falls möglich Angaben zu Massenanteilen der Materialien (Edelstahl, Aluminium, Kupfer, Beton etc.)	Das wollen wir noch abschätzen
22	Heizbedarf, Strombedarf, Wasserbedarf und Art und Menge der verbauten Materialien der/des Gebäude/s, in der sich die Pyrolyseanlage und das Büro befinden	keinen
23	Flächenbedarf für das Betriebsgelände (Lagerhalle, Gebäude für Anlage und Büro etc.)	
24	Produktaufteilung (Anteil der Pflanzenkohle, des Pyrolysegases und gegebenenfalls des Pyrolyseöls und Wassers)	
25	(Elementar-)Analyse/Zusammensetzung der Pflanzenkohle	
26	(Elementar-)Analyse/Zusammensetzung des Pyrolysegases und/oder des Rauchgases / der Abluft (und gegebenenfalls des Pyrolyseöls und Wassers)	
27	Schadstoffgehalte in der Pflanzenkohle (PAK, Schwermetalle etc.)	
28	Schadstoffgehalte im Pyrolysegas/Rauchgas (und gegebenenfalls im Pyrolyseöl und Wasser)	
29	Physikalisch-chemische Eigenschaften der Pflanzenkohle (die bspw. im Rahmen einer Zertifizierung nach EBC-Kriterien bestimmt werden müssen)	Siehe Laboranalyse auf <a href="http://iwb.ch/pflanzenkohle">iwb.ch/pflanzenkohle</a>
30	Menge und Zusammensetzung des Abwassers	Waschwasser Bandrockner mit Holzstaub, beim Anfahren Abgaskondensat

31	Frage an Anlagenhersteller: Name oder Kontakt relevanter Anwender/Betreiber Ihrer Pyrolyseanlagen zur Herstellung von Schwarzerde/Terra Preta	
32	Frage an Anlagenbetreiber: Stellt Ihr Unternehmen Schwarzerde/Terra Preta her?	Nein
33	Frage an Anlagenbetreiber: Name oder Kontakt von Herstellern von Schwarzerde/Terra Preta, die Ihre Pflanzenkohle beziehen	Wir suchen noch Partner
Weitere wichtige Parameter aus Ihrer Sicht		
34		
35		
36		
37		
38		
39		
40		
Kommentar/Anmerkungen		

Abbildung A.4.: Fragenkatalog - CT-Schuster



**Masterarbeit von Alexander Schneider**

„Ökobilanz zu Herstellung und Einsatz von anthropogener Schwarzerde für Grünflächen, Stadtbäume und Landwirtschaft“

**am KIT Karlsruher Institut für Technologie**

Fragenkatalog an Hersteller/Betreiber von Pyrolyseanlagen zu Größen/Daten, die zur Ökobilanzierung des Pyrolyseprozesses benötigt werden

*Datum: 13.01.2022*

Für Nachfragen stehen wir gerne zur Verfügung:

- Alexander Schneider: [uxhlu@student.kit.edu](mailto:uxhlu@student.kit.edu) (Verfasser)
- Jens Buchgeister: [jens.buchgeister@kit.edu](mailto:jens.buchgeister@kit.edu) (Betreuer), KIT, ITAS
- Dr. Armin Siepe: [siepe@posteo.de](mailto:siepe@posteo.de) (Betreuer), Büro SchwarzErde Karlsruhe

Die im Folgenden aufgeführten Fragen hinsichtlich des Pyrolyseprozesses werden im Rahmen einer Ökobilanzierung von der Herstellung bis zum Einsatz von Schwarzerde, in der die Pyrolyse ein wichtiger Prozessschritt darstellt, benötigt. Wünschenswert sind reale Betriebsdaten, die sich auf einen ein- oder mehrjährigen Anlagenbetrieb beziehen, oder Studien-/Experimentaldaten.

Falls bspw. PDF-Dateien o.Ä. zur Beantwortung herangezogen werden, bitte im zugehörigen Antwortfeld ein Verweis auf diese Datei angeben.

Fragenkatalog		
Nr.	Fragen	Antwort
1	Ein Verfahrensfließschema/Blockfließschema und/oder eine Listung aller Prozessschritte der Pyrolyseanlage	- CTS40 Vollautomat: Toploader + Trocknung + Heißgasturbine + Produktsilos Siehe Anhang 1
2	Feedstock-Zusammensetzung (Immediat- und Elementaranalyse)	- ist notwendig
3	Feedstock-Heizwert	- optimal 4,4 kWh

4	Feedstock-Anforderungen (maximaler Wassergehalt, minimaler Heizwert, sonstige Anforderungen wie Korngrößen-Bereich etc.)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Korngröße 10-60 mm</li> <li>- Feinanteil &lt; 5%</li> <li>- Wassergehalt max. 50% vor Trockner, Eingang Karbonisierungseinheit kleiner oder gleich 90%</li> <li>- mind. Heizwert 3,6 kWh/kg TS</li> <li>- sonstige Anforderung: Rieselfähig (Pellets nur in Kombination mit holziger Biomasse)</li> </ul>
5	Aufwand bei Beschicken und Entleeren (Dauer, Personalbedarf; Apparaturen inkl. Energie- und Materialaufwand)	- Vollautomatisch
6	Verweilzeit im Reaktor	- 2,5 - 3 Stunden
7	Pyrolyse-Temperatur im Regelbetrieb	- 720 - 750 °C
8	Reaktortyp und Betriebsmodus (Batch, Semi-Batch, kontinuierlich)	- kontinuierlich
9	Dauer beim Anfahren bis zum Regelbetrieb und ggf. beim „Runterfahren“ inkl. Energie- und Materialbedarf, eingesetzte Apparate	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 4 Stunden Abfahren</li> <li>- 4 Stunden Anfahren</li> <li>- Standbybetrieb bei kleinen Störungen</li> </ul>
10	Durchsatz der Anlage	<ul style="list-style-type: none"> <li>- pro Jahr</li> <li>- 5698 Tonnen bei 90 % (HHS)</li> <li>- bis zu 1600 Tonnen PK</li> </ul>
11	Personalbedarf für Betrieb	- 2 Personen
12	Lebensdauer der Anlage (Zeitraum, durchgesetzte Produktmenge)	- 10 Jahre
13	Jährliche Betriebsstunden (inkl. Wartungen, Störfälle, Rüstzeiten, geplante Arbeits-/Standtage etc.)	- 7500 Stunden im Jahr
14	Akkumulation oder Austrag des Abriebs in der Asche im Produkt	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Konversionsrate 3 zu 1 bei Holzhack-schnitzel</li> <li>- keine Akkumulation der Asche</li> <li>- kontinuierlicher Austrag des Abriebs und der Asche im Produkt</li> <li>- Aschegehalt: 4% (je nach Rindenanteil)</li> </ul>
15	Wartungs- und Instandhaltungsaufwand der Anlage sowie einzelner Apparate und Ersatzteile über die Lebensdauer (Regelintervalle, Checkheft); Energie- und Materialaufwand für Reparaturen	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Jahreswartung, Intervall abhängig vom Wartungsvertrag</li> <li>- Ersatzteile: Abhängig von der Fahrweise und der Biomasse</li> </ul>
16	Heizbedarf des Reaktors und sonstiger Verbraucher	- Lediglich beim Anfahrbetrieb der E-Flox-Verbrennung, Geschätzte Jahresmenge: 2500 l Flüssiggas (je nach Fahrweise)

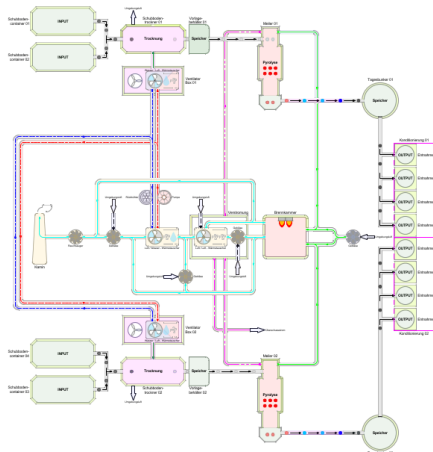
17	Strombedarf des Reaktors und sonstiger Verbraucher	- 100 kW gesamte Anlage + Peripherie - 130 kW Eigenstromproduktion mittels Heißgasturbine
18	Bedarf weiterer Betriebsmittel (Maschinenöl, Kraftstoff für Arbeitsmaschinen wie z.B. Stapler, Inertgas, Wasser, Verbrennungsluft/Sauerstoff etc.)	- Wasserbedarf je nach Produkthanforderung der Pflanzenkohle (EWC 15-20%)
19	Verwendung des Synthesegases (Stoff- und/oder Energieströme z.B. zur Reaktorbeheizung, zur Trocknung des Feeds, als externe Nutzwärme, zur Stromerzeugung, als Brennstoff, zur chemischen Synthese etc.)	- Synthesegas wird in der eFlox-Verbrennung thermisch verwertet, die thermische Energie wird in nachgeschalteten Prozessen <b>1.)</b> In der Heißgasturbine zu 130 kW umgewandelt <b>2.)</b> Im nachgeschalteten Economizer können 500 kW in Form von heißem Wasser dem Trockner bereitgestellt werden <b>3.)</b> 1,4 MW thermische Energie stehen zur freien Verfügung (-wahlweise können alle Synthesegaskondensate abgeschieden werden(e-Fuel))
20	Gesamtmasse und Flächenbedarf der Anlage	- Gesamtmasse: 109220 Kg - Flächenbedarf: CTS40 + Peripherie + Lagersilos + 500 Kubikmeter Lagersilos → 500 qm
21	Art und Gewichtsmenge der in der Anlage verbauten Apparate sowie falls möglich Angaben zu Massenanteilen der Materialien (Edelstahl, Aluminium, Kupfer, Beton etc.)	Edelstahl, Aluminium, Kupfer, Kunststoff
22	Heizbedarf, Strombedarf, Wasserbedarf und Art und Menge der verbauten Materialien der/des Gebäude/s, in der sich die Pyrolyseanlage und das Büro befinden	- Überdachte Halle - neun Meter hoch - ebenes Fundament
23	Flächenbedarf für das Betriebsgelände (Lagerhalle, Gebäude für Anlage und Büro etc.)	- Produktaufteilung Anteil der Pflanzenkohle bis zu 1600 Tonnen - Pyrolysegas: 1985,5, - Kondensat: 902,5 - Pyrolyseöl: 1083
24	Produktaufteilung (Anteil der Pflanzenkohle, des Pyrolysegases und gegebenenfalls des Pyrolyseöls und Wassers)	- Anteil der Pflanzenkohle: 5180, Pyrolysegases 1727 = 1985,5/2,2=902,5
25	(Elementar-)Analyse/Zusammensetzung der Pflanzenkohle	- s. Anhang Prüfbericht
26	(Elementar-)Analyse/Zusammensetzung des Pyrolysegases und/oder des Rauchgases / der Abluft (und gegebenenfalls des Pyrolyseöls und Wassers)	- Liegt CTS vor
27	Schadstoffgehalte in der Pflanzenkohle	Zusätzlich weisen die hergestellten Pflanzenkohleprodukte niedrigste PAK-

	(PAK, Schwermetalle etc.)	Messwerte auf. Die Daten der Messreihe (Zeitraum über 21 Monate, n = 9) können hierzu vorgelegt werden (Analyseinstitut: Eurofins, Toluol Extraktion mit verlängerter Extraktionszeit). Damit unterschreiten die Pflanzenkohleprodukte aus dem CTS Verfahren die PAK-Grenzwerte nach EBC deutlich und sind nach aktueller Einschätzung bislang die qualitativ hochwertigsten Pflanzenkohlen am Markt.
28	Schadstoffgehalte im Pyrolysegas/Rauchgas (und gegebenenfalls im Pyrolyseöl und Wasser)	- Liegt CTS vor, weit unter staatlicher Anforderung (bei Holzhackschnitzel)
29	Physikalisch-chemische Eigenschaften der Pflanzenkohle (die bspw. im Rahmen einer Zertifizierung nach EBC-Kriterien bestimmt werden müssen)	z.B. siehe Anhang Prüfbericht - H/Corg Verhältnis molar - O/C Verhältnis molar - Summe 16 EPA-PAK
30	Menge und Zusammensetzung des Abwassers	- Nicht vorhanden
31	Frage an Anlagenhersteller: Name oder Kontakt relevanter Anwender/Betreiber Ihrer Pyrolyseanlagen zur Herstellung von Schwarzerde/Terra Preta	---
32	Frage an Anlagenbetreiber: Stellt Ihr Unternehmen Schwarzerde/Terra Preta her?	---
33	Frage an Anlagenbetreiber: Name oder Kontakt von Herstellern von Schwarzerde/Terra Preta, die Ihre Pflanzenkohle beziehen	- Urs Hildebrandt - <a href="https://landmanagement.net/de/">https://landmanagement.net/de/</a>
Weitere wichtige Parameter aus Ihrer Sicht		
34	Kohlenstofffestlegungsrate	- durch das innovative Verfahren erreicht die CTS Technologie eine Kohlenstoff-Konversionsrate von bis zu 65 Mas.-%. Im kommerziellen Pyrolyseanlagenvergleich besitzt damit die CTS Technologie zum aktuellen Zeitpunkt die höchste Kohlenstofffestlegungsrate und somit auch die höchste CO <sub>2</sub> Entzugsleistung aus der Atmosphäre.
35		
36		

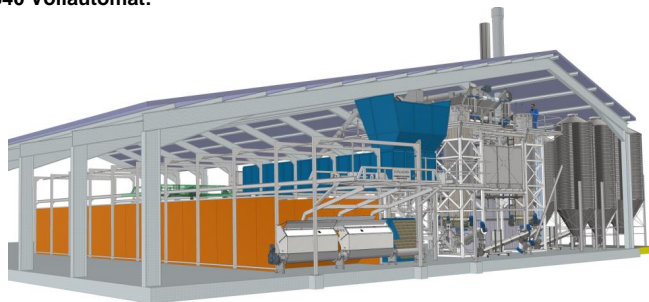
37		
38		
39		
40		
Kommentar/Anmerkungen		

**Anhang zur Frage 25 & 29: Prüfbericht Eurofins Physikalisch-chemische Eigenschaften**

**Siehe Anhang PDF Fließbild Verfahrensschema zur Frage Nr.1:**



**CTS40 Vollautomat:**





## A.4. Datenerhebung

Tabelle A.2.: Rohdaten-Sammlung

Größe	Einheit	Wert	Quelle
Pyrolyseprozess			
As (Arsen)-Emission (Konzentration im Abgas der Pyrolyseanlage)	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	35	Sørmo et al. [2020]
Benzen -Emission (Konzentration im Abgas der Pyrolyseanlage)	$\text{mg}/\text{m}^3$	6,0E-03	Pyreg
Cd (Cadmium)-Emission (Konzentration im Abgas der Pyrolyseanlage)	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	5,4	Sørmo et al. [2020]
CO <sub>2</sub> -Emission (Konzentration im Abgas der Pyrolyseanlage)	$\text{m}^3/\text{m}^3$	0,05	Sørmo et al. [2020]
CO-Emission (Konzentration im Abgas der Pyrolyseanlage)	$\text{mg}/\text{m}^3$	8	Pyreg
Cr (Chrom)-Emission (Konzentration im Abgas der Pyrolyseanlage)	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	96	Sørmo et al. [2020]
Cu (Kupfer)-Emission (Konzentration im Abgas der Pyrolyseanlage)	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	20	Sørmo et al. [2020]
PCDD/F-Emission (Konzentration im Abgas der Pyrolyseanlage)	$\text{ng}/\text{m}^3$	2,0E-03	Pyreg
Pb (Blei)-Emission (Konzentration im Abgas der Pyrolyseanlage)	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	10,8	Sørmo et al. [2020]
PAK-Emission (Konzentration im Abgas der Pyrolyseanlage)	$\text{ng}/\text{m}^3$	398	Sørmo et al. [2020]
Hg (Quecksilber)-Emission (Konzentration im Abgas der Pyrolyseanlage)	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	1,4	Sørmo et al. [2020]
Mo (Molybdän)-Emission (Konzentration im Abgas der Pyrolyseanlage)	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	5,7	Sørmo et al. [2020]
Ni (Nickel)-Emission (Konzentration im Abgas der Pyrolyseanlage)	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	18	Sørmo et al. [2020]
NO <sub>x</sub> -Emission (Konzentration im Abgas der Pyrolyseanlage)	$\text{mg}/\text{m}^3$	280	Pyreg
NMVOC-Emission (Konzentration im Abgas der Pyrolyseanlage)	$\text{m}^3/\text{m}^3$	3	Sørmo et al. [2020]
Staub-Emission (Konzentration im Abgas der Pyrolyseanlage)	$\text{mg}/\text{m}^3$	1,5E01	Pyreg
SO <sub>2</sub> -Emission (Konzentration im Abgas der Pyrolyseanlage)	$\text{mg}/\text{m}^3$	9,49E01	Pyreg
Sn (Zinn)-Emission (Konzentration im Abgas der Pyrolyseanlage)	$\mu\text{g}/\text{m}^3$	0,3	Sørmo et al. [2020]
Masse Rohrleitungen, Apparate etc. (Zerkleinerungs-/Trocknungsanlage)	$\text{kg}$	9300	Annahme a.B.v. IWB-Angabe
Überdachte Fläche der Pyrolyseanlage	$\text{m}^2$	300	Annahme a.B.v. IWB-Angabe
Fläche der Pyrolyseanlage	$\text{m}^2$	91	Pyreg
Fläche des Betriebs (Zerkleinerungs-/Trocknungs- und Pyrolyseanlage)	$\text{m}^2$	550	IWB
Masse Fördertechnik (Zerkleinerungs-/Trocknungs- und Pyrolyseanlage)	$\text{kg}$	5465	Annahme a.B.v. IWB-Angabe

## A. Anhang

Masse Elektronik (Zerkleinerungs-/Trocknungs- und Pyrolyseanlage)	<i>kg</i>	100	Annahme a.B.v. IWB-Angabe
Masse Wärmespeicher (Zerkleinerungs-/Trocknungs- und Pyrolyseanlage)	<i>kg</i>	730	Annahme a.B.v. IWB-Angabe
Masse Bandtrockner (Zerkleinerungs-/Trocknungs- und Pyrolyseanlage)	<i>kg</i>	10000	Annahme a.B.v. IWB-Angabe
Masse Schubbodencontainer (Zerkleinerungs-/Trocknungs- und Pyrolyseanlage)	<i>kg</i>	17200	Annahme a.B.v. IWB-Angabe
Erdgasbedarf pro Anfahren der Pyrolyseanlage	<i>kg</i>	400	Pyreg
Flüssiggasbedarf pro Jahr der Pyrolyseanlage	<i>L/a</i>	2500	CTS
Anfahrvorgänge pro Jahr (Pyrolyseanlage)	<i>/</i>	4-6	Pyreg
Masse Schaltschrankmodul (Pyreg)	<i>kg</i>	5700	Pyreg
Masse Wärmemodul (Pyreg)	<i>kg</i>	10400	Pyreg
Masse Prozessgasfiltermodul (Pyreg)	<i>kg</i>	7000	Pyreg
Masse Reaktormodul (Pyreg)	<i>kg</i>	14400	Pyreg
Masse Ventilatormodul (Pyreg)	<i>kg</i>	9400	Pyreg
Masse Brennkammermodul (Pyreg)	<i>kg</i>	11800	Pyreg
Anzahl Filterkerzen (Prozessgasfiltermodul, Pyreg)	<i>–</i>	80	Pyreg
Länge Filterkerzen (Prozessgasfiltermodul, Pyreg)	<i>m</i>	1,80	Pyreg
Außendurchmesser Filterkerzen	<i>m</i>	0,06	Meyer [2006]
Innendurchmesser Filterkerzen	<i>m</i>	0,04	Meyer [2006]
Anteil Siliciumcarbid (SiC) an Filterkerze	<i>m. – %</i>	86	fil [1984]
Anteil Siliciumdioxid (SiO <sub>2</sub> ) an Filterkerze	<i>m. – %</i>	7	fil [1984]
Anteil Aluminiumoxid (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) an Filterkerze	<i>m. – %</i>	7	Annahme a.B.v. fil [1984]
Chromstahl 18/8-Bedarf (bezogen auf Anlagenleistung; Partikelfilter)	<i>kg/kW</i>	1,9	Meyer [2006]
Niedriglegierter Stahl-Bedarf (bezogen auf Anlagenleistung; Partikelfilter)	<i>kg/kW</i>	0,72	Meyer [2006]
Aluminiumoxid-Bedarf für Filterkerzenaustausch (bezogen auf Anlagenleistung; Partikelfilter)	<i>kg/kW</i>	2,83	Meyer [2006]
Silikonprodukt-Bedarf für Isolation (bezogen auf Anlagenleistung; Partikelfilter)	<i>kg/kW</i>	0,75	Meyer [2006]
Elektronik-Bauteile-Bedarf (bezogen auf Anlagenleistung; Partikelfilter)	<i>kg/kW</i>	0,28	Meyer [2006]
Rohre und Halterungen-Bedarf (bezogen auf Anlagenleistung; Partikelfilter)	<i>kg/kW</i>	0,65	Meyer [2006]
Stahl-Bedarf für Gehäuse (Prozessgasfiltermodul, Ventilatormodul, Pyreg)	<i>kg</i>	2220	Annahme a.B.v. Pyreg-Angabe
Niedriglegierter Stahl-Bedarf (bezogen auf 14,889 kW Ventilator)	<i>kg</i>	298	Meyer [2006]
Kupfer-Bedarf (bezogen auf 14,889 kW Ventilator)	<i>kg</i>	21	Meyer [2006]
Niedriglegierter Stahl-Bedarf (bezogen auf 14,889 kW Ventilator)	<i>kg</i>	163	Meyer [2006]
Elektronik-Bauteile-Bedarf (bezogen auf Anlagenleistung, Ventilator)	<i>kg/kW</i>	0,036	Meyer [2006]
Rohre und Halterungen-Bedarf (bezogen auf 14,889 kW Ventilator)	<i>kg</i>	0,08	Meyer [2006]
Stahl-Bedarf für weitere Bauteile des Ventilatormoduls	<i>kg</i>	5014	Annahme a.B.v. Pyreg-Angabe

## A. Anhang

Stahl-Bedarf für weitere Bauteile des Bandrockners	<i>kg</i>	6082	Annahme a.B.v. IWB-Angabe
Schichtdicke Betonfundament	<i>m</i>	0,3	Stenzel [2005]
Reparaturaufwand (bezogen auf die Gesamtmasse der Anlage und ihrer Lebensdauer)	<i>m. – %</i>	1	Annahme
Jährliche Wartungen (Pyreg)	–	4	Pyreg
Enthalpie Wasser (flüssig, 20 °C, 1 bar)	<i>kJ/kg</i>	83,836	Stephan and Mayinger [2013]
Enthalpie Wasser (gasförmig 100 °C, 1 bar)	<i>kJ/kg</i>	2675,7	Stephan and Mayinger [2013]
Wärmebedarf für Holzhackschnitzeltrocknung	<i>kW</i>	100-250	IWB
Maschinenbedarf (Stapler) pro Pflanzenkohle-Big Bag	<i>min</i>	10	Annahme
Jährliche Betriebsstunden (Zerkleinerungs-/Trocknungs-, Pyrolyse- und Kompostierungsanlage)	<i>h/a</i>	7500	Pyreg, IWB, CTS
Lebensdauer Holzzerkleinerungs- und trocknungsanlage	<i>a</i>	50	ecoinvent: „wood drying facility“
Lebensdauer Pyrolyseanlage (Pyreg)	<i>a</i>	20	Pyreg
Lebensdauer Pyrolyseanlage (CTS)	<i>a</i>	10	CTS
Dichte Holz	<i>kg/m<sup>3</sup></i>	540	ecoinvent report No. 6-IX Holzenergie
Unterer Heizwert Holz (50 %Trockenmasse)	<i>MJ/kg</i>	10	ecoinvent report No. 6-IX Holzenergie
Unterer Heizwert Holz (80 %Trockenmasse)	<i>MJ/kg</i>	14,7723	Pyreg
Unterer Heizwert Pflanzenkohle (100 % Trockenmasse)	<i>MJ/kg</i>	30,77	Peters et al. [2015]
Unterer Heizwert Propan	<i>MJ/m<sup>3</sup></i>	93,14	DVFG e.V. <sup>9</sup>
Unterer Heizwert Butan	<i>MJ/m<sup>3</sup></i>	123,87	DVFG e.V.
Feeddurchsatz (80 % Trockenmasse, Pyreg PX1500)	<i>kg/h</i>	367,5	Pyreg
Feeddurchsatz (100 % Trockenmasse, Pyreg PX1500)	<i>kg/h</i>	294	Pyreg
Feeddurchsatz (80 % Trockenmasse, CTS40)	<i>kg/h</i>	916,25	CTS
Pflanzenkohledurchsatz (80 % Trockenmasse, Pyreg PX1500)	<i>kg/h</i>	90	Pyreg
Pflanzenkohledurchsatz (100 % Trockenmasse, Pyreg PX1500)	<i>kg/h</i>	72	Pyreg
Erdgasbedarf für Reaktor-„Anfahren“(5 Anfahrten pro Jahr)	<i>kg/a</i>	2000	Pyreg
Strombedarf PX1500-Anlage	<i>kW</i>	40	Pyreg
Strombedarf PX1500-Anlage, Trockner und Peripherie	<i>kW</i>	50	IWB
Masse des Sammelbehälters (Big Bag, pro Tonne Pflanzenkohle)	<i>kg/t</i>	5	Marzeddu et al. [2021]
<b>Schwarzerdeherstellung</b>			
Anteil des Grünschnitts am Kompostmaterial (Frischmasse)	<i>m. – %</i>	50	Vandecasteele et al. [2016]
Anteil der organischen Fraktion des Hausmülls am Kompostmaterial (Frischmasse)	<i>m. – %</i>	50	Vandecasteele et al. [2016]
Unterer Heizwert von Grünschnitt (viel Holzmaterial, Frischmasse)	<i>MJ/kg</i>	10	Kranert et al. [2008]

<sup>9</sup>DVFG - Deutscher Verband Flüssiggas e.V., [https://www.dvfg.de/fileadmin/user\\_upload/downloads/technische-merkmale/Factsheet\\_Fluessiggas2019-10-14.pdf](https://www.dvfg.de/fileadmin/user_upload/downloads/technische-merkmale/Factsheet_Fluessiggas2019-10-14.pdf)

## A. Anhang

Unterer Heizwert von Grünschnitt (wenig Holzmaterial, Frischmasse)	$MJ/kg$	5,6	Kranert et al. [2008]
Kompostanteil am Pflanzenkohlekompost (vor Kompostierung, Trockenmasse)	$m. - \%$	90	Vandecasteele et al. [2016]
Pflanzenkohleanteil am Pflanzenkohlekompost (vor Kompostierung, Trockenmasse)	$m. - \%$	10	Vandecasteele et al. [2016]
Gesteinsmehlanteil am Pflanzenkohlekompost	$m. - \%$	10	Shackley et al. [2016]
Gesteinsmehlmasse für Pflanzenkohlekompost	$kg$	17	Glaser et al. [2015]
Gesteinsmehlanteil am Pflanzenkohlekompost	$m. - \%$	10	Shackley et al. [2016]
Lehmanteil an der Schwarzerde	$m. - \%$	10	Shackley et al. [2016], Bionika-T10
Sandanteil an der Schwarzerde	$m. - \%$	10	Shackley et al. [2016]
Gesamtmasse des Kompostmaterials (vor Kompostierung, Frischmasse)	$kg$	22714	Vandecasteele et al. [2016]
Gesamtmasse des Kompostmaterials (vor Kompostierung, Trockenmasse)	$kg$	9858	Vandecasteele et al. [2016]
Gesamtmasse des Kompostmaterials (nach 25 Tagen Kompostierung, Frischmasse)	$kg$	10220	Vandecasteele et al. [2016]
Gesamtmasse des Kompostmaterials (nach 25 Tagen Kompostierung, Trockenmasse)	$kg$	7921	Vandecasteele et al. [2016]
Gesamtmasse des Kompostmaterials (nach 90 Tagen Kompostierung, Frischmasse)	$kg$	7880	Vandecasteele et al. [2016]
Gesamtmasse des Kompostmaterials (nach 90 Tagen Kompostierung, Trockenmasse)	$kg$	6288	Vandecasteele et al. [2016]
Abmaße Kompostmiete (Länge*Breite*Höhe)	$m^3$	60*3,2*2	Vandecasteele et al. [2016]
Anzahl Kompost-Wendevorgänge (pro 2 Tage, innerhalb der ersten 25 Tagen)	–	1	Vandecasteele et al. [2016]
Anzahl Kompost-Wendevorgänge (pro Woche, restliche Zeit des Kompostierungsprozesses)	–	1	Vandecasteele et al. [2016]
Dauer eines Kompost-Wendevorganges (Frontier-F16 Kompostwender)	$min$	10	Saer et al. [2013]
Abmaße Komposthaufens (Länge*Breite*Höhe)	$m^3$	3*2*1,5	Sánchez-García et al. [2015]
Dauer des Kompostierungsprozesses	$d$	135	Sánchez-García et al. [2015]
Dichte des Pflanzenkohlekompostes (Frischmasse)	$kg/m^3$	480	Vandecasteele et al. [2016]
CH <sub>4</sub> -Emission bei Kompostierung (bezogen auf Kompostfläche)	$g CH_4 - C / m^2$	107	Vandecasteele et al. [2016]
CO <sub>2</sub> -Emission bei Kompostierung (bezogen auf Kompostfläche)	$g CO_2 - C / m^2$	16076	Vandecasteele et al. [2016]
N <sub>2</sub> O-Emission bei Kompostierung (bezogen auf Kompostfläche)	$g N_2O - N / m^2$	16,4	Vandecasteele et al. [2016]
H <sub>2</sub> S-Emission bei Kompostierung (bezogen auf Kompostfläche und Tag)	$mg H_2S - S / m^2 / d$	37	Sánchez-García et al. [2015]
CO-Emission bei Kompostierung (bezogen auf Kompostfläche und Tag)	$mg CO - C / m^2 / d$	224	Sánchez-García et al. [2015]
NH <sub>3</sub> -Emission bei Kompostierung (bezogen auf Pflanzenkohlekompost)	$kg/t$	0,606	Stucki et al. [2019]

## A. Anhang

Wärmeverlust bei Kompostierung (bezogen auf Kompost)	<i>MJ/kg</i>	6,6	Eymann et al. [2015]
Pflanzkohlekompost-Anteil am Baum-Pflanzsubstrat	<i>vol. – %</i>	25	Embren [2016]
Pflanzkohle-Anteil am Pflanzkohlekompost	<i>vol. – %</i>	50	Embren [2016]
Kompost-Anteil am Pflanzkohlekompost	<i>vol. – %</i>	50	Embren [2016]
Dichte Kompost (Frischmasse)	<i>kg/m<sup>3</sup></i>	468	Vandecasteele et al. [2016]
Dichte Pflanzkohle (Trockenmasse)	<i>kg/m<sup>3</sup></i>	200	Vandecasteele et al. [2016]
<b>Ausbringung der Schwarzerde</b>			
Strukturmaterial-Anteil am Baum-Pflanzsubstrat (Macadam)	<i>vol. – %</i>	75	Embren [2016]
Schwarzerdeverlust (bezogen auf ursprüngliche Masse; Wind, Wasser, Bodenerosion)	<i>m. – %</i>	10	Marzeddu et al. [2021]
(Schwarzerde-)Anwendungsmenge (Trockenmasse, bezogen auf 1 Hektar und 3 Jahre)	<i>kg/ha</i>	30	BBodSchV
Menge Pflanzkohlekompost pro Baum	<i>m<sup>3</sup></i>	2,25	Embren [2016]
Grobmaterial-Anteil am Strukturmaterial	<i>vol. – %</i>	80	Embren [2016]
Feinmaterial-Anteil am Strukturmaterial	<i>vol. – %</i>	20	Embren [2016]
<b>Nutzung der Schwarzerde</b>			
NH <sub>3</sub> -Emission bei Feldstudie mit Pflanzkohlekompost (pro Jahr)	<i>kg/ha</i>	1,92	Oldfield et al. [2018]
NO <sub>3</sub> -Emission bei Feldstudie mit Pflanzkohlekompost (pro Jahr)	<i>kg/ha</i>	52,38	Oldfield et al. [2018]
N <sub>2</sub> O-Emission bei Feldstudie mit Pflanzkohlekompost (pro Jahr)	<i>kg/ha</i>	0,47	Oldfield et al. [2018]
NO-Emission bei Feldstudie mit Pflanzkohlekompost (pro Jahr)	<i>kg/ha</i>	0,25	Oldfield et al. [2018]
NO <sub>2</sub> -Emission bei Feldstudie mit Pflanzkohlekompost (pro Jahr)	<i>kg/ha</i>	0,19	Oldfield et al. [2018]
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> -Emission bei Feldstudie mit Pflanzkohlekompost (pro Jahr)	<i>kg/ha</i>	8,97	Oldfield et al. [2018]
Organische Substanz im Pflanzkohlekompost (zu Beginn)	<i>m. – %</i>	37,5	Friede et al. [2015]
Organische Substanz im Pflanzkohlekompost (nach 3 Jahren)	<i>m. – %</i>	30	Friede et al. [2015]
Kohlenstoffanteil des Pflanzkohlekompostes	<i>m. – %</i>	21	Friede et al. [2015]
CO <sub>2</sub> -Emission beim Abbau eines Torf-Pflanzkohle-Kompost-Substrates	<i>mg CO<sub>2</sub> – C/ kg</i>	2002	Lévesque et al. [2018]
CH <sub>4</sub> -Emission beim Abbau eines Torf-Pflanzkohle-Kompost-Substrates	<i>mg CH<sub>4</sub> – C/ kg</i>	13,5	Lévesque et al. [2018]
Cd-Gehalt im Pflanzkohlekompost	<i>mg/kg</i>	0,6	Wagner et al. [2021]
Co-Gehalt im Pflanzkohlekompost	<i>mg/kg</i>	84,4	Wagner et al. [2021]
Cr-Gehalt im Pflanzkohlekompost	<i>mg/kg</i>	45,8	Wagner et al. [2021]
Cu-Gehalt im Pflanzkohlekompost	<i>mg/kg</i>	22,0	Wagner et al. [2021]
Mo-Gehalt im Pflanzkohlekompost	<i>mg/kg</i>	1,9	Wagner et al. [2021]
Ni-Gehalt im Pflanzkohlekompost	<i>mg/kg</i>	44,4	Wagner et al. [2021]
Pb-Gehalt im Pflanzkohlekompost	<i>mg/kg</i>	26,4	Wagner et al. [2021]

## A. Anhang

Se-Gehalt im Pflanzenkohlekompost	<i>mg/kg</i>	2,8	Wagner et al. [2021]
Zn-Gehalt im Pflanzenkohlekompost	<i>mg/kg</i>	118,7	Wagner et al. [2021]
Mobilisierbarer Anteil von Cd im Pflanzenkohlekompost	<i>m. – %</i>	0,17	Wagner et al. [2021]
Mobilisierbarer Anteil von Co im Pflanzenkohlekompost	<i>m. – %</i>	0,0	Wagner et al. [2021]
Mobilisierbarer Anteil von Cr im Pflanzenkohlekompost	<i>m. – %</i>	0,01	Wagner et al. [2021]
Mobilisierbarer Anteil von Cu im Pflanzenkohlekompost	<i>m. – %</i>	0,42	Wagner et al. [2021]
Mobilisierbarer Anteil von Mo im Pflanzenkohlekompost	<i>m. – %</i>	1,21	Wagner et al. [2021]
Mobilisierbarer Anteil von Ni im Pflanzenkohlekompost	<i>m. – %</i>	0,02	Wagner et al. [2021]
Mobilisierbarer Anteil von Pb im Pflanzenkohlekompost	<i>m. – %</i>	0,07	Wagner et al. [2021]
Mobilisierbarer Anteil von Se im Pflanzenkohlekompost	<i>m. – %</i>	0,18	Wagner et al. [2021]
Mobilisierbarer Anteil von Zn im Pflanzenkohlekompost	<i>m. – %</i>	0,33	Wagner et al. [2021]
<hr/>			
Transportprozesse			
Distanz Anlagenhersteller zu Anlagenbetreiber	<i>km</i>	250	Annahme
Distanz Standort Holzernte zu Pyrolyseanlage	<i>km</i>	40	Annahme
Distanz Pyrolyseanlage zu Kompostierungsanlage	<i>km</i>	0,2	Annahme
Distanz Sammelstelle Biomüll zu Kompostierungsanlage	<i>km</i>	15	Annahme
Distanz Standort Grünschnitt zu Kompostierungsanlage	<i>km</i>	15	Annahme
Distanz Kompostierungsanlage zu Kunde (Landwirtschaft)	<i>km</i>	20	Annahme
Distanz Kompostierungsanlage zu Kunde (Stadt)	<i>km</i>	10	Annahme
Transportverlust (bezogen auf Masse des Transportgutes)	<i>m. – %</i>	3	Marzeddu et al. [2021], Yang et al. [2020]
Verlade- und Entlade-Verlust (bezogen auf Masse des Transportgutes)	<i>m. – %</i>	2	Marzeddu et al. [2021]

## A.5. Datenberechnung

### A.5.1. Biomasseerzeugung

Tabelle A.3.: Sachbilanz: Photosynthese (Buche und Fichte Mix)

<b>Inputflüsse</b>	Lieferprozess	Wert	Einheit
Carbon dioxid, in air		0,905	kg
Water, unspecified natural origin, DE		0,0005	m <sup>3</sup>
Sonnenenergie		20	MJ
<b>Outputflüsse</b>			
<b>Holz durch Photosynthese, Mischholz, 50%</b>		1	kg
<b>Trockenmasse</b>			
Energy, gross calorific value, in biomass		20	MJ
Oxygen		0,405	kg

Berechnungshinweis: Der Wert für Wasser beruht auf der Ausgangsbedingung von 50 % Wassergehalt des Holzes. Der Wert für Sauerstoff ergibt sich aus der Schließbedingung der Masse. Alle anderen Werte sind als arithmetisches Mittel aus den Prozessen „*softwood forestry, spruce...*“ und „*hardwood forestry, beech...*“ berechnet worden.

Tabelle A.4.: Sachbilanz: Rücken und Sammlung von Waldrestholz

<b>Inputflüsse</b>	Lieferprozess	Wert	Einheit
forwarding, forwarder	forwarding, forester	5,24212E-05	h
harvesting, forest harvester	harvesting, forestry harvester	3,86047E-05	h
Holz durch Photosynthese, Mischholz, 50% Trockenmasse	Photosynthese (Buche und Fichte Mix)	1	kg
power sawing, without catalytic converter	power sawing, without catalytic converter	0,0011	h
skidding, skidder	skidding, skidder	0,00017	h
<b>Outputflüsse</b>			
<b>Waldrestholz, 50% Standort Wald</b>	<b>Trockenmasse,</b>	1	kg

Berechnungshinweis: Alle Werte sind aus dem Prozess „*softwood forestry, spruce...*“ entnommen worden. Die Allokation weiterer dort aufgeführter Flüsse wie z.B. Landnutzung und Landnutzungsänderung, Pflanzung von Bäumen, Bau und Unterhalt der Forstwege etc. wird für den Prozess nicht durchgeführt, da Waldrestholz als Abfallprodukt bei der Holzernte anfällt.

Tabelle A.5.: Sachbilanz: Speicherung von CO<sub>2</sub> durch Photosynthese in Obst und Gemüse (Bioabfall)

Inputflüsse	Lieferprozess	Wert	Einheit
Carbon dioxid, in air		0,231	kg
Water, ground		0,00094	m <sup>3</sup>
Energy, gross calorific value, in biomass		2,515	MJ
Outputflüsse			
<b>Bioabfall, Obst und Gemüse, Standort Sammelstelle</b>		1	kg
Oxygen		0,168	kg
Energy, gross calorific value, in biomass		2,515	MJ

Berechnungshinweis: Die Werte für Wasser und die Energie des Bioabfalls stammen aus den Schließbedingungen für Masse und Energie (vgl. Gl.3.8 und 3.10). Der Wert für Sauerstoff wird aus dem Sauerstoff-Anteil am CO<sub>2</sub>-Molekül (i.e. 32 g/mol / 44 g/mol) berechnet. Alle anderen Werte sind als arithmetisches Mittel aus den Prozessen „*pear production, pear...*“, „*apple production, apple...*“, „*carrot production, carrot...*“, „*tomato production, processing grade...*“ und „*potato production, Swiss integrated production...*“ berechnet worden.

## A.5.2. Pyrolyseprozess - Pyreg

Tabelle A.6.: Sachbilanz: Prozess der Holzerkleinerung und -trocknung - Pyreg

Inputflüsse	Lieferprozess	Wert	Einheit
Waldrestholz, 50 % Trockenmasse, Standort Pyrolyseanlage	Transport (Wald-)Restholz zur Pyrolyseanlage	1,6	kg
electricity, high voltage	Deutschland Markt high Voltage 2018 (JB)	0,097	MJ
Energiegehalt Waldrestholz 50 % Trockenmasse		14,772	MJ
Herstellung Holzerkleinerungs- und trocknungsanlagen	Herstellung Holz Zerkleinerungs und Trocknungsanlage, Pyreg	7,256E-09	Stück
machine operation, 18,64 kW ≤ P ≤ 74,5 kW	machine operation, 18,64 kW ≤ P ≤ 74,5 kW, GLO	4,082E-05	h
Nutzwärme aus Pyrolyseprozess		1,714	MJ
wood chipping, industrial	wood chipping, industrial residual wood, RER	1,6	kg
Outputflüsse			
<b>Holzhackschnittel, 80 % Trockenmasse</b>		1,0	kg
Energiegehalt Holzhackschnittel, 80 % Trockenmasse		14,772	MJ
Verdunstetes Wasser		0,0006	m <sup>3</sup>
Energieverlust		0,257	MJ
Energiegehalt verdunstetes Wasser		1,555	MJ



Berechnungshinweis: Die Energie des Holzes (80 % TM) wird auf Basis der Massen- und Energiebilanz für den Pyrolyseprozess von Pyreg bestimmt (Gl.A.1) und für die Berechnung (Gl.A.2) des Energieinhalts des Holzes (50 % TM) verwendet. Anhand des Masseverlustes durch die Trocknung von 50 % auf 20 % TM wird der Inputfluss für das Holz berechnet (A.3). Zur Ermittlung des Strombedarfs der Trocknungsanlage wird die Differenz aus IWB (50 kW, Pyrolyse + Trocknung) und Pyreg (40 kW, Pyrolyse) zu 10 kW berechnet und diesen durch Division mit 367,5 kg/h (Output-Holzdurchsatz, 80 %TM) auf den Referenzfluss bezogen. Die Umrechnung von kWh auf MJ erfolgte nach Gl.A.4. Um den Anteil der Konstruktion der Zerkleinerungs- und Trocknungsanlage auf den Referenzfluss zu berechnen, werden die Lebensdauer, die jährlichen Stunden und der Output-Holzdurchsatz multipliziert und der Kehrwert gebildet (Gl.A.5). Da in der Konstruktion der Anlage das gesamte Betriebsgelände enthalten ist, wird auch der Maschinenbedarf für den Abtransport der Pflanzenkohle diesem Prozess zugeordnet. Dieser berechnet sich aus 10 min Arbeitszeit (Annahme) pro Big Bag (1 Tonne Pflanzenkohle), dem Pflanzenkohledurchsatz (befeuchtete Pflanzenkohle, 90 kg/h) und dem Holzdurchsatz (367,5 kg/h) (Gl.A.6). Der Wert für die Nutzwärme basiert auf dem Mittelwert der IWB-Angabe (100-250 kW), dem Pflanzenkohledurchsatz (trockene Pflanzenkohle, 72 kg/h) und dem Holzdurchsatz (367,5 kg/h) (Gl.A.7). Das verdunstete Wasser bei der Trocknung wird aus der Schließbedingung der Massenbilanz errechnet (A.8 und mit einer Dichte von flüssigem Wasser von 1000 kg/m<sup>3</sup>). Der Enthalpiestrom dieses verdunsteten Wassers wird auf Basis der Enthalpien von Wasser bei 1 bar und 100 °C (2675,7 kJ/kg) und 20 °C (83,836 kJ/kg) ermittelt (Gl.A.9). Da durch den Trocknungsvorgang der absolute Wert für die chemische Energie des Holzes konstant bleibt, entspricht der Output-Energiefluss für das Holz dem Input-Energiefluss des Holzes. Der Verlustwärme-Fluss wird aus der Schließbedingung für die Energiebilanz errechnet (Gl.A.10).

$$H_{U,Holz}(80\% TM) = \frac{\dot{H}_{Holz,aus}}{\dot{M}_{Holz,aus}} \quad (A.1)$$

$$H_{U,Holz}(50\% TM) = H_U(80\% TM) \cdot \frac{0,5}{0,8} \quad (A.2)$$

$$\dot{M}_{Holz,ein} = \dot{M}_{Holz,ein} \cdot \frac{0,8}{0,5} \quad (A.3)$$

$$1 kWh = \frac{1000}{1000} \cdot \frac{1 kJ}{s} \cdot 3600s = 1000 \cdot 1 kJ \cdot 3,6 = 3,6 MJ \quad (A.4)$$

$$7,256E-09 \frac{Anlagen}{kg Holzoutput} = \frac{1}{50 a \cdot 7500 h/a \cdot 367 kg/h} \quad (A.5)$$

$$Maschinenbedarf h = 10 min \cdot \frac{1 h}{60 min} \cdot \frac{90 kg}{1000 kg} \cdot \frac{1}{367,5 kg/h} \quad (A.6)$$

$$Nutzwärme MJ = \frac{175 kW}{72 kg/h} \cdot \frac{72 kg/h}{367,5 kg/h} \quad (A.7)$$

$$M_{ein} = M_{aus} \Leftrightarrow M_{Holz,ein} = M_{Holz,aus} + M_{Wasser,aus} \quad (A.8)$$

$$H_{Wasser,aus} = M_{Wasser,aus} \cdot (H_{Wasser,(g)}(100^\circ) - H_{Wasser,(fl)}(20^\circ)) \quad (A.9)$$

$$H_{ein} = H_{aus} \Leftrightarrow H_{Holz,ein} + H_{therm.} + H_{elektr.} = H_{Holz,aus} + H_{Wasser,aus} + H_{Verlust} \quad (A.10)$$

Tabelle A.7.: Sachbilanz: Herstellung Holz-Zerkleinerungs und -Trocknungsanlage - Pyreg

<b>Inputflüsse</b>	Lieferprozess	Wert	Einheit
building, hall, steel construction	building construction, hall, steel, CH	300	m <sup>2</sup>
chromium steel pipe	market for chromium steel pipe, GLO	9393	kg
concrete sole plate and foundation	market for concrete, sole plate, CH	75	m <sup>3</sup>
conveyor belt	conveyor belt production, RER	5,05	m
electronics for control unit	market for electronics, control unit, GLO	101	kg
heat storage, 2000L	heat storage production, 2000L, CH	2,02	Stück
Herstellung Holzhackschnitzel-Trockner	Herstellung Holzhackschnitzel Trockner	1,01	Stück
intermodal shipping container	intermodal shipping container production	3	Stück
metal working, for chromium steel	metal working, average for chromium steel, RER	9393	kg
Occupation, industrial area	2,295E+04	m <sup>2</sup> ·a	
Transformation, from grassland	459	m <sup>2</sup>	
Transformation, to industrial area	459	m <sup>2</sup>	
<b>Outputflüsse</b>			
<b>Herstellung Holz-Zerkleinerungs- und -Trocknungsanlage</b>		1,0	Stück
scrap steel	market for scrap steel, CH	9393	kg
waste concrete	market for waste concrete, CH	1,725E+05	kg
waste electric and electronic	market for waste electric equipment, GLO	101	kg

Berechnungshinweis: Auf Basis der IWB Angaben werden 17,2 Tonnen ((Leer-)Gesamtgewicht) für drei Schubbodencontainer („*intermodal shipping container*“) zur automatisierten Beschickung der Pyrolyseanlage, 9,3 Tonnen für Rohrleitungen, Halterungen und Komponenten der Holzzerkleinerung, 5,5 Tonnen für die gesamte Fördertechnik (Referenzfluss von „*conveyor belt production*“ ist 1 m und entspricht etwa 1,1 Tonnen, sodass Prozessmodul fünffach aufgeführt wird), 0,7 Tonnen für Wärmespeicher (zwei Wärmespeicher mit je 360 kg) und 0,1 Tonnen für elektronische Bauteile angenommen. Reparatur- und Instandhaltungsaufwände, die über die gesamte Lebensdauer der Anlage anfallen, werden wie gewohnt mit 1 m.-% der Gesamtmasse der Anlage oder der Masse der einzelnen Apparaturen der Anlage berücksichtigt. Es wird angenommen, dass die Zerkleinerung und Trocknung auf dem Betriebsgelände der Pyrolyseanlage steht (550 m<sup>2</sup>), wovon die Pyrolyseanlage 91 m<sup>2</sup> beansprucht (459 m<sup>2</sup>). Die Belegung der Fläche wird mit einer Lebensdauer von 50 Jahren und 459 m<sup>2</sup> berechnet. Der Bau und Flächenbedarf der Halle/Überdachung wird mit einer Fläche von 300 m<sup>2</sup> berücksichtigt (Annahme nach IWB-Angabe) und mit einem ecoinvent-Prozess „*building, hall steel construction*“ abgebildet. In diesem Prozess ist ein Betonfundament bereits inbegriffen, sodass für das gesamte Betriebsgelände, abzüglich der Halle, ein Betonfundament mit einer Fläche von 250 m<sup>2</sup> und 0,3 m Tiefe (nach Stenzel [2005]) berechnet wird. Die Werte für die entstehenden Abfallströme entstammen aus der Massenbilanz der jeweiligen Stoffe.

Tabelle A.8.: Sachbilanz: Herstellung Holzhackschnitzel-Trockner, Bandtrockner

Inputflüsse		Lieferprozess	Wert	Einheit
aluminium, wrought alloy		market for aluminium, wrought alloy, GLO	1280	kg
concrete normal		market for concrete normal, CH	0,02	m <sup>3</sup>
polystyrene foam slab		polystyrene foam slab, CH	451	kg
section bar rolling, steel		section bar rolling, steel, RER	1000	kg
sheet rolling, aluminium		sheet rolling, aluminium, RER	640	kg
steel, low alloyed		market for steel, low alloyed, GLO	7082	kg
steel, low alloyed, hot rolled		market for steel, low alloyed, hot rolled, GLO	1060	kg
synthetic rubber		market for synthetic rubber, GLO	27,2	kg
wire drawing, steel		wire drawing, steel, RER	59,2	kg
Outputflüsse				
<b>Herstellung</b>	<b>Holzhackschnitzel-</b>		1280	kg
<b>Trockner</b>				
scrap aluminium		market for scrap aluminium, CH	1280	kg
scrap steel		market for scrap steel, CH	8142	kg
waste polystyrene isolation		market for waste polystyrene isolation, CH	451	kg
waste reinforced concrete		market for waste reinforced concrete, CH	40	kg
waste rubber		market for waste rubber, CH	27,2	kg

Berechnungshinweis: Die Modellierung des Bandtrockners beruht auf den beiden ecoinvent-Prozessen „*technical wood drying facility*“ und „*conveyor belt production*“. Dabei wird die Masse des (Band-)Trockners mit 10 Tonnen angenommen (Annahme nach IWB-Angabe) und auf dieser Basis, die Materialaufwände [Dieckmann et al., 2016] der beiden ecoinvent-Prozesse mit dem Faktor 2 multipliziert. Die Differenz aus der Gesamtmasse und den berechneten Massen aus den ecoinvent-Prozessen wird als Wert für den niedriglegierten Stahl gesetzt (nach Massenbilanz). Die Werte für die entstehenden Abfallströme entstammen aus der Massenbilanz der jeweiligen Stoffe.

Tabelle A.9.: Sachbilanz: Pyrolyseprozess - Pyreg

<b>Inputflüsse</b>	Lieferprozess	Wert	Einheit
electricity, high voltage	Deutschland Markt high Voltage 2018 (JB)	2	MJ
Energieinhalt Holz		75,399	MJ
Holz hackschnitzel, 80 % Trockenmasse	Prozess der Holz Zerkleinerung und Trocknung, Pyreg	5,104	kg
Luft	14,6	kg	
natural gas, high pressure	market for natural gas, high pressure, DE	0,0042	m <sup>3</sup>
nitrogen, liquid	market for nitrogen, liquid, RER	0,0972	kg
Pyreg PX1500-Anlage	Herstellung Pyrolyseanlage PX1500, (Pyreg)	9,259E-08	Stück
<b>Outputflüsse</b>			
Arsenic		9,94E-08	kg
Benzene		1,49E-07	kg
Cadmium		1,34E-07	kg
Carbon dioxide, non-fossil		2,2956	kg
Carbon monoxide, non-fossil		0,0002	kg
Chromium		2,39E-06	kg
Copper		4,97E-07	kg
Dioxins		4,97E-14	kg
Energieinhalt Pflanzkohle		30,55	MJ
heat, future		21,55	MJ
Heat, waste		16,7	MJ
Lead		2,68E-07	kg
Mercury		3,48E-08	kg
Molybdenum		1,42E-07	kg
Nickel		4,47E-07	kg
Nitrogen oxides		0,00695	kg
NMVOC, non methane volatile org. matter		2,16E-07	kg
Nutzwärme aus Pyrolyseprozess		8,75	MJ
PAH, polycycl. aromatic hydrocarbons		9,89E-09	kg
Particulates		0,00037	kg
<b>Pflanzkohle, 100 % Trockenmasse</b>		1	kg
Rauchgas/abgas der Pyrolyse		16,496	kg
Sulfur dioxide		2,36E-06	kg
Zinc		7,46E-09	kg

Berechnungshinweis: Der Anteil von 9,259E-08 der Konstruktion (Pyreg PX1500-Anlage) bezogen auf den Referenzfluss *1 kg Pflanzkohle* des Prozessmoduls *Pyrolyseprozess* wird mit dem Pflanzkohle-Durchsatz von 72 kg/h (100 m.-% Trockenmasse), 7500 jährlichen Betriebsstunden und einer Anlagen-Lebensdauer von 20 Jahren berechnet. Neben der Konstruktion als Inputfluss, werden der Strombedarf mit 40 kW, der Erdgasbedarf mit 2000 kg/Jahr (zum Anfahren der Anlage; etwa 5 Anfahrten pro Jahr mit jeweils 400 kg), der Wasserbedarf (tritt aus Gründen der Vergleichbarkeit mit anderen Pyrolyseanlagen erst im Folgeprozess (Transport) auf), der Luftbedarf (insbesondere als Oxidationsmittel bei der Verbrennung der Pyroly-

segase) und der Stickstoffbedarf (zur Reinigung des Prozessgasfilters) durch Division mit dem Pflanzkohle-Durchsatz berechnet (IWB- und Pyreg-Angaben). Als Outputflüsse werden der Energieinhalt der Pflanzkohle, die Verlustwärme, die Nutzwärme zur Auskopplung, die Nutzwärme zur Trocknung der frischen Holzhackschnitzel (siehe Datenberechnung zu „Prozess der Holz-Zerkleinerung und -Trocknung“) und die Emissionen, die bei der Pyrolyse und der Verbrennung der Pyrolysegase entstehen, berechnet. Die Berechnung der Output-Energieflüsse erfolgt mit den Primärdaten von Pyreg bzw. IWB (durch Normierung mit dem Pflanzkohle-Durchsatz), während bei der Berechnung für die Emissionen größtenteils auf Literaturwerte zurückgegriffen werden muss. Aufgrund fehlender Daten zur PX1500-Anlage, können nur Daten für die Pyreg P500-Anlage, dem Vorgängermodell der PX1500, verwendet werden. Aus den Angaben von Pyreg zu den Konzentration von CO, Staub, NO<sub>x</sub> und SO<sub>2</sub> im Abgas und der Gesamt-Abgasgasmenge wird, unter Annahme der Rauchgasdichte von 0,75 kg/m<sup>3</sup> (auf Basis von GmbH), die Emissionen auf den Referenzfluss bezogen (Gl. A.11). Weitere Daten zu Emission (As, Benzol, Cd, CO<sub>2</sub> Cr, Cu, Hg, Mo, Ni, NMVOC<sup>10</sup>, PAK<sup>11</sup>, Pb, PCDD/F<sup>12</sup> und Zn werden in Form von Konzentrationen (kg/m<sup>3</sup>) oder Volumen-Anteilen (m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>) aus Sørmo et al. [2020] (P500-Anlage, Mix aus Hart- und Weichholz, >600 °C, 20 min) entnommen. Diese werden ebenfalls nach Gl. A.11 oder bei Volumenanteilen nach Gl. A.12 und unter Einbezug der Dichte der jeweiligen Stoffe aus der GESTIS-Stoffdatenbank berechnet.

$$2E - 04 \frac{kg CO}{kg Pfl.kohle} = 8E - 06 \frac{kg CO}{m^3 Rauchgas} \cdot \frac{1}{0,75 \frac{kg Rauchgas}{m^3 Rauchgas}} \cdot \frac{kg Rauchgas}{h} \cdot \frac{kg Pfl.kohle}{h} \quad (A.11)$$

$$2,2956 \frac{kg CO_2}{kg Pfl.kohle} = 0,05 \frac{m^3 CO_2}{m^3 Rauchgas} \cdot \frac{1,85 \frac{kg CO_2}{m^3 CO_2}}{0,75 \frac{kg Rauchgas}{m^3 Rauchgas}} \cdot \frac{kg Rauchgas}{h} \cdot \frac{kg Pfl.kohle}{h} \quad (A.12)$$

<sup>10</sup>NMVOC - Non Methane Volatile Organic Carbon, flüchtiger organischer Kohlenstoff ohne Methan

<sup>11</sup>PAK - Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe

<sup>12</sup>PCDD/F - Polychlorierte Dibenzo-p-dioxine und Dibenzofurane

Tabelle A.10.: Sachbilanz: Pyreg PX1500-Anlage

<b>Inputflüsse</b>	Lieferprozesse	Wert	Einheit
control cabinet	control cabinet production, RER	15,251	Stück
industrial furnace, natural gas	industrial furnace production, natural gas, RER	2,505	Stück
Occupation, industrial area		1820	m <sup>2</sup> ·a
oil boiler, 100 kW	oil boiler production, 100 kW, CH	7,878	Stück
Prozessgasfilter-Modul	Herstellung Prozessgasfilter Modul	1,01	Stück
Reaktor-Modul	Herstellung Reaktor-Modul	2,857	Stück
Transformation, from grassland		91	m <sup>2</sup>
Transformation, to industrial area		91	m <sup>2</sup>
transport, freight, light commercial vehicle	market for transport, freight, light commercial vehicle, CH	2,4E+04	t·km
transport, freight, lorry >32 tons	market for transport, freight, lorry >32 tons, RER	1,5E+04	t·km
Ventilator-Modul	Herstellung Ventilator-Modul	1,01	Stück
<b>Outputflüsse</b>			
<b>Pyreg PX1500-Anlage</b>		1	Stück

Berechnungshinweis: Die Pyreg-Angabe zu den Massen der sechs Modul-Komponenten der Pyreg PX1500-Anlage (Schaltschrank-, Brennkammer-, Wärme-, Prozessgasfilter-, Reaktor- und Ventilatormodul) sind die Grundlagen für die Datenberechnung. Für die Module *Schaltschrank*, *Brennkammer* und *Wärme* werden die ecoinvent-Prozesse „control cabinet“, „industrial furnace, natural gas“ und „oil boiler, 100 kW“ angenommen und lediglich hinsichtlich der Gesamtmasse angepasst. Dazu werden die Massen aller Input-Stoffflüsse addiert und die berechnete Summe ergibt durch Bezug zur Massenvorgabe von Pyreg den notwendigen Skalierungsfaktor. Für das Reaktormodul wird ein Wert von 2,857 angesetzt. Dieser beruht auf der Angabe, dass der Reaktor etwa alle 7 Jahre ausgetauscht werden muss, womit für die Lebensdauer der gesamten Anlage von 20 Jahren 2,857 Reaktormodule benötigt werden. Zum Prozessgasfiltermodul und Ventilatormodul sind keine adäquaten Prozesse in der ecoinvent-Datenbank enthalten, weshalb diese auf Basis anderer Daten selbst erstellt werden und daher deren Massen bereits den Vorgaben entsprechen und sie jeweils mit dem Wert von 1,01 in die Sachbilanz einfließen. Reparatur- und Instandhaltungsaufwände, die über die gesamte Lebensdauer der Anlage anfallen, werden wie gewohnt mit 1 m.-% der Gesamtmasse der Anlage oder der Masse der einzelnen Apparaturen der Anlage berücksichtigt. Für die Flächen-nutzungsänderung werden die 91 m<sup>2</sup> der Pyrolyseanlage eingesetzt. Der Transport der Anlage vom Hersteller zum Betreiber mit einem LKW wird mit 60 Tonnen und einer Distanz von 250 km berechnet. Die Servicefahrten für die Reparaturen und Instandhaltung finden quartalsweise (viermal pro Jahr bei 20 Jahren Lebensdauer) über eine Distanz von zweimal 250 km (Hin- und Rückfahrt) und 0,6 Tonnen Transportmaterial (1 m.-% der Gesamtmasse der Anlage).

Tabelle A.11.: Sachbilanz: Reaktor-Modul

<b>Inputflüsse</b>	Lieferprozesse	Wert	Einheit
alkyd paint	market for alkyd paint, RER	2,38	kg
aluminium, wrought alloy	market for aluminium, wrought alloy, GLO	21,42	kg
cast iron	market for cast iron, GLO	238	kg
concrete, normal	market for concrete, normal, CH	12,92	m <sup>3</sup>
copper, cathode	market for copper, cathode, GLO	9,52	kg
drawing of pipe, steel	drawing of pipe, steel, RER	18,02	kg
electricity, high voltage	Deutschland Markt high Voltage 2018 (JB)	1210,4	kWh
electronics	market for electronics, GLO	4,08	kg
heat, central or small scale	market for heat, central or small scale, CH	1972	MJ
iron scrap, unsorted	iron scrap, unsorted, GLO	-238	kg
iron-nickel-chromium alloy	market for iron-nickel-chromium alloy, GLO	108,8	kg
lubricating oil	market for lubricating oil, RER	2,38	kg
polyethylene, high density, granulate	market for polyethylene, high density, granulate, GLO	6,12	kg
polystyrene foam slab	market for polystyrene foam slab, GLO	52,7	kg
refractory, fireclay, packed	market for refractory, fireclay, packed, GLO	4828	kg
sheet rolling, steel	sheet rolling, steel, RER 273,7	kg	
steel, chromium steel 18/8	market for steel, chromium steel 18/8, GLO	18,02	kg
steel, low alloyed	market for steel, low alloyed, GLO	8304,16	kg
stone wool	market for stone wool, GLO	161,84	kg
<b>Outputflüsse</b>			
electronics scrap	market for electronics scrap, GLO	4,08	kg
inert waste	market for inert waste, CH	4828	kg
<b>Reaktor-Modul</b>	1	Stück	
scrap aluminium	market for scrap aluminium, CH	21,42	kg
scrap copper	market for scrap copper, CH	9,52	kg
scrap steel	market for scrap steel, CH	8322,18	kg
waste concrete	market for waste concrete, CH	3,036E+04	kg
waste mineral oil	market for waste mineral oil, CH	2,38	kg
waste mineral wool	market for waste mineral wool, CH	161,84	kg
waste polyethylene	market for waste polyethylene, CH	6,12	kg
waste polystyrene isolation	market for waste polystyrene isolation, CH	52,7	kg

Berechnungshinweis: Es wird der ecoinvent-Prozess „furnace production, wood chips, with silo, 1000 kW“ verwendet und hinsichtlich der Masse des Reaktormoduls angepasst (Faktor 0,34). Neben den Massen der einzelnen Komponenten des Prozesses wird außerdem die Flächennutzung („Occupation“) der bereits vorhandenen Sachbilanz geändert. Da beim Prozess „Herstellung Pyrolyseanlage PX1500“ bereits die Flächennutzung der gesamten Anlage

berücksichtigt wird, würde eine Aufführung der Flächennutzung in diesem Prozess zu einer Doppelzählung führen.

Tabelle A.12.: Sachbilanz: Prozessgasfilter-Modul

<b>Inputflüsse</b>	Lieferprozesse	Wert	Einheit
aluminium oxide, non-metallurgical	market for aluminium oxide, non-metallurgical, EU27 and ETFA	33,6	kg
aluminium oxide, non-metallurgical	market for aluminium oxide, non-metallurgical, EU27 and ETFA	198,1	kg
electronic component	market for electronic component, GLO	280	kg
metal working, for chromium steel	metal working, for chromium steel, RER	2550	kg
metal working, for steel	metal working, for steel, RER 2940	kg	
silica sand	market for silica sand, GLO	33,6	kg
silica sand	market for silica sand, GLO	198,1	kg
silicon carbide	silicon carbide production, RER	412,79	kg
silicon carbide	silicon carbide production, RER	2433,8	kg
steel, chromium steel 18/8	market for steel, chromium steel 18/8, GLO	650	kg
steel, chromium steel 18/8	market for steel, chromium steel 18/8, GLO	1900	kg
steel, low alloyed	market for steel, low alloyed, GLO	720	kg
steel, low alloyed	market for steel, low alloyed, GLO	2220,01	kg
stone wool	market for stone wool, GLO	750	kg
<b>Outputflüsse</b>			
<b>Prozessgasfilter-Modul</b>		1	Stück
scrap steel	market for scrap steel, CH	2550	kg
scrap steel	market for scrap steel, CH	2940,1	kg
waste electric and electronic equipment	market for electric and electronic equipment, GLO	280	kg
waste mineral wool	market for mineral wool, CH	750	kg
waste Siliziumkarbid-Material		3309,99	kg

Berechnungshinweis: Das Prozessgasfiltermodul, bestehend u.a. aus Siliziumcarbid-Filterkerzen wird mithilfe der Angaben aus der Dissertation von Meyer [2006] berechnet. Ausgehend von 80 Filterkerzen mit jeweils 1,80 m Länge (Pyreg-Angabe), einem Außendurchmesser von 0,06 m, einem Innendurchmesser von 0,04 m (Berechnung Volumen einer Filterkerze nach Gl.A.13) und einer Dichte von 2122 kg/m<sup>3</sup> (nach Meyer [2006] berechnet) wird eine Gesamtmasse von 480 kg berechnet. Diese 480 kg teilen sich unter den Bestandteilen von Siliziumcarbid werden mit 86 % Siliziumcarbid, 7 % Siliziumdioxid und 7 % Aluminiumoxid (enthält Anteil von Phosphor-pentoxid, da dafür kein Produktfluss in der ecoinvent-Datenbank vorhanden ist) auf [fil, 1984]. Der Austausch von Filterkerzen wird mit 2830 kg [Meyer, 2006] über eine Anlagen-Lebensdauer von 20 Jahren berücksichtigt (Pyreg-Angabe). Weitere verbaute Materialien im Prozessgasfilter sind 1900 kg Chromstahl, 720 kg niedrig-legierter Stahl, 750 kg Isolation (Annahme: Mineralwolle), 280 kg für Elektronik und 650 kg Stahl für Rohre und Halterungen [Meyer, 2006]. Es



werden die Originalwerte von Meyer [2006] verwendet, da die dort beschriebene Anlage adäquat zum Modul der Pyreg-Anlage ist (jeweils eine Leistung von etwa 1 MW). Mit etwa 4800 kg ist die Gesamtmasse des (Partikel-)Filters nach Meyer [2006] geringer als das Prozessgasfiltermodul der Pyreg-Anlage (7 Tonnen). Für die Differenz von 2200 kg wird niedriglegierter Stahl angenommen und soll u.a. das Gehäuse/den Container des Prozessgasfilters (Modulbauweise der Pyreg-Anlage) abbilden. Die Werte für die entstehenden Abfallströme entstammen aus der Massenbilanz der jeweiligen Stoffe.

$$\text{Filterkerzen} - \text{Volumen(Hohlzylinder)} : V = 1,8m \cdot \frac{\pi}{4} \cdot ((0,06m)^2 - (0,04m)^2) \quad (\text{A.13})$$

Tabelle A.13.: Sachbilanz: Ventilator-Modul

<b>Inputflüsse</b>	Lieferprozesse	Wert	Einheit
copper, anode	market for copper, anode, GLO	49,707	kg
electronic component	electronic component production, GLO 85,212	kg	
metal working, for copper	metal working, for copper, RER 49,707	kg	
metal working, for steel	metal working, for steel, RER 8514,99	kg	
sheet rolling, steel	sheet rolling, steel, RER 385,82	kg	
steel, low alloyed	market for steel, low alloyed, GLO	385,82	kg
steel, low alloyed	market for steel, low alloyed, GLO	705,366	kg
steel, low alloyed	market for steel, low alloyed, GLO	5014,434	kg
steel, low alloyed	market for steel, low alloyed, GLO	189,36	kg
steel, low alloyed	market for steel, low alloyed, GLO	2220,01	kg
stone wool	market for stone wool, GLO	750	kg
<b>Outputflüsse</b>			
<b>Ventilator-Modul</b>		1	Stück
scrap copper	market for scrap copper, CH	49,707	kg
scrap steel	market for scrap steel, CH	8514,99	kg
waste electric and electronic equipment	market for electric and electronic equipment, GLO	85,212	kg
waste mineral wool	market for mineral wool, CH	750	kg

Berechnungshinweis: Bei der Berechnung des Ventilatormoduls sind die Rahmenbedingungen die Gesamtmasse aus der Pyreg-Vorgabe, zwei 15 kW Ventilatoren, ein 5,5 kW Ventilator und eine Wasserversorgungsstrecke (Pyreg-Angabe). Mit den Materialaufwänden eines 14,9 kW Ventilators nach [Meyer, 2006], wird der Materialbedarf der drei Ventilatoren (in Summe 35,5 kW) zu 1400 kg berechnet. Die Einzelwerte sind in der Datenerhebung gelistet (Kap. A.4, Meyer [2006]). Unter der Annahme, dass 2220 kg Stahl (s. Prozessgasfiltermodul) für das Gehäuse/den Container des Ventilatormoduls, 750 kg für die Isolierung und 5014 kg Stahl für Wasserleitungen, Rohre, Halterungen und weitere Komponenten benötigt werden, wird die Bedingung der vorgegebenen Gesamtmasse erfüllt.

### A.5.3. Pyrolyseprozess - CT-Schuster

Tabelle A.14.: Sachbilanz: Prozess der Holz-Zerkleinerung und -Trocknung - CT-Schuster

<b>Inputflüsse</b>	Lieferprozesse	Wert	Einheit
Waldrestholz, 50 % Trockenmasse, Standort Pyrolyseanlage	Transport (Wald-)Restholz zur Pyrolyseanlage	1,6	kg
Herstellung Holzzerkleinerungs- und trocknungsanlage	Herstellung Holz Zerkleinerung und Trocknungsanlage, CT-Schuster	2,91E-09	Stück
machine operation, 18,64 kW ≤ P ≤ 74,5 kW	machine operation, 18,64 kW ≤ P ≤ 74,5 kW, GLO	4,343E-05	h
Nutzwärme aus Pyrolyseprozess		1,965	MJ
wood chipping, industrial	wood chipping, industrial residual wood, RER	1,6	kg
Energiegehalt Waldrestholz 50 % Trockenmasse		14,772	MJ
<b>Outputflüsse</b>			
<b>Holzhackschnitzel, 80 % Trockenmasse</b>		1,0	kg
Energiegehalt Holzhackschnitzel, 80 % Trockenmasse		14,772	MJ
Verdunstetes Wasser		0,0006	m <sup>3</sup>
Energieverlust		0,409	MJ
Energiegehalt verdunstetes Wasser		1,555	MJ

Berechnungshinweis: Analog zur Sachbilanz von „Prozess der Holz-Zerkleinerung und -Trocknung - Pyreg “ mit Daten von CT-Schuster.

Tabelle A.15.: Sachbilanz: Herstellung Holz-Zerkleinerungs und -Trocknungsanlage - CT-Schuster

<b>Inputflüsse</b>	Lieferprozesse	Wert	Einheit
building, hall, steel construction	building, hall, steel construction, CH	250	m <sup>2</sup>
chromium steel pipe	market for chromium steel pipe, GLO	1052,42	kg
concrete sole plate and foundation	market for concrete sole plate and foundation, CH	75	m <sup>3</sup>
conveyor belt	conveyor belt production, RER	7,985	m
electronics for control unit	market for electronics for control unit, GLO	159,691	kg
intermodal shipping container	intermodal shipping container production, GLO	8	Stück
metal working, for chromium steel	metal working, for chromium steel, RER	1052,42	kg
Occupation, industrial area		2,1E+04	m <sup>2</sup> ·a
Transformation, from grassland		420	m <sup>2</sup>
Transformation, to industrial area		420	m <sup>2</sup>
<b>Outputflüsse</b>			
<b>Herstellung Holz-Zerkleinerungs- und -Trocknungsanlage</b>		1,0	Stück
scrap steel	market for scrap steel, CH	1052,42	kg
waste concrete	market for waste concrete, CH	1,725E+05	kg
waste electric and electronic	market for waste electric and electronic, GLO	159,691	kg

Berechnungshinweis: Die einzelnen Werte orientieren sich an der CTS-Angabe zur Gesamtmasse der CTS40-Anlage und Peripherie (109,2 Tonnen) abzüglich der Pyrolyse-Einheit (53,4 Tonnen), in der auch die Trocknungsanlage inbegriffen ist. Zur Fördertechnik und Elektronik werden die Werte aus dem Prozess „Herstellung Holz-Zerkleinerung und -Trocknungsanlage - Pyreg“ verwendet und mit dem Faktor (Wurzel aus dem Durchsatzverhältnis von CT-Schuster und Pyreg) nach Gleichung A.14 multipliziert. Der Skalierungseffekt ist demnach durch die Wurzelfunktion berücksichtigt. Da die CTS40-Anlage aus vier Vertikalreaktoren besteht, wird angenommen, dass pro Reaktor zwei Schubbodencontainer benötigt werden. Zur Schließbedingung der Masse werden 1042 kg Stahl für sonstige Apparate und Bauteile angesetzt. Reparatur- und Instandhaltungsaufwände, die über die gesamte Lebensdauer der Anlage anfallen, werden wie gewohnt mit 1 m.-% der Gesamtmasse der Anlage oder der Masse der einzelnen Apparaturen der Anlage berücksichtigt.

$$\sqrt{\frac{916,3 \frac{kg}{h}}{367,5 \frac{kg}{h}}} = 1,58 \quad (A.14)$$

Tabelle A.16.: Sachbilanz: Pyrolyseprozess - CT-Schuster

<b>Inputflüsse</b>	Lieferprozesse	Wert	Einheit
Energieinhalt Holz		66,304	MJ
Holz hackschnitzel, 80 % Trockenmasse	Prozess der Holz Zerkleinerung und Trocknung, CT-Schuster	4,797	kg
Luft		39,8	kg
liquefied petroleum gas	market for liquefied petroleum gas, CH	9,9E-04	kg
CTS40-Anlage	Herstellung Pyrolyseanlage, CTS40, CT-Schuster	6,981E-08	Stück
<b>Outputflüsse</b>			
Arsenic		9,94E-08	kg
Benzene		1,49E-07	kg
Cadmium		1,34E-07	kg
Carbon dioxide, non-fossil		2,2956	kg
Carbon monoxide, non-fossil		0,00057	kg
Chromium		2,39E-06	kg
Copper		4,97E-07	kg
Dioxins		4,97E-14	kg
electricity, high voltage		0,576	MJ
Energieinhalt Pflanzenkohle		26,95	MJ
heat, future		16,495	MJ
Heat, waste		12,9	MJ
Lead		2,68E-07	kg
Mercury		3,48E-08	kg
Molybdenum		1,42E-07	kg
Nickel		4,47E-07	kg
Nitrogen oxides		0,00341	kg
NMVOC, non methane volatile org. matter		2,16E-07	kg
Nutzwärme aus Pyrolyseprozess		9,424	MJ
PAH, polycycl. aromatic hydrocarbons		9,89E-09	kg
Particulates		0,00057	kg
<b>Pflanzenkohle, 100 % Trockenmasse</b>		1	kg
Rauchgas/abgas der Pyrolyse		41,263	kg
Sulfur dioxide		2,36E-06	kg
Zinc		7,46E-09	kg

Berechnungshinweis: Analog zur Sachbilanz vom „Pyrolyseprozess - Pyreg“ mit Daten von CT-Schuster oder gleichen Werten insbesondere für die Schwermetall-Emissionen.

Tabelle A.17.: Sachbilanz: Herstellung Pyrolyseanlage CTS40 - CT-Schuster

<b>Inputflüsse</b>	Lieferprozesse	Wert	Einheit
aluminium, wrought alloy	market for aluminium, wrought alloy, GLO	3236,04	kg
copper, anode	market for copper, anode, GLO	269,67	kg
metal working, aluminium	metal working, aluminium, RER	3236,04	kg
metal working, copper	metal working, copper, RER	269,67	kg
metal working, steel	metal working, steel, RER	4,85E+04	kg
Occupation, industrial area		800	m <sup>2</sup> ·a
polystyrene expandable	market for polystyrene expandable, GLO	1348,35	kg
sawnwood, softwood, raw	sawnwood production, softwood, raw, CH	0,999	m <sup>3</sup>
steel, chromium steel 18/8	market for steel, chromium steel 18/8, GLO	1,08E+04	kg
steel, chromium steel 18/8	market for steel, chromium steel 18/8, GLO	5393,4	kg
steel, unalloyed	market for steel, unalloyed, GLO	3,24E+04	kg
Transformation, from grassland		80	m <sup>2</sup>
Transformation, to industrial		80	m <sup>2</sup>
zinc coat, pieces	market for zinc coat, pieces, GLO	1941,6	m <sup>2</sup>
<b>Outputflüsse</b>			
<b>CTS40-Anlage</b>		1	Stück
scrap aluminium	market for scrap aluminium, CH	3236,04	kg
scrap copper	market for scrap copper, CH	269,67	kg
scrap steel	market for scrap steel, CH	4,85E+04	kg
waste polystyrene	market for waste polystyrene, DE	1348,35	kg
waste wood		539,34	kg

Berechnungshinweis: Art und Menge für Stahl ist aus den CT-Schuster-Angaben entnommen. 10 m.-% der Anlage bestehen aus „sonstigen Materialien“. Es wird angenommen, dass 6 % Aluminium, 2,5 % Kunststoffe (Polystyren), 1 % Holz und 0,5 % Kupfer sind. Reparatur- und Instandhaltungsaufwände, die über die gesamte Lebensdauer der Anlage anfallen, werden wie gewohnt mit 1 m.-% der Gesamtmasse der Anlage oder der Masse der einzelnen Apparaturen der Anlage berücksichtigt.

## A.5.4. Schwarzerdeherstellung

Tabelle A.18.: Sachbilanz: Schwarzerdeherstellung für landw. Anwendung

<b>Inputflüsse</b>	Lieferprozesse	Wert	Einheit
Bioabfall, Obst und Gemüse, Standort Sammelstelle	Transport Bioabfall zur Kompostierungsanlage	0,764	kg
clay	market for clay, CH	0,1	kg
electricity, high voltage	Deutschland Markt high Voltage 2018 (JB)	0,085	MJ
Energieinhalt Biomüll		1,9222	MJ
Energieinhalt Grünschnitt		5,961	MJ
Energieinhalt Pflanzenkohle		5,494	MJ
Gesteinsmehl, Basalt, Standort Kompostierungsanlage	Transport Gesteinsmehl zur Kompostierungsanlage	0,090	kg
Grünschnitt, Standort Kompostierungsanlage	Transport Grünschnitt zur Kompostierungsanlage	0,764	kg
Kompostierungsanlage, offene Mietenkompostierung	Herstellung Kompostierungsanlage	9,99E-09	Stück
machine operation, diesel $\geq 74,5$ kW	market for achine operation, diesel $\geq 74,5$ kW, GLO	7E-04	h
Oxygen		0,623	kg
Pflanzenkohle, 80 % Trockenmasse	Transport Pflanzenkohle zur Kompostierungsanlage	0,180	kg
sand	market for sand, CH	0,1	kg
shed	shed construction, CH	3,05E-07	m <sup>2</sup>
wood chipping, industrial	market for wood chipping, industrial, GLO	1,528	kg
<b>Outputflüsse</b>			
Ammonia		4,8E-04	kg
Carbon dioxide, non-fossil		1,02	kg
Carbon monoxide, non-fossil		1,3E-04	kg
Dinitrogen monoxide		4,5E-04	kg
Energieinhalt Schwarzerde		8,182	MJ
Heat, waste		5,28	MJ
Hydrogen sulfide		1,15E-05	kg
Methane, non-fossil		2,47E-03	kg
municipal solid waste	market for municipal solid waste, CH	3,33E-05	kg
<b>Schwarzerde für landw. Anwendung</b>		1	kg
wastewater	market for wastewater, CH	4E-04	m <sup>3</sup>
Water		2,3E-04	m <sup>3</sup>

Berechnungshinweis: Grundlage des Prozesses ist der ecoinvent-Prozess „*treatment of bio-waste, industrial composting*“. Ausgehend von der Zusammensetzung der Schwarzerde werden alle Input- und Outputflüsse berechnet. Schwarzerde soll zu 10 % aus Sand, zu 10 % aus Lehm und zu 80 % aus einer Pflanzenkohle-Kompost-Gesteinsmehl-Mischung bestehen. Diese Mischung besteht, vor Beginn des Kompostierungsprozess, zu 85 % aus Kompostmaterial, 10 % Pflanzenkohle und 5 % Gesteinsmehl. Gesteinsmehl wird bei der Kompostierung

nicht abgebaut und Pflanzenkohle-Kompost verliert bei der Kompostierung 65 % seiner anfänglichen Masse (Verhältnis der Frischmasse nach Kompostierung zu Frischmasse vor Kompostierung). Unter der Annahme, dass alle Verluste dem Abbau des Kompostmaterials zugeschrieben werden, kann der prozentuale Anteil des Kompostmaterials vor der Kompostierung mit dem Frischmasseverlust verrechnet werden, um den Anteil des Kompostmaterials nach der Kompostierung (66 %) zu erhalten (Gl.A.5.4). D.h. auf ein kg Schwarzerde kommt 0,53 kg Kompost (Gl.A.16. Damit 0,53 kg Kompost nach der Kompostierung verbleiben, müssen nach Gl. A.17 1,528 kg Kompostmaterial eingesetzt werden. Das Kompostmaterial besteht zu 50 % aus Biomüll und zu 50 % aus Grünschnitt (je 0,764 kg). Die Menge an Pflanzenkohle lässt sich nach Gl. A.18 zu 0,18 kg (Menge für Gesteinsmehl wird analog dazu berechnet). Der Sauerstoffbedarf (in Luft) wird aus der Schließbedingung der Massenbilanz berechnet. Der Energiegehalt für den Grünschnitt wird als arithmetisches Mittel aus den Heizwerten holziger und wenig holziger Biomasse [Kranert et al., 2008] und der Grünschnitt-Menge berechnet. Die Energiegehalte für Biomüll und Pflanzenkohle sind aus vorherigen Prozessen bekannt und werden lediglich mit der jeweiligen Menge multipliziert, um den Energieinhalt zu berechnen. Die Kompostierungsanlage geht mit einem Wert von  $9,99\text{E-}09$  ein, der sich aus dem bereits vorhandenen Wert ( $7,41\text{E-}09$ ; in „*treatment of biowaste, industrial composting*“) und einer Skalierung berechnet. Im Prozess „*treatment of biowaste, industrial composting*“ ist der Wert auf den Inputstrom des Kompostmaterials bezogen. Demnach wird der vorhandene Wert mit der Summe der Inputmassen für Kompostmaterial, Pflanzenkohle und Gesteinsmehl sowie einem Faktor von 0,675 multipliziert. Dieser Faktor beschreibt die Skalierung der Anlagengröße aus dem ursprünglichen Prozess (10.000 t/a Kapazität) zur Anlagengröße für den erstellten Prozesse (6.250 t/a, s. Gl. A.19). Die Werte für den Maschinenbedarf und den Strombedarf werden aus dem ursprünglichen Prozess entnommen ( $3,52\text{E-}04$  h und  $0,0118$  kWh) und jeweils mit der Summe der Inputmassen für Kompostmaterial, Pflanzenkohle und Gesteinsmehl multipliziert. Zur Abbildung einer Werkstatt oder eines ähnlichen Gebäudes wird der Prozess „*shed*“ mit  $25\text{ m}^2$  bezogen auf 25 Jahre Lebensdauer, 6750 t/a Durchsatz und einem Output/Input-Verhältnis (Menge Schwarzerde zu Menge Gesamt-Inputmaterial) zu einem Wert von  $3,05\text{E-}07\text{ m}^2$  berechnet. Zur Zerkleinerung des Kompostmaterials ist außerdem ein Schredder notwendig, der über den Kompostmaterial-Inputfluss definiert ist. Luft-Emissionen, die bei der Kompostierung entstehen, werden primär auf Basis der Daten aus Vandecasteele et al. [2016] modelliert und für dort nicht aufgeführte Gase wird auf die Literatur von Sánchez-García et al. [2015] und Stucki et al. [2019] zurückgegriffen. In Vandecasteele et al. [2016] sind die gemessenen, kumulierten Luft-Emissionen in  $\text{g}/\text{m}^2$  gegeben (s. Kap. A.4), sodass mit der Grundfläche der Kompostmiete ( $60 \cdot 3,2\text{ m}^2$ ) multipliziert und außerdem die kohlenstoffbezogene Angabe in einen molekülbezogenen Wert (z.B.  $\text{CO}_2\text{-C}$  zu  $\text{CO}_2$ ) mit den molaren Massen umgerechnet wird. Die Normierung der Luft-Emissionen findet durch Division mit der Masse des Pflanzenkohle-Kompostes (PKK) nach der Kompostierung (7880 kg Frischmasse) statt (Gl. A.20). Zur Normierung auf den Referenzfluss *Schwarzerde* werden die PKK-bezogenen Luft-Emissionen mit dem PKK-Anteil an der PKK-Gesteinsmehl-Mischung und mit dem PKK-Gesteinsmehl-Anteil an der Schwarzerde multipliziert (Gl. A.21. Die CO- und H<sub>2</sub>S-Luft-Emissionen werden nach Sánchez-García et al.

[2015] berechnet. Die Daten liegen allerdings nicht kumuliert vor, sondern pro Tag und m<sup>2</sup>. Eine Umrechnung mit der Kompostierungsdauer von 135 Tagen und einer Grundfläche des Komposthaufens von 3m·2m ist daher im ersten Schritt notwendig, um analog zu der bereits beschriebenen Berechnungsformel vorzugehen. Die NH<sub>3</sub>-Luft-Emission ist bereits PKK-bezogen und muss demnach nach Gl. A.21 berechnet werden. Werte für die Emissionen von Wasser, Abwasser und Verunreinigen/Fremdstoffen (i.e. „municipal solid waste“ (Hausmüll)) werden aus dem ursprünglichen ecoinvent-Prozess „treatment of biowaste, industrial composting“ verwendet und mit dem PKK-Anteil an der Schwarzerde (abzüglich des Gesteinsmehl-Anteils) und der PKK-Inputmenge verrechnet. Der Wärmeverlust bei der Kompostierung wird nach Eyman et al. [2015] durch Multiplikation mit dem PKK-Gesteinsmehl-Anteil berechnet. Nach der Schließbedingung der Energiebilanz wird der Energieinhalt der Schwarzerde bestimmt.

$$85\% + 10\% + 5\% = 100\%$$

$$\Leftrightarrow 85\% \cdot (1 - 65\%) + 10\% + 5\% = 44\% \quad | \cdot \frac{100\%}{44\%}$$

$$\Leftrightarrow 66\% + 23\% + 11\% = 100\% \tag{A.15}$$

$$80\% \cdot 66\% = 53\% \tag{A.16}$$

$$\frac{0,53 \text{ kg}}{1 - 65\%} = 1,528 \text{ kg} \tag{A.17}$$

$$1,528 \text{ kg} \cdot \frac{10\%}{85\%} = 0,180 \text{ kg} \tag{A.18}$$

$$90 \frac{\text{kg Pfl.kohle}}{\text{h}} \cdot 10 \frac{\text{kg Schwarzerde}}{\text{kg Pfl.kohle}} \cdot 7500 \frac{\text{h}}{\text{a}} = 6250 \frac{\text{t Schwarzerde}}{\text{a}} \tag{A.19}$$

$$16076 \frac{\text{g CO}_2 - \text{C}}{\text{m}^2} \cdot (60\text{m} \cdot 3,2\text{m}) \cdot \frac{44 \frac{\text{g CO}_2}{\text{mol CO}_2}}{12 \frac{\text{g C}}{\text{mol CO}_2}} \cdot \frac{1}{7880 \text{ kgPKK}} = 1,436 \frac{\text{kg CO}_2}{\text{kg PKK}} \tag{A.20}$$

$$1,436 \text{ kg} \frac{\text{CO}_2}{\text{kg PKK}} \cdot (66\% + 23\%) \tag{A.21}$$



Tabelle A.19.: Sachbilanz: Schwarzerdeherstellung für städt. Anwendung

<b>Inputflüsse</b>	Lieferprozesse	Wert	Einheit
Bioabfall, Obst und Gemüse, Standort Sammelstelle	Transport Bioabfall zur Kompostierungsanlage	0,778	kg
electricity, high voltage	Deutschland Markt high Voltage 2018 (JB)	0,086	MJ
Energieinhalt Biomüll		1,957	MJ
Energieinhalt Grünschnitt		6,07	MJ
Energieinhalt Pflanzenkohle		12,526	MJ
Gesteinsmehl, Basalt, Standort Kompostierungsanlage	Transport Gesteinsmehl zur Kompostierungsanlage	0,05	kg
Grünschnitt, Standort Kompostierungsanlage	Transport Grünschnitt zur Kompostierungsanlage	0,778	kg
Kompostierungsanlage, offene Mietenkompostierung	Herstellung Kompostierungsanlage	2,44E-09	Stück
machine operation, diesel $\geq 74,5$ kW	market for machine operation, diesel $\geq 74,5$ kW, GLO	5,5E-04	h
Oxygen		0,884	kg
Pflanzenkohle, 80 % Trockenmasse, Standort Kompostierungsanlage	Transport Pflanzenkohle zur Kompostierungsanlage	0,41	kg
shed	shed construction, CH	1,38E-07	m <sup>2</sup>
wood chipping, industrial	market for wood chipping, industrial, GLO	1,557	kg
<b>Outputflüsse</b>			
Ammonia		5,4E-04	kg
Carbon dioxide, non-fossil		1,275	kg
Carbon monoxide, non-fossil		1,7E-04	kg
Dinitrogen monoxide		5,6E-04	kg
Energieinhalt Schwarzerde		13,64	MJ
Heat, waste		6,6	MJ
Hydrogen sulfide		1,44E-05	kg
Methane, non-fossil		3,09E-03	kg
municipal solid waste	market for municipal solid waste	3,33E-05	kg
<b>Schwarzerde für landw. Anwendung, Standort Kompostierungsanlage</b>		1	kg
wastewater	market for wastewater, CH	3,9E-04	m <sup>3</sup>
Water		2,3E-04	m <sup>3</sup>

Berechnungshinweis: Die Berechnung erfolgt analog zur Sachbilanz der *Schwarzerdeherstellung für landw. Anwendung*. Es ändern sich lediglich die Art und Menge der Komponenten der Schwarzerde (kein Sand und Lehm). Ausgehend von der Vorgabe nach Embren [2016] einer Mischung aus 50 vol.-% Pflanzenkohle und 50 vol.-% Kompost nach der Kompostierung, werden die dazu notwendigen Inputflüsse berechnet. Zur Umrechnung von volumenbezogene auf massenbezogene Prozent werden die Kompost-Dichte aus Vandecasteele et al. [2016] und die Pflanzenkohle-Dichte von Pyreg (eurofins-Analyse, wasserfrei) verwendet, wobei letztere Dichte auf einen Wassergehalt von 20 % umgerechnet wird (Gl. A.22 und A.23). Mit der Annahme, dass in PKK-Mischung nach der Kompostierung noch 5 m.-% Gesteinsmehl vorhanden ist,

berechnet sich der Anteil der Pflanzenkohle und des Kompostes durch Multiplikation mit 95% (=1-5%). Unter Rücksichtnahme einer unterschiedlichen Input-Materialzusammensetzung laufen alle weiteren Berechnungen analog zu der zuvor beschriebenen Sachbilanz ab.

$$\frac{50\text{vol.} - \% \cdot 468 \frac{\text{kg Kompost}}{\text{m}^3}}{50\text{vol.} - \% \cdot 468 \frac{\text{kg Kompost}}{\text{m}^3} + 50\text{vol.} - \% \cdot 360 \frac{\text{kg Pfl.kohle}(80\% TM)}{\text{m}^3}} = 56,5\text{m.} - \% \text{ (Kompostanteil)} \quad (\text{A.22})$$

$$\rho_{Pflanzkohle(80\% TM)} = 0,8 \cdot \rho_{Pflanzkohle(100\% TM)} + 0,2 \cdot \rho_{Wasser} \quad (\text{A.23})$$

Tabelle A.20.: Sachbilanz: Herstellung Kompostierungsanlage

Inputflüsse	Lieferprozesse	Wert	Einheit
cast iron	market for cast iron, GLO	5,05E+04	kg
concrete, sole plate and foundation	market for concrete, sole plate and foundation, CH	367	m <sup>3</sup>
copper cathode	market for copper cathode, GLO	378,75	kg
glue laminated timber, MUF	market for glue laminated timber, MUF, CH	14039	m <sup>3</sup>
glue laminated timber, PUR	market for glue laminated timber, PUR, CH	140,39	m <sup>3</sup>
gravel crushed	market for gravel crushed, CH	2,18E+07	kg
Occupation, construction site		750	m <sup>2</sup> ·a
Occupation, industrial site		1,88E+04	m <sup>2</sup> ·a
pitch	market for pitch, CH	1,22E+05	kg
reinforcing steel	market for reinforcing steel, GLO	2,14E+04	kg
sand	market for sand, CH	1,18E+06	kg
steel, low-alloyed	market for steel, low-alloyed, GLO	3,79E+04	kg
Transformation, from unspecified		750	m <sup>2</sup>
Transformation, to industrial area		750	m <sup>2</sup>
<b>Outputflüsse</b>			
inert waste	market for inert waste, CH	2,18E+07	kg
<b>Kompostierungsanlage</b>		1	Stück
waste building wood	market for waste building wood, CH	1,26E+05	kg
waste concrete, not reinforced	market for waste concrete, not reinforced, CH	8,15E+05	kg
waste reinforcement steel	market for aste reinforcement steel, CH	2,14E+04	kg

Berechnungshinweis: Es wird lediglich eine Modifikation des econivent-Prozesses „*composting facility construction, open*“ hinsichtlich Reparatur- und Instandhaltungsaufwände vollzogen. Reparatur- und Instandhaltungsaufwände, die über die gesamte Lebensdauer der Anlage anfallen, werden wie gewohnt mit 1 m.-% der Gesamtmasse der Anlage oder der Masse der einzelnen Apparaturen der Anlage berücksichtigt.

## A.5.5. Ausbringung

Tabelle A.21.: Sachbilanz: Ausbringung von Schwarzerde auf der landw. Anwendungsfläche mittels Düngestreuer und Pflügen

<b>Inputflüsse</b>	Lieferprozesse	Wert	Einheit
agricultural machinery, unspecified	market for agricultural machinery, unspecified, GLO	4,331	kg
diesel	market for diesel, CH	12,169	kg
Schwarzerde für landw. Anwendung, Standort Kunde	Transport Schwarzerde zum Kunden (Landwirtschaft), DE	2,29E+04	kg
shed	shed construction, CH	0,01	m <sup>2</sup>
tillage, ploughing	tillage ploughing, CH	1	ha
tractor, 4-wheel, agricultural	market for tractor, 4-wheel, agricultural, GLO	1,3475	kg
<b>Outputflüsse</b>			
<b>1 Hektar Ackerfläche, Schwarzerde eingearbeitet</b>		1	ha
Ammonia		2,20E-04	kg
Benzene		8,00E-05	kg
Benzo(a)pyrene		3,28E-07	kg
Cadmium (Emission to air)		1,10E-07	kg
Cadmium (Emission to soil)		7,38E-07	kg
Carbon dioxide, fossil		34,031	kg
Carbon monoxide, fossil		0,065	kg
Chromium		5,47E-07	kg
Copper		1,86E-05	kg
Dinitrogen monoxide		1,31E-03	kg
Lead		3,32E-06	kg
Methane, fossil		1,41E-03	kg
Nickel		7,67E-07	kg
Nitrogen oxides		0,497	kg
NMVOG, non-methane volatile org. matter		0,033	kg
PAH, polycycl. aromatic hydrocarbons		3,61E-05	kg
Particulates, <2,5 um		0,046	kg
Schwarzerde, unspecified		2,06E+04	kg
Schwarzerde, Verlust		2291,667	kg
Selenium		1,10E-07	kg
Sulfur dioxide		0,011	kg
Zinc (Emission to air)		1,10E-05	kg
Zinc (Emission to soil)		1,92E-03	kg

Berechnungshinweis: Grundlage der Sachbilanz ist der Prozess „solid manure loading and spreading, by hydraulic loader and spreader“. Die vorhandenen Werte sind ursprünglich auf ein Kilogramm Festmist/Dünger normiert und werden, durch Multiplikation mit der aufgebrachtten Gesamtmenge, auf den Referenzfluss von *1 Hektar Ackerfläche, Schwarzerde eingearbeitet* bezogen. Die aufgebrachtte Gesamtmenge wird als arithmetischer Mittelwert aus dem Wertebereich der Anwendungsmenge (s. Definition der funktionellen Einheit in Kap. 3.1, 3-30 Tonnen

Trockenmasse pro Hektar und drei Jahren) berechnet (16.500 kg TM). Unter Einbezug eines Wassergehaltes von 20 % ergibt sich eine Frischmasse von 20.625 kg. Berücksichtigt man 10 m.-% Verluste an Schwarzerde durch Wind, Wasser und/oder Bodenerosion nach Marzeddu et al. [2021], muss die zuvor berechnete Frischmasse mit 0,9 dividiert werden, dass 20.625 kg Schwarzerde im Boden verbleiben. Demnach wird die aufzubringende Gesamtmenge an Schwarzerde zu 22.917 kg berechnet.

Tabelle A.22.: Sachbilanz: Einsatz von Schwarzerde für Stadtbäume

<b>Inputflüsse</b>	Lieferprozesse	Wert	Einheit
excavation, hydraulic digger	excavation, hydraulic digger, RER	31,5	m <sup>3</sup>
gravel, crushed	market for gravel, crushed, CH	4455	kg
gravel, round	market for gravel, round, CH	1,78E+04	kg
Schwarzerde für städt. Anwendung, Standort Kunde	Transport Schwarzerde zum Kunden (Stadt), DE	1080	kg
transport, freight, light commercial vehicle	market for transport, freight, light commercial vehicle, CH	0,5	t-km
<b>Outputflüsse</b>			
Gravel		2,23E+04	kg
Schwarzerde, unspecified		1080	kg
<b>1 Stadtbaum, neugepflanzt mit Schwarzerde</b>		1	Stück

Berechnungshinweis: Nach Embren [2016] beträgt die Menge an Schwarzerde pro Stadtbaum 2,25 m<sup>3</sup>. Bei einer Dichte von 480 kg/m<sup>3</sup> ergibt dies 1080 kg pro Stadtbaum. Weiterhin nimmt die Pflanzgrube nach Embren [2016] 10-25 % der gesamten Pflanzgrube ein. Geht man dabei vom arithmetischen Mittel aus berechnet sich das Gesamtvolumen der Pflanzgrube nach Gl. A.24. Neben der Schwarzerde wird die Pflanzgrube mit Schotter/Macadam ausgefüllt. Der Schotter setzt sich wiederum zu 80 % aus grobem Schotter und zu 20 % aus feinem/zerkleinertem Schotter zusammen. Für den Aufwand des Aushubs und des Befüllen der Pflanzgrube wird die Arbeit eines Hydraulikbaggers angenommen (zweimal das Volumen der Pflanzgrube; für Aushub und Befüllen). Für den Transport des Baumes zur Pflanzgrube wird angenommen, dass dieser 500 kg wiegt und über eine Distanz von 1 km mit einem „light commercial vehicle“ befördert wird.

$$\frac{2,25 \text{ m}^3}{17,5 \%} = 15,75 \text{ m}^3 \quad (\text{A.24})$$

## A.5.6. Nutzung

Tabelle A.23.: Sachbilanz: Effekte der Schwarzerde im landw. Boden

<b>Inputflüsse</b>	Lieferprozesse	Wert	Einheit
1 Hektar Ackerfläche, Schwarzerde eingearbeitet	Ausbringung von Schwarzerde auf der Anwendungsfläche, DE	1	ha
<b>Outputflüsse</b>			
<b>1 Hektar Ackerfläche, 3 Jahre Wirkung von Schwarzerde</b>	3	ha-a	
Ammonia		4,245	kg
Cadmium		2,1E-05	kg
Carbon dioxide, non-fossil		2972,18	kg
Chromium		9,44E-05	kg
Copper		1,91E-03	kg
Dinitrogen monoxide		1,039	kg
Lead		3,8E-04	kg
Methane, non-fossil		7,29	kg
Molybdenum		4,7E-04	kg
Nickel		1,8E-04	kg
Nitrate		116,79	kg
Nitrogen dioxide		0,42	kg
Nitrogen monoxide		0,553	kg
Phosphorus pentoxide		19,83	kg
Selenium		1,0E-04	kg
Zinc		8,08E-03	kg

Berechnungshinweis: Die Werte für die  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{N}_2\text{O}$ ,  $\text{NO}$ ,  $\text{NO}_2$ ,  $\text{NH}_3$ - und  $\text{P}_2\text{O}_5$ -Emissionen sind in Oldfield et al. [2018] in Kilogramm pro Hektar und Jahr gegeben (für 25 Tonnen pro Hektar PKK-Anwendung) und werden durch Multiplikation mit dem Faktor 3 auf die Nutzungszeit von drei Jahren bezogen. Außerdem wird der Faktor 0,8 für den PKK-Anteil der Schwarzerde berücksichtigt, da von den mineralischen Komponenten keine Emissionen ausgehen. Für die Schwermetall-Boden-Emissionen werden die Werte aus Wagner et al. [2021] für die mobilisierbaren Anteile der Schwermetall in der PKK verwendet. Anhand von den dort gegebenen Schwermetall-Gehalten und deren mobilisierbaren Anteil wird mit der Masse der aufgetragenen Schwarzerde die absoluten Schwermetall Emissionen in den Boden berechnet. Für die  $\text{CO}_2$ - und  $\text{CH}_4$ -Emissionen sind keine Messwerte bekannt, weshalb diese Emissionen auf Grundlage des Abbaus der organischen Substanz des PKK nach Friede et al. [2015]. Diese baut sich in drei Jahren von 37,5 % auf 30 % ab (bezogen auf PKK-Trockenmasse). Organische Substanz besteht nach Wagner et al. [2015] zu 65,9 % (berechnet durch Division von 21,3 % Kohlenstoff-Anteil mit 32,2 % organische Substanz-Anteil für PKK). Der abgebaute Kohlenstoff berechnet sich, unter Einbezug der Schwarzerde-Anwendungsmenge(Trockenmasse), somit nach Gl. A.25. Lévesque et al. [2018] liefert die Grundlage für das Verhältnis zwischen den entstehenden  $\text{CO}_2$ - und  $\text{CH}_4$ -Emissionen beim Kohlenstoff-Abbau. Die Gesamt-Emissionen berechnen sich dann, bei Berücksichtigung der molaren Masse nach Gl. A.26.

$$(37,5\% - 30\%) \cdot 65,9\% \cdot 16500 \frac{t PKK}{ha \cdot 3a} = 816,1 \frac{kg C}{ha \cdot 3a} \quad (A.25)$$

$$816,1 \frac{kg C}{ha \cdot 3a} \cdot \frac{44 \frac{g CO_2}{mol}}{12 \frac{g C}{mol}} \cdot \frac{2002 \frac{mg CO_2-C}{kg PKK}}{2002 \frac{mg CO_2-C}{kg PKK} + 13,5 \frac{mg CH_4-C}{kg PKK}} = 2972 \frac{kg CO_2}{ha \cdot 3a} \quad (A.26)$$

Tabelle A.24.: Sachbilanz: Effekte der Schwarzerde im städt. Boden

Inputflüsse	Lieferprozesse	Wert	Einheit
1 Stadtbaum, neugepflanzt mit Schwarzerde	Einsatz Schwarzerde für Stadtbäume, DE	1	Stück
Outputflüsse			
<b>1 Stadtbaum, 3 Jahre Wirkung der Schwarzerde</b>		1	Stück
Ammonia		0,222	kg
Cadmium		1,10E-06	kg
Carbon dioxide, non-fossil		156,684	kg
Chromium		4,94E-06	kg
Copper		9,98E-05	kg
Dinitrogen monoxide		0,054	kg
Lead		2,00E-05	kg
Methane, non-fossil		0,382	kg
Molybdenum		2,48E-05	kg
Nickel		9,59E-06	kg
Nitrate		6,116	kg
Nitrogen dioxide		0,022	kg
Nitrogen monoxide		0,029	kg
Phosphorus pentoxide		1,038	kg
Selenium		5,44E-06	kg
Zinc		4,2E-04	kg

Berechnungshinweis: Die Berechnung der Emissionen bei der Nutzung der Schwarzerde im städt. Boden ist analog zur vorherigen Sachbilanz der Nutzung im landw. Boden. Das Verhältnis aus städt. und landw. Anwendungsmenge wird herangezogen, um die Emissionen an das städt. Szenario anzupassen.

### A.5.7. Transportprozesse

Für die Transporte der hölzernen Biomasse zum Standort der Pyrolyse bzw. der Kompostierung, der Pyrolyseanlage vom Hersteller zum Betreiber und der Schwarzerde zum Kunden werden LKWs der Abgasnorm *EURO 5* angenommen. Der Transport der Pflanzenkohle wird, aufgrund der direkten Nähe zwischen Pyrolyseanlage und Kompostierungsanlage, mit einem Schaufel-/Radlader bzw. Traktor über eine Distanz von 200 Metern angenommen. Weiterhin

werden für die Transportprozesse *Wald - Pyrolyseanlage* 40 km, *Biomüll - Kompostierungsanlage* 15 km, *Grünschnitt - Kompostierungsanlage* 15 km, *Kompostierungsanlage - Landwirtschaft* 20 km, *Kompostierungsanlage - Stadt* 10 km und für den Transport der Pyrolyseanlage vom *Hersteller zum Betreiber* 250 km festgelegt. Transportverluste werden nach Marzeddu et al. [2021] und Yang et al. [2020] mit 3 % und Verluste durch Verladen und Entladen des Transportgutes mit 2 % des transportierten Gutes beaufschlagt [Marzeddu et al., 2021].

Tabelle A.25.: Sachbilanz: Transport Waldrestholz zur Pyrolyseanlage

<b>Inputflüsse</b>	Lieferprozesse	Wert	Einheit
Waldrestholz, 50% Trockenmasse, Standort Wald	Rücken und Sammlung von Waldrestholz, DE	1,05	kg
transport, freight lorry >32 tons, EURO 5	market for transport, freight lorry >32 tons, EURO 5, RER	0,042	t-km
<b>Outputflüsse</b>			
<b>Waldrestholz, 50% Trockenmasse, Standort Pyrolyseanlage</b>			
Wood waste	1	kg	
Wood waste	0,03	kg	
Wood waste	0,02	kg	

Tabelle A.26.: Sachbilanz: Transport Bioabfall zur Kompostierungsanlage

<b>Inputflüsse</b>	Lieferprozesse	Wert	Einheit
Bioabfall, Obst und Gemüse, Standort Sammelstelle	Speicherung von CO <sub>2</sub> durch Photosynthese, Biomüll, DE 1,03	kg	
transport, freight lorry >32 tons, EURO 5	market for transport, freight lorry >32 tons, EURO 5, RER	0,015	t-km
<b>Outputflüsse</b>			
<b>Bioabfall, Obst und Gemüse, Standort Kompostierungsanlage</b>			
Wood waste	1	kg	
Wood waste	0,03	kg	

Tabelle A.27.: Sachbilanz: Transport Grünschnitt zur Kompostierungsanlage

<b>Inputflüsse</b>	Lieferprozesse	Wert	Einheit
Waldrestholz, 50% Trockenmasse, Standort Wald	Rücken und Sammlung von Waldrestholz, DE	1,03	kg
transport, freight lorry >32 tons, EURO 5	market for transport, freight lorry >32 tons, EURO 5, RER	0,015	t-km
<b>Outputflüsse</b>			
<b>Grünschnitt, Standort Kompostierungsanlage</b>			
Wood waste	1	kg	
Wood waste	0,03	kg	

Berechnungshinweis: Als Input-Fluss für den Grünschnitt wird Waldrestholz verwendet und damit angenommen, dass der Aufwand für die Grünschnitt-Gewinnung mit dem der Waldrestholz-Gewinnung übereinstimmt.

Tabelle A.28.: Sachbilanz: Transport Pflanzkohle zur Kompostierungsanlage und Befeuchtung der Pflanzkohle

<b>Inputflüsse</b>	Lieferprozesse	Wert	Einheit
Pflanzkohle, 100 % Trockenmasse	Pyrolyseprozess - Pyreg, DE	0,83	kg
tap water	market for tap water, CH	0,2	kg
transport, tractor and trailer, agricultural	market for transport, tractor and trailer, agricultural, CH	0,00014	t-km
<b>Outputflüsse</b>			
<b>Pflanzkohle, 80 % Trockenmasse</b>		1	kg
Pflanzkohle-Transportverluste		0,03	kg

Berechnungshinweis: Die Pflanzkohle wird eigentlich bei der Pyrolyse mit Wasser abgelöscht. Um verschiedene Anlagenkonzepte mit unterschiedlichen Pflanzkohlen-Resultaten (unterschiedlicher Wassergehalt) miteinander zu vergleichen, wird in diesem Prozess das notwendige Wasser zum Löschen der Pflanzkohle einbezogen. Für den Transport mit dem Radlader wird der Transport mit einem Traktor angenommen. Da hierbei der Traktor inklusive Anhänger berücksichtigt wird, wird der Wert für diesen Fluss mit 1,5 dividiert und damit der Transport mit dem Traktor ohne Anhänger abgeschätzt.

Tabelle A.29.: Sachbilanz: Transport Gesteinsmehl zur Kompostierungsanlage

<b>Inputflüsse</b>	Lieferprozesse	Wert	Einheit
basalt	basalt quarry operation, RER	1	kg
transport, freight train	market group for transport, freight train, GLO	0,0121	t-km
transport, freight inland waterways	market group for transport, freight inland waterways, GLO	0,0021	t-km
transport, freight light commercial vehicle	market group for transport, freight light commercial vehicle, GLO	0,001	t-km
transport, freight lorry unspecified	market group for transport, freight lorry unspecified, GLO	0,0323	t-km
transport, freight sea	market for transport, freight sea, GLO	0,0727	t-km
<b>Outputflüsse</b>			
<b>Gesteinsmehl, Basalt, Standort Kompostierungsanlage</b>	1	kg	

Berechnungshinweis: Der Prozess „market for basalt“ wird als Transportprozess für das Gesteinsmehl verwendet. Dieser Prozess wird hinsichtlich der Förderung und Verarbeitung nach einem Mittelwert für Europa (anstatt Mittelwert für Europa und Global) modifiziert. Als Input-Fluss für den Grünschnitt wird Waldrestholz verwendet und damit angenommen, dass der Aufwand für die Grünschnitt-Gewinnung mit dem der Waldrestholz-Gewinnung übereinstimmt.



Tabelle A.30.: Sachbilanz: Transport Schwarzerde zum Kunden (Landwirtschaftliche Anwendung)

<b>Inputflüsse</b>	Lieferprozesse	Wert	Einheit
Schwarzerde für landw. Anwendung, Standort Kompostierungsanlage textile, non-woven polypropylene	Schwarzerdeherstellung für landw. Anwendung, DE	1,03	kg
	market for textile, non-woven polypropylene, GLO	0,001	kg
transport, freight lorry 7,5-16 tons, EURO 5	market for transport, freight lorry 7,5-16 tons, EURO 5, RER	0,0206	t-km
<b>Outputflüsse</b>			
<b>Schwarzerde für landw. Anwendung, Standort Kunde</b>		1	kg
Schwarzerde-Transportverluste		0,03	kg
waste yarn and waste textile	market for waste yarn and waste textile, GLO	0,001	kg

Berechnungshinweis: Für den Transport der Schwarzerde werden Behälter (Big Bags mit 1 Tonne Fassungsvermögen) aus Polypropylene der Masse 5 kg verwendet [Marzeddu et al., 2021]. Unter der Annahme einer fünfmaligen Nutzung und bezogen auf den Referenzfluss ergibt sich ein Wert von 0,001 kg.

Tabelle A.31.: Sachbilanz: Transport Schwarzerde zum Kunden (Städtische Anwendung)

<b>Inputflüsse</b>	Lieferprozesse	Wert	Einheit
Schwarzerde für städt. Anwendung, Standort Kompostierungsanlage textile, non-woven polypropylene	Schwarzerdeherstellung für städt. Anwendung, DE	1,03	kg
	market for textile, non-woven polypropylene, GLO	0,001	kg
transport, freight lorry 7,5-16 tons, EURO 5	market for transport, freight lorry 7,5-16 tons, EURO 5, RER	0,0103	t-km
<b>Outputflüsse</b>			
<b>Schwarzerde für städt. Anwendung, Standort Kunde</b>		1	kg
Schwarzerde-Transportverluste		0,03	kg
waste yarn and waste textile	market for waste yarn and waste textile, GLO	0,001	kg

## A.5.8. Strommix Deutschland 2018

Tabelle A.32.: Sachbilanz: Deutschland Markt high Voltage (2030)(JB)

<b>Inputflüsse</b>	Lieferprozesse	Wert	Einheit
electricity, high voltage	Deutschland high Voltage Erdgas	0,135	kWh
electricity, high voltage	Deutschland high Voltage Öl	0,008	kWh
electricity, high voltage	Deutschland high Voltage Braunkohle	0,239	kWh
electricity, high voltage	Deutschland high Voltage Windkraft onshore	0,149	kWh
electricity, high voltage	Deutschland high Voltage Kernenergie	0,125	kWh
electricity, high voltage	Deutschland high Voltage Windkraft offshore	0,032	kWh
electricity, high voltage	Deutschland high Voltage Wasserkraft	0,029	kWh
electricity, high voltage	Deutschland high Voltage Steinkohle	0,135	kWh
electricity, high voltage	Deutschland high Voltage Biomasse	3,1E-04	kWh
electricity, high voltage	Deutschland high Voltage Geothermie	0,072	kWh
electricity, high voltage	Deutschland high Voltage Photovoltaik	0,13525	kWh
transmission network	market for transmission network, global	0,13525	kWh
<b>Outputflüsse</b>			
Dinitrogen monoxide		5,00E-06	kg
<b>electricity, high voltage</b>		1	kWh
Ozone		4,158E-06	kg